

Aus dem Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Das Vakuumphänomen: Radiologische Ergebnisse von Patienten/-innen mit
traumatischen Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät

Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Igor Nikiforov

aus Kahovka, Ukraine

Datum der Promotion: 3. Dezember 2021

Vorwort

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in „Einfluss des Unfallmechanismus auf die Wirbelkörperfraktur“ im *Der Unfallchirurg* sowie in „Burst fractures lead to a fracture-associated intervertebral vacuum phenomenon: a case series of 305 traumatic fractures of the thoracolumbar spine“ im *European Spine Journal* veröffentlicht.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Abstract	IX
Abstract (English).....	XI
1. Einleitung.....	1
1.1. Anatomie der thorakolumbalen Wirbelsäule	1
1.1.1. Wirbelkörper.....	3
1.1.2. Bandscheibe	5
1.1.3. Bandapparat der Wirbelsäule.....	5
1.2. Biomechanik der thorakolumbalen Wirbelsäule.....	7
1.2.1. Grundform der Wirbelsäule	7
1.2.2. Bewegungssegment der Wirbelsäule.....	7
1.2.3. Auf das Bewegungssegment einwirkende Kräfte.....	10
1.3. Traumatische Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule	14
1.3.1. Klassifikation des Unfallmechanismus	14
1.3.2. Diagnostische Modalitäten	15
1.3.2.1. Konventionelles Röntgen.....	15
1.3.2.2. Computertomographie.....	16
1.3.2.3. Magnetresonanztomographie.....	17
1.3.3. Klassifikation der thorakolumbalen Frakturen	17
1.3.3.1. Überblick über die Geschichte der Klassifikation der thorakolumbalen Frakturen	17
1.3.3.2. AOSpine-Klassifikation	21
1.3.4. Versorgung von thorakolumbalen Wirbelkörperfrakturen.....	24
1.3.4.1. Konservative Therapie	25
1.3.4.2. Operative Therapie.....	26

1.3.4.2.1.	Augmentationsverfahren	27
1.3.4.2.2.	Dorsale Stabilisierung	27
1.3.4.2.3.	Ventrale Stabilisierung	30
1.4.	Vakuumphänomen der Bandscheibe.....	31
1.4.1.	Physikalische Grundsätze der Entstehung eines Vakuumphänomens	33
1.4.2.	Degeneratives Vakuumphänomen der Bandscheibe	35
1.4.3.	Traumatisches Vakuumphänomen der Bandscheibe.....	36
1.5.	Fragestellungen und Hypothesen.....	36
2.	Methoden	37
2.1.	Studiendesign.....	37
2.2.	Ein- und Ausschlusskriterien	37
2.3.	Datenerhebung.....	38
2.3.1.	Patientenspezifische Daten	38
2.3.2.	Erkrankungsspezifische Daten.....	39
2.3.3.	Behandlungsspezifische Daten.....	39
2.4.	Datenanalyse	39
2.4.1.	Beurteilung des Unfallmechanismus.....	39
2.4.2.	Beurteilung der Frakturen	40
2.4.3.	Beurteilung des Vakuumphänomens	41
2.4.4.	Statistische Auswertung.....	42
3.	Ergebnisse.....	43
3.1.	Deskriptive Statistik	43
3.1.1.	Patientenspezifische Daten	43
3.1.2.	Unfallmechanismus.....	43
3.1.3.	Frakturtyp und -lokalisierung	45
3.1.4.	Radiologische Parameter.....	47
3.1.5.	Behandlungsspezifische Daten.....	48
3.1.6.	Vakuumphänomen.....	48

3.2.	Vakuumphänomen in der Initialbildgebung.....	49
3.2.1.	Zusammenhang mit den patientenspezifischen Daten	49
3.2.2.	Zusammenhang mit dem Unfallmechanismus	50
3.2.3.	Zusammenhang mit dem Frakturtyp und der Frakturlokalisierung	51
3.2.4.	Zusammenhang mit den radiologischen Parametern.....	52
3.3.	Traumatisches Vakuumphänomen und Frakturversorgung.....	52
3.4.	Traumatisches Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung	53
4.	Diskussion.....	55
4.1.	Traumatisches Vakuumphänomen in der Initialbildgebung	55
4.1.1.	Zusammenhang mit den patientenspezifischen Daten	55
4.1.2.	Zusammenhang mit dem Unfallmechanismus	56
4.1.3.	Zusammenhang mit dem Frakturtyp und der Frakturlokalisierung	56
4.1.4.	Zusammenhang mit den radiologischen Parametern.....	57
4.1.5.	Zusammenhang mit der Versorgung.....	57
4.2.	Traumatisches Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung	58
4.3.	Degeneratives Vakuumphänomen	59
4.4.	Abgrenzung des traumatischen vom degenerativen Vakuumphänomen.....	60
4.5.	Limitationen	61
4.5.1.	Selektionsbias.....	61
4.5.2.	Klassifikation.....	62
4.5.3.	Aussagekraft der Computertomographie	62
4.6.	Ausblick.....	63
5.	Literaturverzeichnis	65
6.	Eidesstattliche Versicherung.....	74
7.	Lebenslauf	77
8.	Publikationsliste	79
9.	Danksagung	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die Übersicht der Frakturkategorien mit entsprechender Säulenverletzung .	19
Tabelle 2: Geschlecht und Alter der Patienten/-innen	43
Tabelle 3: Verteilung des Unfallmechanismus nach Unfalltyp	44
Tabelle 4: Morphologie der Wirbelkörperfrakturen nach AOSpine-Klassifikation und Auftreten eines traumatischen Vakuumphänomens	45
Tabelle 5: Segmentaler GDW und Cobb-Winkel nach Frakturtyp und -lokalisierung.....	47
Tabelle 6: Inzidenz des Vakuumphänomens nach Art und Zeitpunkt der Feststellung..	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abschnitte und Krümmungen der Wirbelsäule.....	2
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Wirbels.....	4
Abbildung 3: Aufbau einer Bandscheibe.....	5
Abbildung 4: Bandapparat der Wirbelsäule	6
Abbildung 5: Kraft- und Bewegungsrichtungen je Bewegungssegment der Wirbelsäule.	8
Abbildung 6: Funktion der Bandscheibe	9
Abbildung 7: Wandernde Momentanpole der ventro-dorsalen und lateralen Flexion	10
Abbildung 8: Auf ein Bewegungssegment wirkende Drehmomente	11
Abbildung 9: Aufteilung der wirkenden Kräfte bei einem nicht waagerechten Wirbelkörper	13
Abbildung 10: Das Zwei- bzw. Drei-Säulen Modell.....	19
Abbildung 11: AOSpine-Klassifikation der thorakolumbalen Frakturen	22
Abbildung 12: Röntgenaufnahmen nach Ballonkyphoplastie.....	27
Abbildung 13: Mono- und bisegmentale dorsale Stabilisierung der Wirbelsäule	28
Abbildung 14: Röntgenaufnahmen einer mehrsegmentalen dorsoventralen Stabilisierung der Wirbelsäule.....	29
Abbildung 15: Aufnahmen mit Demonstration von Vakuumphänomenen der Bandscheibe	32
Abbildung 16: Entstehung eines Vakuumphänomens in einem impermeablen System	33
Abbildung 17: Entstehung eines Vakuumphänomens in einem teilpermeablen System	34
Abbildung 18: Verteilung der Frakturlokalisationen nach Verletzungstyp	46
Abbildung 19: Altersverteilung der Patienten/-innen mit und ohne initiales traumatisches Vakuumphänomen	50
Abbildung 20: Verteilung der Frakturen nach Unfalltyp	51
Abbildung 21: Verteilung der Frakturlokalisation mit und ohne ein Vakuumphänomen .	52

Abkürzungsverzeichnis

AO	<i>Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen</i>
CT.....	<i>Computertomographie</i>
GDW.....	<i>Grund-Deckenplatten-Winkel</i>
MRT.....	<i>Magnetresonanztomographie</i>
PLC	<i>posterior ligamentous complex</i>
TLISS	<i>Thoracolumbar Injury Severity Score</i>

Abstract

Das spinale Vakuumphänomen ist mit einer Reihe von degenerativen Erkrankungen der Wirbelsäule assoziiert. Dennoch ist die klinische Relevanz dieses Phänomens nicht abschließend geklärt, da es unter bestimmten Voraussetzungen auch ohne eine zugrunde liegende Pathologie auftreten kann. Besonders im Zusammenhang mit traumatischen Wirbelkörperfrakturen ist das Vakuumphänomen der Bandscheibe bislang nur unzureichend untersucht worden. Dabei ist es für die Frage der ventralen Stabilität und das Voranschreiten der posttraumatischen Degeneration von großem Interesse, wenn man die Pathophysiologie der Entstehung eines Vakuumphänomens berücksichtigt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, die grundlegenden Zusammenhänge des traumatischen Vakuumphänomens mit den patienten-, unfall-, fraktur- und versorgungsspezifischen Einflussfaktoren zu analysieren.

In der retrospektiven Analyse wurden 674 Patienten/-innen, die am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie, Campus Virchow-Klinikum, Charité – Universitätsmedizin Berlin, zwischen dem 01.01.2014 und dem 31.12.2015, aufgrund einer Wirbelkörperfraktur behandelt worden waren, untersucht. Folgende Kriterien führten zum Ausschluss der Patienten/-innen: Vorliegen einer pathologischen oder älteren Fraktur, alleiniges Vorliegen einer Subtyp-A0-Verletzung, Fehlen einer Initialbildgebung oder anderer relevanter Informationen. Insgesamt konnten so 201 Patienten/-innen mit traumatischen Wirbelkörperfrakturen in die Studie eingeschlossen werden. Hiervon wiesen 68 Patienten/-innen ein Vakuumphänomen mindestens einer Bandscheibe auf. Bei 58 Patienten/-innen waren Vakuumphänomene der Bandscheibe eines frakturierten Wirbelsäulensegments zu beobachten, die als traumatisch bedingt gewertet wurden. Von diesen wiederum wurden 42 erst in der Verlaufsuntersuchung festgestellt, die zum Zeitpunkt der Erhebung bei 35 Prozent (n = 71) der 201 Patienten/-innen vorlag. Die übrigen nicht traumatischen Vakuumphänomene wurden als degenerative Vakuumphänomene ebenfalls erfasst (n = 67).

Die statistische Analyse zeigte anschließend keine bedeutenden Zusammenhänge zwischen dem Unfallmechanismus, der Frakturlokalisation oder dem Frakturtyp und dem Auftreten des traumatischen Vakuumphänomens in der initialen Bildgebung auf. Allerdings konnte bei Patienten/-innen im höheren Alter häufigeres Auftreten eines degenerativen und traumatischen Vakuumphänomens beobachtet werden. Somit scheint

eine sichere Abgrenzung des degenerativen vom traumatischen Vakuumphänomen zum Zeitpunkt der Vorstellung nicht möglich zu sein.

Das Auftreten des traumatischen Vakuumphänomens in der Verlaufsbildgebung wurde hingegen als altersunabhängig festgestellt, dabei zeigten sich statistische Zusammenhänge zur Frakturmorphologie und der sekundären Versorgung der Fraktur. Es wurde häufiger bei Patienten/-innen mit einer Berstungsfraktur und denjenigen, die sekundär ventral versorgt wurden, beobachtet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass Wirbelkörperfrakturen das Auftreten eines Vakuumphänomens der Bandscheibe im Krankheitsverlauf begünstigen und dass dieses im Zusammenhang mit der Frakturversorgung zu stehen scheint.

Abstract (English)

The spinal vacuum phenomenon is associated with a number of degenerative diseases of the spine. Its clinical relevance, however, is still argued since the vacuum phenomenon is known to occur without an underlying pathology when certain conditions are met. Particularly in the context of traumatic vertebral fractures, little research on the vacuum phenomenon has been conducted.

Despite it being of great interest regarding the evaluation of anterior stability and post-traumatic degeneration, if pathophysiology of its formation is considered. The aim of this study was to analyse fundamental questions regarding the traumatic intervertebral vacuum phenomenon and patient-, mechanism of injury-, fracture- and treatment specific factors.

During the retrospective analysis 674 patients, who were treated for a vertebral fracture in the center for musculoskeletal surgery, Campus Virchow-Klinikum, Charité – Universitätsmedizin Berlin, between 01.01.2014 and 31.12.2015, were examined. The following exclusion criteria were applied: pathological or old fracture; sole Subtype-A0-injury; missing initial imaging or other relevant information. Thus, a total of 201 patients with vertebral fractures were admitted to the study. In 68 patients, a vacuum phenomenon in at least one vertebral disc was identified. In 58 cases, vacuum phenomena occurred in the disc of a fractured segment and thus was viewed as traumatic. 42 of these were only seen in the follow-up radiological studies, which were present in 35 percent (n=71) of 201 cases. The remaining non-traumatic vacuum phenomena were registered as degenerative (n=67).

Statistical analysis did not show significant correlations between the initially present traumatic vacuum phenomenon and the mechanism of injury, fracture type or fracture location. However, a correlation was observed between the older age of the patients and higher incidence of both degenerative and traumatic vacuum phenomenon. It seems that a clear distinction between degenerative and traumatic vacuum phenomenon at the time of admission is not possible.

The occurrence of traumatic vacuum phenomenon in follow-up radiological studies, however, was shown to be independent of the patient's age and showed statistical

correlations with fracture type and secondary treatment. It was more likely to occur in patients who suffered a burst fracture and underwent a secondary ventral spondylodesis. The results of this study suggest that the formation of the intervertebral vacuum phenomenon in follow-up exams is promoted by vertebral fractures and is related to fracture treatment.

1. Einleitung

Obwohl Wirbelkörperfrakturen im Vergleich zu Frakturen der langen Röhrenknochen verhältnismäßig selten auftreten, sind ihre Folgen oft gravierend, sowohl für den/die Patienten/-in als auch für das Gesundheitssystem.¹⁻³ Zudem steigt die Inzidenz von Wirbelkörperfrakturen bei schwerverletzten Patienten/-innen entscheidend an.¹⁻⁶ Daher nahm die Wirbelsäule bereits mit den Anfängen der Frakturlehre einen besonderen Stellenwert ein. Die speziellen anatomischen Gegebenheiten und die Pathophysiologie von Verletzungen der Wirbelsäule bedingen eine komplexe Frakturlehre und ausgefeilte Behandlungsstrategien.^{7,8} Angestoßen durch Weiterentwicklungen in Bereichen der diagnostischen Bildgebung und neuen Therapieverfahren, blieb die Wirbelsäule immer im Fokus der muskuloskeletalen Forschung.⁸⁻¹⁴ Trotz bereits etablierter Standards werden Indikationsstellungen und Therapieverfahren weiterhin kontrovers diskutiert.¹⁵⁻¹⁸

Die grundlegenden pathophysiologischen Zusammenhänge sind beim Auftreten von Begleitverletzungen der Wirbelsäule noch immer nicht abschließend geklärt. So bspw. das sogenannte Vakuumphänomen der Bandscheibe, eine Gasansammlung in der Bandscheibe, die zu einer erhöhten Strahlentransparenz im Röntgen bzw. zu einer Hypodensität im Computertomogramm führt. Hier sind die Inzidenz, die Zusammenhänge zum Unfallmechanismus und der Frakturmorphologie sowie die klinische Konsequenz noch nicht ausreichend erforscht. Das Ziel dieser Arbeit ist es diese grundlegenden Fragen in Bezug auf das Vakuumphänomen zu untersuchen.

1.1. Anatomie der thorakolumbalen Wirbelsäule

Die Wirbelsäule, Columna vertebralis, bildet das Achsenskelett. Sie ist das tragende Konstrukt, das Kernstück, welches die restlichen Teile des Skeletts miteinander verbindet. Zu den vielfältigen Aufgaben der Wirbelsäule zählen unter anderem das Tragen des Kopfes, die Dämpfung der axial wirkenden Kräfte und der Schutz des Rückenmarks. Dafür muss die Wirbelsäule möglichst stabil sein und dennoch einen größtmöglichen Bewegungsumfang erlauben. Diesem Spannungsverhältnis wird sie durch ihre charakteristische Anatomie gerecht: Sie besteht in der Regel aus 24 freien knöchernen Wirbeln, Vertebrae, die über 23 Bandscheiben, Disci intervertebrales, ventral miteinander verbunden sind. Darüber hinaus wird die Wirbelsäule durch die

Wirbelbogengelenke, Articulationes zygapophysiales, einen komplexen Bandapparat und die umliegende Muskulatur dorsal stabilisiert.¹⁹

Die Wirbelsäule wird in fünf Abschnitte unterteilt (siehe Abbildung 1). Davon besteht die Halswirbelsäule wiederum aus sieben Wirbeln, die thorakale und lumbale Wirbelsäule aus zwölf respektive fünf Wirbelkörpern. Das Kreuzbein, Os sacrum, wird aus fünf miteinander verschmolzenen Wirbeln und das Steißbein, Os coccygis, aus drei bis fünf rudimentär angelegten und zum Teil miteinander verschmolzenen Wirbeln gebildet.^{19,20}

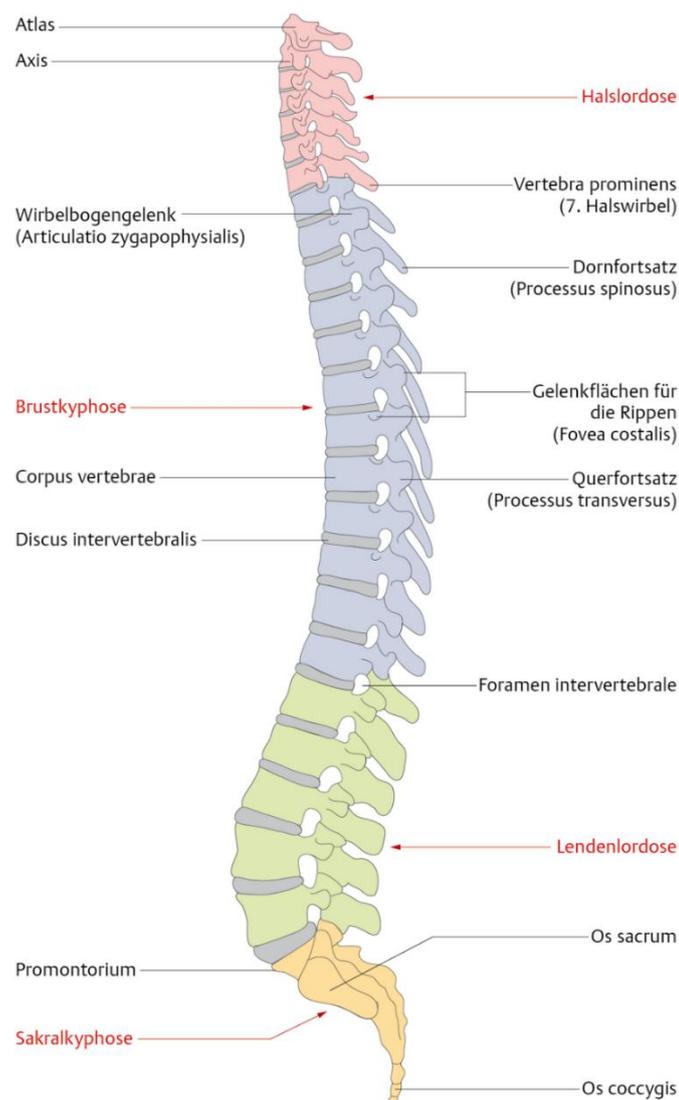


Abbildung 1: Abschnitte und Krümmungen der Wirbelsäule²¹

Die Wirbelsäule wird in verschiedene Abschnitte eingeteilt: die Halswirbelsäule (rot), Brustwirbelsäule (blau), Lendenwirbelsäule (grün) und das Kreuzbein (gelb). Die einzelnen Abschnitte weisen eine physiologische Krümmung auf: Eine Lordose ist in der Hals- und Lendenwirbelsäule, eine Kyphose in der Brustwirbelsäule und im Kreuzbein gegeben.

In sagittaler Ansicht hat die Wirbelsäule eine Doppel-S-Form, die durch vier Krümmungen gekennzeichnet ist. Die Hals- und Lendenlordose stehen der Thorakal- und Sakralkyphose gegenüber.^{19,20}

Weil sich sowohl die Anatomie und die Biomechanik als auch die Frakturlehre des zervikalen und sakralen Abschnitts deutlich von denen des thorakolumbalen Abschnitts der Wirbelsäule unterscheiden, wurde in dieser Arbeit von der Betrachtung der Frakturen der Halswirbelsäule und des Kreuzbeins abgesehen.

Das Rückenmark, Medulla spinalis, ist ein Teil des zentralen Nervensystems. Es innerviert den Rumpf und die Extremitäten über die sogenannten Spinalnerven. Die Anatomie der Wirbelsäule und die des Rückenmarks sind in besonderem Maße aufeinander abgestimmt. Während der Wirbelkanal, Canalis vertebralis, das Rückenmark beherbergt, bilden die Zwischenwirbellöcher, Foramina intervertebralia, die Austrittspunkte für die Spinalnerven.¹⁹ Aufgrund der engen räumlichen Verhältnisse zwischen Wirbelsäule und dem Rückenmark gehen Frakturen der Wirbelsäule mit einer erhöhten Gefahr einer Rückenmarksverletzung einher.^{1,5,6}

Da die Betrachtung des Rückenmarks und des neurologischen Status in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle spielt, wird hier nicht näher auf die Anatomie des Rückenmarks eingegangen.

1.1.1. Wirbelkörper

Grundsätzlich besteht ein Wirbel aus einem Wirbelkörper, Corpus vertebrae, und einem Wirbelbogen, Arcus vertebrae, der den Ursprung der Wirbelbogenfortsätze, Processus arcus vertebrae, bildet (siehe Abbildung 2). Der Wirbelkörper hat eine annähernd zylindrische Form, dessen kraniale und kaudale Flächen, die Facies vertebralis, mit einer hyalinknorpeligen Deck- bzw. Bodenplatte (Endplatten) verschlossen sind. Die Ränder dieser Flächen werden durch die Randleiste, Epiphysis anularis, gebildet. Der Wirbelbogen besteht aus den Pedikeln (selten auch Wirbelbogenfüßchen genannt), Pediculi arcus vertebrae, die dorsal und seitlich dem Wirbelkörper entspringen sowie der Bogenlamina, Lamina arcus vertebrae (selten auch Bogenplatte genannt). Zu den Wirbelbogenfortsätzen, die dem Wirbelbogen entspringen, zählen der Dornfortsatz, Processus spinosus, die paarigen Querfortsätze, Processus transversi, sowie die oberen

und unteren Gelenkfortsätze, *Processus articulares superiores et inferiores*. Letztere bilden die Wirbelbogengelenke, die zu den echten Gelenken gezählt werden. Die Hinterkante des Wirbelkörpers und der Wirbelbogen formen das knöcherne Wirbelloch, *Foramen vertebrale*.^{19,20}

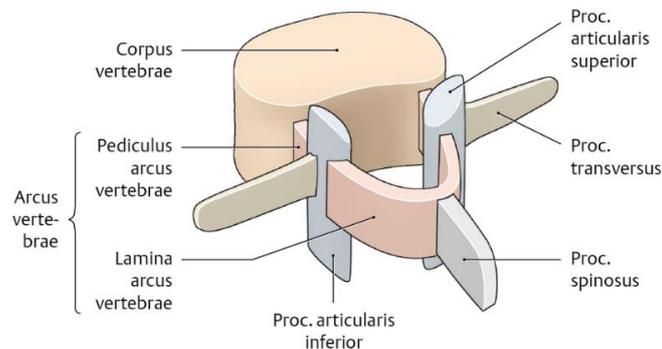


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Wirbels²⁰

Ein Wirbel besteht grundsätzlich aus einem Wirbelkörper, einem Wirbelbogen, zu dem die Pedikel und die Lamina zählen, sowie den Fortsätzen. Neben Dorn- und Querfortsätzen weisen die Wirbelkörper obere und untere Gelenkfortsätze auf.

Je nach Wirbelsäulenabschnitt weicht die Anatomie der Wirbel von der oben beschriebenen Grundform ab. Die Brustwirbel weisen jeweils zusätzliche Gelenkflächen auf, über die sie mit den Rippen artikulieren, die *Fovea costalis superior et inferior* und die *Fovea costalis processus transversi*. Die Gelenkflächen der Wirbelbogengelenke sind zudem annähernd frontal aufgestellt.^{19,20}

Die Lendenwirbel sind die größten Wirbel und entsprechen auch am meisten der oben beschriebenen Grundform eines Wirbels. Wobei die als Querfortsätze imponierenden Fortsätze Rippenrudimente, *Processus costalis*, sind. Der eigentliche Querfortsatz wird als *Processus accessorius* bezeichnet; dieser ist kaum ausgebildet. Die Wirbelbogengelenke sind überwiegend sagittal aufgestellt und die dadurch entstehende Gelenkrückseite wird als *Processus mamillaris* bezeichnet.^{19,20} Von der Beschreibung des Kreuz- und Steißbeins wird an dieser Stelle abgesehen.

1.1.2. Bandscheibe

Die Bandscheibe, Discus intervertebralis, ist eine faserknorpelige Struktur, die zwischen den benachbarten Wirbeln liegt und mit diesen ein unechtes Gelenk, eine Synchronrose, bildet. Sie ist mit den knöchernen Randleisten und den knorpeligen Deckplatten der angrenzenden Wirbel verwachsen. Sie besteht aus einem zentral liegenden Gallertkern, Nucleus pulposus, und einem ihn umgebenden äußeren Faserring, Anulus fibrosus. Der Anulus fibrosus kann in zwei Zonen eingeteilt werden. Die äußere Zone ist eine zugfeste Hülle. Diese wird von konzentrischen Lamellen der Typ-I-Kollagenfasern gebildet, welche überkreuzend die Randleisten der Wirbelkörper miteinander verbinden. Die Typ-II-Kollagenfasern der inneren Zone strahlen in die hyalinknorpeligen Deck- und Bodenplatten ein. Der Nucleus pulposus weist durch seinen hohen Anteil an Glykosaminoglykanen ein hohes Wasserbindungsvermögen auf und besteht somit zu 80 bis 85 Prozent aus Wasser.^{19,20} Der Aufbau der Bandscheibe ist der Abbildung 3 zu entnehmen.

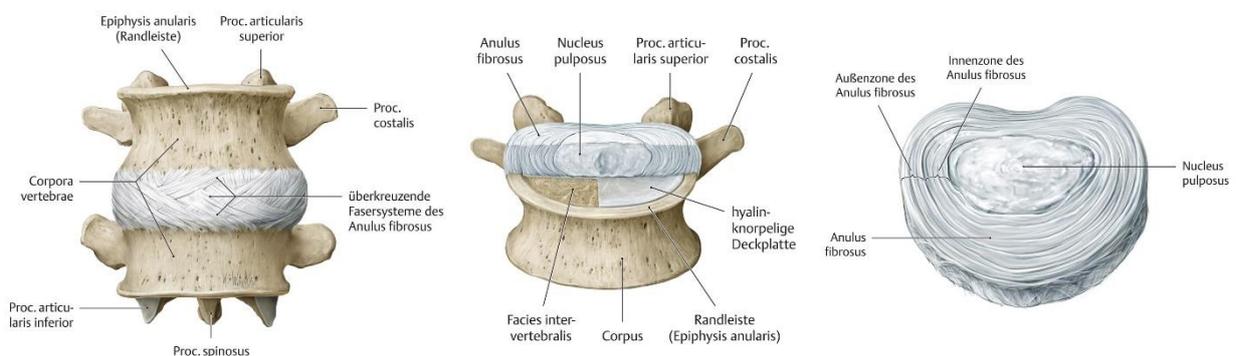


Abbildung 3: Aufbau einer Bandscheibe²⁰

Links: Darstellung zweier Wirbel mit einer dazwischen liegenden Bandscheibe. Die äußere Schicht der Bandscheibe, der Anulus fibrosus, besteht aus sich überkreuzenden Fasern. Mitte: frontaler Anschnitt einer Bandscheibe auf der Deckplatte eines Wirbelkörpers. Zur Darstellung kommt sowohl der Anulus fibrosus als auch der Nucleus pulposus der Bandscheibe. Ebenfalls dargestellt ist die Schnittstelle zwischen der Bandscheibe und dem Wirbelkörper, bestehend aus der hyalinknorpeligen Deckplatte und der Randleiste. Rechts: transversaler Anschnitt der Bandscheibe mit dem mittig liegenden Nucleus pulposus und der ihn umschließenden Innen- und Außenzone des Anulus fibrosus.

1.1.3. Bandapparat der Wirbelsäule

Zum Bandapparat der Wirbelsäule (siehe Abbildung 4) gehört eine Vielzahl an Bändern, die allesamt die Funktion haben, die Wirbelsäule zusätzlich zu stabilisieren. Über die gesamte Wirbelsäule hinweg verlaufen entlang der Vorder- und der Hinterkanten das

vordere bzw. das hintere Längsband, Ligamentum longitudinale anterius bzw. Ligamentum longitudinale posterius. Während das breitere vordere Längsband eine stärkere Verankerung mit dem Wirbelkörper aufweist, ist das schmalere hintere Längsband stärker mit dem Anulus fibrosus der Bandscheiben verbunden. Die Laminae der Wirbelbögen sind durch das segmentale gelbe Band, Ligamentum flavum, miteinander verbunden. Das gelbe Band schließt mit seinen elastischen Fasern größtenteils die Lücken des knöchernen Spinalkanals. Ligamenta interspinalia verbinden die benachbarten Dornfortsätze. Die Fasern der Ligamenta interspinalia verlaufen dabei von der kranialen Oberfläche eines Dornfortsatzes nach kraniodorsal zur Spitze des darüberliegenden Dornfortsatzes und gehen an dieser Stelle in das Ligamentum supraspinale über. Dieses verbindet die Spitzen der Dornfortsätze. Die Enden der Querfortsätze und im lumbalen Abschnitt der Processus accessoriorum werden über die Ligamenta intertransversaria verbunden.²⁰

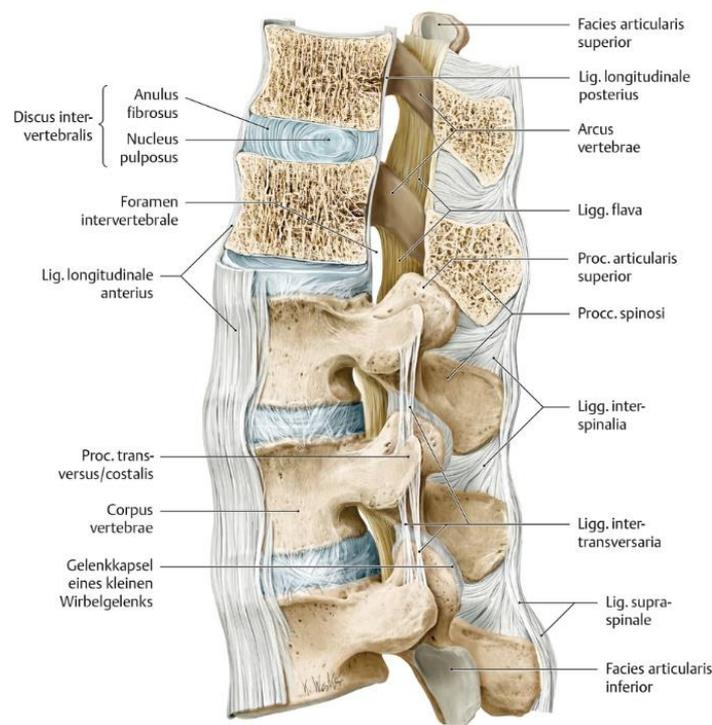


Abbildung 4: Bandapparat der Wirbelsäule²⁰

In der sagittalen Ansicht der Wirbelsäule sind die einzelnen Strukturen des Bandapparats dargestellt. Von ventral nach dorsal zählen hierzu das vordere und hintere Längsband, die intertransversalen Bänder, das gelbe Band, das interspinale sowie das supraspinale Band.

In der Vergangenheit gewann die Rolle des Bandapparats in der Frakturlehre der Wirbelsäule immer mehr an Bedeutung und ist mittlerweile unbestritten, da dieser entscheidend zur Stabilität der Wirbelsäule beiträgt.^{10,12-14,22-24} In diesem Zusammenhang ist häufig vom sogenannten hinteren Bandapparat (PLC für „posterior ligamentous complex“) die Rede. In der Regel werden darunter das Ligamentum flavum, das Ligamentum interspinale und das Ligamentum supraspinale sowie die Kapseln der Facettengelenke zusammengenommen verstanden.¹²

1.2. Biomechanik der thorakolumbalen Wirbelsäule

Durch die spezielle Anatomie der Wirbelsäule kann sie vielfältige Aufgaben erfüllen. Das statische und dynamische Wechselspiel resultiert in komplexen biomechanischen Abläufen. Diese sind sowohl bei der Frakturstehung als auch bei Diagnostik und Therapie von entscheidender Bedeutung, was im Folgenden dargelegt wird.

1.2.1. Grundform der Wirbelsäule

Die Grundform der Wirbelsäule (siehe Abbildung 1) entspricht der einer gekrümmten Säule. Dies ermöglicht eine höhere Belastbarkeit im Vergleich zu einer geraden Säule, da physikalisch betrachtet die Belastbarkeit einer gekrümmten Säule proportional zum Quadrat der Krümmungszahl plus eins zunimmt.²⁵ Durch die Auslenkung einzelner Wirbel wird so ein großer Teil der axial auf die Wirbelsäule wirkenden Kraft von benachbarten Strukturen, vor allem den Bändern und der Muskulatur, aufgefangen.²⁶

Trotz der hohen Belastungsfähigkeit hat die Wirbelsäule einen beachtlichen Bewegungsumfang. Im thorakolumbalen Abschnitt sind ca. 40 Grad Rotation, 40 Grad Lateralflexion, 85 Grad Ventralflexion und 60 Grad Dorsalextension möglich.²⁰

1.2.2. Bewegungssegment der Wirbelsäule

Ein besseres Verständnis der Biomechanik der Wirbelsäule lässt sich durch den Blick auf die kleinste funktionelle Einheit der Wirbelsäule, das Bewegungssegment (siehe Abbildung 5), gewinnen. Dieses besteht aus zwei benachbarten Wirbeln bzw.

Wirbelhälften, der dazwischen liegenden Bandscheibe und den umgebenden intersegmentalen Bändern und Muskeln.²⁷

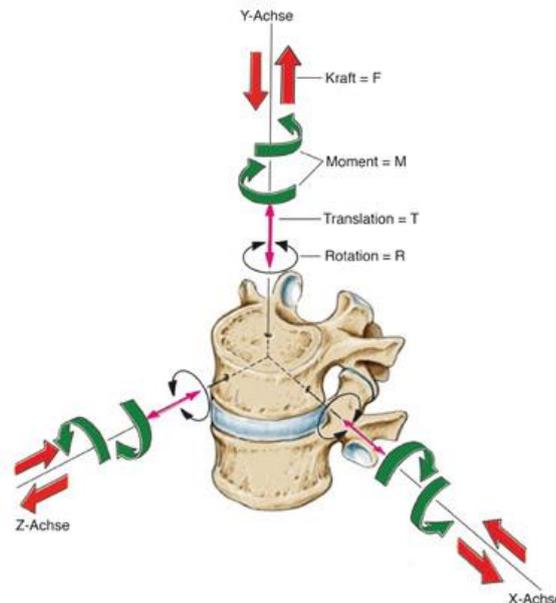


Abbildung 5: Bewegungssegment der Wirbelsäule mit Kraft- und Bewegungsrichtungen²⁶

Ein Wirbelsäulensegment besteht aus zwei benachbarten Wirbeln und der dazwischen liegenden Bandscheibe. Wird ein Bewegungssegment in einem dreidimensionalen Raum mit einer X-, Y- und Z-Achse betrachtet, so sind Bewegungen entlang bzw. um diese Achsen in Form einer Translation bzw. Rotation möglich. Diese Bewegungen werden je nach Richtung der wirkenden Kräfte bzw. Momente ausgelöst.

Die Lastübertragung in einem Bewegungssegment erfolgt größtenteils über die Deck- bzw. Bodenplatten der Wirbelkörper und die dazwischen liegende Bandscheibe sowie die beiden Wirbelbogengelenke. Der Wirbelkörper trägt den Großteil der axial auf die Wirbelsäule wirkenden Kraft. Die vertikal verlaufenden Drucktrabekel und die horizontal verlaufenden Zugtrabekel der Substantia spongiosa sind Ausdruck davon. Um der höheren Belastung der kaudalen Wirbelsäulenabschnitte gerecht zu werden, nimmt die Größe und die Masse der Wirbel nach kaudal hin zu. Die Wirbelbogengelenke und -fortsätze übernehmen zusätzlich je nach Stellung bis zu 33 Prozent der axialen Last.^{19,20}

Die Verbindung zwischen zwei benachbarten Wirbelkörpern entspricht einer Synchronose, also einem unechten Gelenk. Das Kernstück dieser Verbindung bildet die Bandscheibe, deren Aufbau und Funktion entscheidend zur Stabilität der Verbindung beitragen. Der nicht komprimierbare Nucleus pulposus, der vom Anulus fibrosus begrenzt wird, ist in der Lage hohen Druck aufzunehmen. Unter axialer Belastung wird so der

Druck zwischen den Wirbelkörperplatten und im Anulus fibrosus selbst gleichmäßig verteilt (siehe Abbildung 6). Bei Auslenkung im Bewegungssegment wird der Nucleus in die entgegengesetzte Richtung verdrängt und sorgt hierdurch ebenfalls für gleichmäßige Druckverteilung. Der Anulus wird in diesem Fall jedoch asymmetrisch belastet und trägt zur Begrenzung der Bewegung bei. Zusätzlich begrenzen Bänder und Muskeln, je nach deren Verlauf, die entsprechenden Bewegungen und unterstützen die Gegenbewegungen.^{19,20}

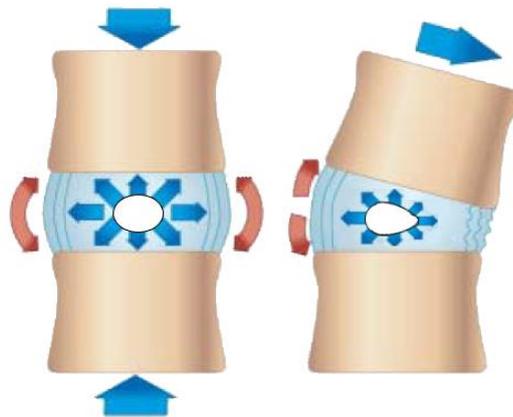


Abbildung 6: Funktion der Bandscheibe, modifiziert nach Aumüller (2010)¹⁹

Links: Bei Kompression des Bewegungssegments baut der Nucleus pulposus einen hohen Quellungsdruck auf und verteilt die Kraft gleichmäßig auf die Endplatten und den Anulus fibrosus. Rechts: Bei Flexion weicht der Nucleus pulposus zu Gegenseite aus und bewirkt dadurch ebenfalls eine gleichmäßige Druckverteilung zwischen den Endplatten. Der Anulus wird dabei einseitig gedehnt.

Der Bewegungsumfang und die Bewegungsrichtung eines Segments werden maßgeblich durch die Stellung der Wirbelbogengelenke und die Straffheit ihrer Gelenkkapseln bestimmt. Diese variieren je nach Wirbelsäulenabschnitt stark und schränken bspw. die Rotation der Lendenwirbel durch eine annähernd sagittale Stellung erheblich ein.^{19,20,26}

Die Bewegungssegmente der Wirbelsäule verhalten sich nicht wie reine Scharniergelenke. Der anatomische Aufbau bietet keinen fixen Drehpunkt. Bei näherer Betrachtung der Bewegungsfreiheitsgrade eines Segments kann jedoch festgestellt werden, dass alle sechs der im dreidimensionalen Raum möglichen Freiheitsgrade gegeben sind (siehe Abbildung 5). Die Rotationsbewegungen um die Sagittal-, Transversal- und Longitudinalachse gehen mit Translationsbewegungen entlang dieser Achsen einher. In einem solchen Fall kann die Drehachse einer Rotationsbewegung

immer nur momentan für eine Position bestimmt werden. Dieser Raumpunkt wird als Momentanpol bezeichnet. Betrachtet man eine Rotationsbewegung, so wandert der Momentanpol je nach Bewegungsrichtung entlang einer entsprechenden Kurve (siehe Abbildung 7).^{26,28}

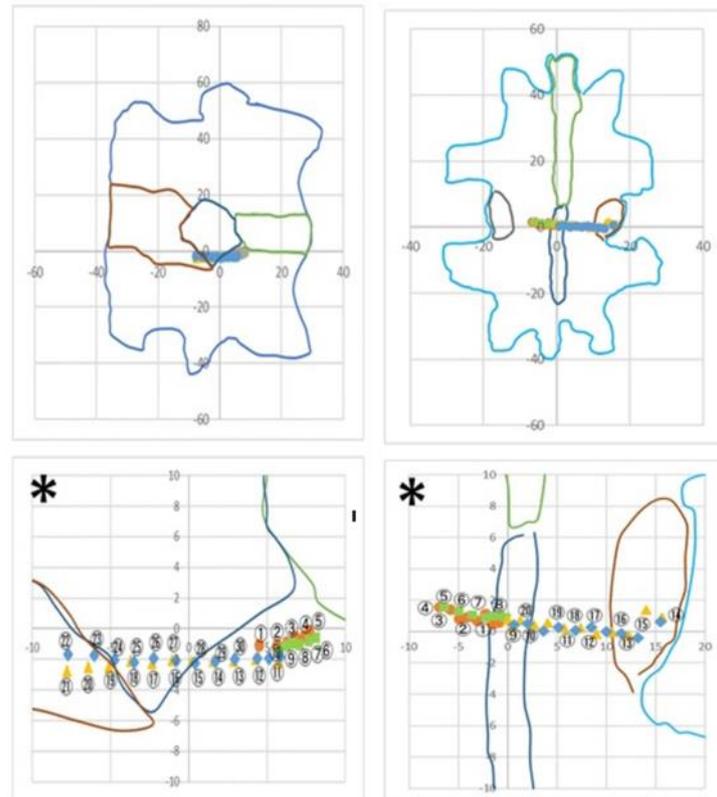


Abbildung 7: Wandernde Momentanpole der ventro-dorsalen und lateralen Flexion²⁸

Die Rotationsbewegungen im Bewegungssegment der Wirbelsäule haben keine fixen Achsen bzw. keine fixen Momentanpole. Die Momentanpole wandern je nach Auslenkung. Links: Momentanpole der ventro-dorsalen Flexion. Rechts: Momentanpole der Lateralflexion. Untere Reihe: vergrößerte Darstellung im Vergleich zur oberen Reihe.

1.2.3. Auf das Bewegungssegment einwirkende Kräfte

Auf die Wirbelsäule wirken eine Vielzahl von Kräften ein. Bereits in Ruhe ist sie der Gewichtskraft der Körpereigenmasse ausgesetzt. Bei physischer Aktivität oder Traumata kommen weitere Kräfte hinzu, sei es eine zusätzliche Gewichtskraft, die durch das Heben von Lasten entsteht, oder Beschleunigungskräfte, die durch einen Aufprall zustande kommen. Unabhängig von der Anzahl und der Richtung der einwirkenden Kräfte gilt das dritte Newton'sche Gesetz. Demnach ist es eine Voraussetzung für die Integrität der Wirbelsäule, dass jeder Kraft eine gleich große Kraft entgegenwirkt. Verletzungen

entstehen somit, wenn die Kapazität der anatomischen Strukturen, eine Gegenkraft zu entwickeln, überschritten wird. Diese Gegenkräfte werden durch die muskulären, ligamentären und nicht zuletzt ossären Strukturen entwickelt. Zwei wichtige Faktoren, die im Hinblick auf die unterschiedlichen Kräfte und deren Gleichgewichte berücksichtigt werden müssen, werden im Folgenden vorgestellt.

Kräfte, die eine Drehwirkung auf ein rotierendes System ausüben, werden als Drehmomente bezeichnet. Dabei lässt sich das Drehmoment durch die Multiplikation der Hebellänge mit der senkrecht auf diesen Hebel wirkenden Kraft berechnen. Wie bereits beschrieben, kann ein Bewegungssegment als ein rotierendes System mit einem wandernden Momentanpol betrachtet werden. Die auf dieses System wirkenden Kräfte sind in Abbildung 8 dargestellt.

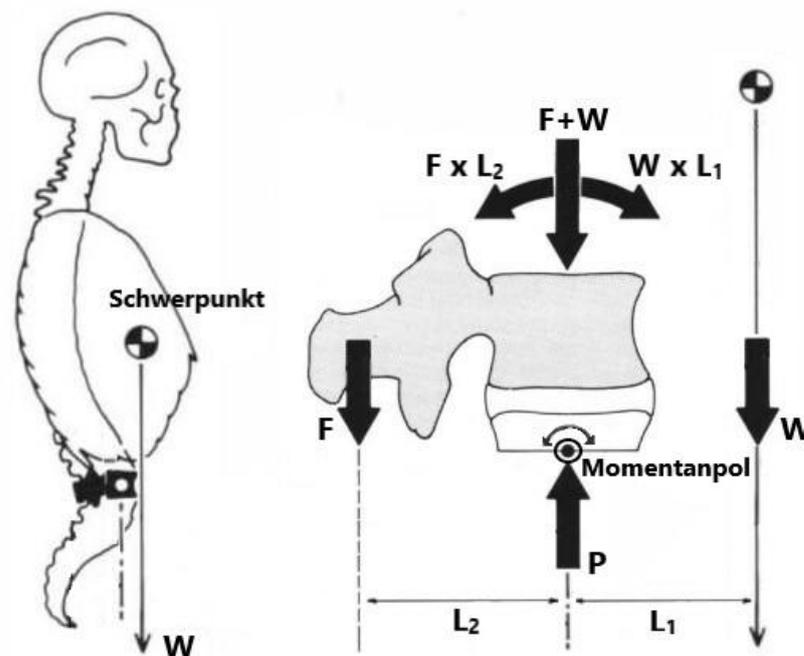


Abbildung 8: Auf ein Bewegungssegment wirkende Drehmomente, modifiziert nach White und Panjabi (1990)²⁶

Die Gewichtskraft W , vom Schwerpunkt ausgehend, wirkt auf den Momentanpol mit einem Hebel der Länge L_1 ein und resultiert in einem Drehmoment $W \times L_1$. Zudem wirkt die entgegenwirkende Muskelkraft F mit einem Hebel der Länge L_2 ein und resultiert in einem Drehmoment $F \times L_2$. Die gesamte axiale Belastung auf das Bewegungssegment ist $F + W$. Dieser Belastung wirkt die Kraft P (Widerstandskraft) entgegen.

Im Stehen verläuft das Lot des Oberkörperschwerpunktes und somit der Gewichtskraft W in der Regel ventral der Momentanpole der Wirbelsäulensegmente. Die Muskeln und Bänder, die die Gegenkraft F ausüben, setzen dagegen dorsal der Momentanpole an. Die horizontalen Abstände dieser Kräfte zum Momentanpol L_1 und L_2 bilden die jeweiligen Hebel. Auf das Bewegungssegment wirken somit einerseits ein Drehmoment $W \times L_1$ und andererseits ein Drehmoment $F \times L_2$ ein. Beide müssen gleich groß sein, damit das System im Gleichgewicht bleibt. Während der Hebel L_2 der Gegenkraft F weitestgehend konstant bleibt, kann der Hebel L_1 der Gewichtskraft W je nach Wirbelsäulenabschnitt und Körperhaltung stark variieren. In einer Vorbeugung resultiert die gleiche Gewichtskraft W durch einen längeren Hebel L_1 in einem deutlich höheren Drehmoment, der nur durch Steigerung der Gegenkraft F kompensiert werden kann, da der Hebel L_2 konstant bleibt. Sind die Drehmomente ausgeglichen, entspricht die gesamte axiale Belastung des Systems der Summe der Kräfte F und W . Ihr entgegengesetzt ist die Kraft P , die durch die Belastungsfähigkeit des Bewegungssegments bestimmt wird. Gerät das System aus dem Gleichgewicht, weil die maximal aufbringbare Gegenkraft F nicht ausreicht oder weil die notwendige Kraft P die Belastungsfähigkeit des Bewegungssegment übersteigt, resultiert dies in einer Verletzung.²⁶

Bereits bei der Betrachtung der Wirbelsäule in der Neutralstellung fällt auf, dass nicht alle Wirbelkörper waagrecht aufgestellt sind (siehe Abbildung 1). Führt die Wirbelsäule eine Bewegung aus, wird die Kippung der Wirbelkörper noch deutlicher. Folglich trifft die axial wirkende Kraft, bspw. die Gewichtskraft, die Kraft aufnehmende Fläche des Wirbelkörpers nicht mehr senkrecht. Ein solcher Umstand muss ebenfalls berücksichtigt werden. Das wird in Abbildung 9 dargestellt.

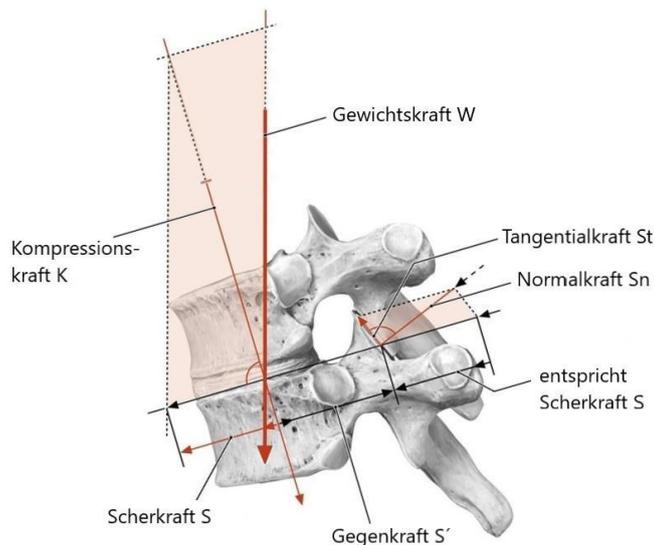


Abbildung 9: Aufteilung der wirkenden Kräfte bei einem nicht waagerechten Wirbelkörper, modifiziert nach Schünke (2014)²⁵

Die Gewichtskraft W lässt sich in die senkrecht auf den Wirbelkörper wirkende Kompressionskraft K und die parallel zu diesem wirkende Scherkraft S aufteilen. Daneben kann die entgegenwirkende Gegenkraft S' in die parallel zur Gelenkfläche der Wirbelbogengelenke wirkende Tangentialkraft St und die senkrecht zu diesen wirkende Normalkraft Sn aufgeteilt werden.

Unter Anwendung der Vektorlehre lässt sich in einem solchen Fall die Gewichtskraft W in zwei Komponenten aufteilen: eine senkrecht auf den Wirbelkörper und die Bandscheibe wirkende Kompressionskraft K sowie eine parallel wirkende Scherkraft S . Die Aufteilung zwischen den beiden Kraftkomponenten hängt vom Grad der Kippung ab (bei 45-Grad-Kippung ist $K = S$). Wie bereits oben dargestellt, muss jeder Kraft eine gleich große Gegenkraft entgegengesetzt sein, um das System im Gleichgewicht zu halten. So wird der Kompressionskraft K die Belastungsfähigkeit der Bandscheibe und des Wirbelkörpers entgegengesetzt (die Gegenkraft K'). Der Scherkraft S wirken die Bandscheibe, die Bänder und vor allem die Wirbelbogengelenke entgegen (Gegenkraft S'). Da die Scherkraft S nicht senkrecht zur Gelenkfläche der Wirbelbogengelenke gerichtet ist, kann diese ebenfalls in zwei Komponenten aufgeteilt werden: die Normalkraft Sn ist senkrecht und die Tangentialkraft St ist parallel zur Gelenkfläche gerichtet. Die entsprechenden Gegenkräfte werden durch die Gelenkfläche selbst, den Bandapparat und die Muskulatur getragen.^{25,26,29}

Die spinale Biomechanik und der Einfluss verschiedener Mechanismen der Wirbelsäulenverletzungen resultieren in einer komplexen Frakturlehre. Die wichtigsten

Aspekte wie die Klassifikation der Unfallmechanismen, die diagnostischen Modalitäten und die Frakturklassifikationen werden im Folgenden dargelegt.

1.3. Traumatische Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule

1.3.1. Klassifikation des Unfallmechanismus

Sowohl die Schwere als auch der Mechanismus eines Unfalls haben einen Einfluss auf die auftretenden Verletzungen.³⁰ So konnten bspw. lebensbedrohliche Verletzungen bei 9,4 Prozent der aus mehr als 6 Metern gestürzten Patienten/-innen beobachtet werden.³¹ Ebenfalls wurde gezeigt, dass bis zu 11,4 Prozent der gestürzten Patienten/-innen eine Wirbelkörperfraktur des thorakolumbalen Übergangs aufwies.³² Die Beurteilung der Schwere eines Unfalls ist bei der Akutversorgung der Patienten/-innen besonders wichtig und deswegen fest in Triage-Protokollen verankert. Bei diesen gilt es, die sogenannten Hochrasanztraumata zu identifizieren und die Versorgung entsprechend zu eskalieren. In Deutschland soll demnach das Traumamanagement nach einem Polytraumaprotokoll erfolgen, wenn der Unfallmechanismus eines der folgenden Kriterien erfüllt³³:

- Sturz aus über 3 Metern Höhe
- Verkehrsunfall mit
 - Frontalaufprall mit Intrusion von mehr als 50–75 cm
 - einer Geschwindigkeitsveränderung von $\Delta > 30$ km/h
 - Fußgänger- /Zweiradkollision
 - Tod eines/r Insassen/-in
 - Ejektion eines/r Insassen/-in
- Crush-Trauma (Überrolltrauma)

International finden sich ähnliche Kriterien, die sich meist nur in den Grenzwerten für Geschwindigkeit oder Fallhöhe unterscheiden. So gelten bspw. ca. 4,5 oder 6 Meter (15 bzw. 20 ft) als Grenzwerte für die Fallhöhe oder ca. 30 km/h (20 mph) als Zusatzkriterium bei Zweiradunfällen.^{34,35}

Bei der Betrachtung von Wirbelsäulenfrakturen erscheint es ebenfalls sinnvoll, den Unfallmechanismus zu berücksichtigen. So wurden bereits Zusammenhänge zwischen

Unfallmechanismus und Frakturhäufigkeit, -lokalisierung und -morphologie gezeigt.^{1-6,16,31,36,37} Dabei wurden Unfälle sowohl nach Rasanz als auch nach Unfallursache in folgende Gruppen eingeteilt¹⁶:

- Sturz aus dem Stand
- Sturz aus der Höhe
- Sprung in suizidaler Absicht
- Verkehrsunfall
- Anpralltrauma

1.3.2. Diagnostische Modalitäten

Eine Anamneseerhebung und eine körperliche Untersuchung sind in der Diagnostik von Wirbelsäulenfrakturen unverzichtbar. Eine positive Schmerzanamnese, neurologische Defizite, Bewusstlosigkeit oder ein Polytrauma können den ersten Verdacht auf das Vorliegen einer Wirbelsäulenfraktur hervorbringen. Der Verdacht wird in der Regel durch bildgebende Verfahren abgeklärt. Nachdem der Fokus der vorliegenden Arbeit auf die Auswertung radiologischer Daten gerichtet ist, wurde auf die Beachtung der klinischen Angaben verzichtet. Eine Reihe von bildgebenden Verfahren kommt für die Diagnostik einer Wirbelkörperfraktur infrage. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

1.3.2.1. Konventionelles Röntgen

Konventionelles Röntgen ist ein ubiquitär verfügbares Bildgebungsverfahren mit relativ geringer Strahlenbelastung. In der Seitenaufnahme können Frakturlinien und Dislokationen im Bereich der Dornfortsätze und der Facettengelenke, die Vorder- und Hinterwand sowie die Grund- und Deckplatte der Wirbelkörper relativ gut beurteilt werden. Ebenfalls können indirekte Zeichen wie die Höhenminderung der Wirbelkörper oder Störungen im Verlauf der Hilfslinien (spinolaminäre Linie, vordere und hintere Wirbelkörperlinie) Hinweise auf Frakturen liefern. In der Frontalaufnahme (Strahlengang von anterior nach posterior) können die Ausrichtung der Dornfortsätze, die Grund- und Deckplatte sowie die Pedikel beurteilt werden.³⁸⁻⁴¹

Studien zeigten jedoch, dass die Sensitivität der Röntgenaufnahmen bei der Erkennung von Wirbelkörperfrakturen stark variiert. Sie reichte von 33 bis 93 Prozent, während die Spezifität Werte von 80 bis 97 Prozent erreichte.^{42–48} Daher kommt das konventionelle Röntgen lediglich bei leichten traumatischen Wirbelsäulenverletzungen als Screening-Methode zum Einsatz. Grund dafür ist, dass die Erkennung von instabilen Frakturen bei der Befundung von Röntgenbildern relativ unzuverlässig ist.^{43,44} Ein Verdacht auf eine instabile Fraktur fordert somit in der Regel eine computertomographische Untersuchung.

1.3.2.2. Computertomographie

Die Computertomographie (CT) revolutionierte die bildgebende Diagnostik. Sie macht eine detaillierte Beurteilung der Frakturmorphologie einerseits durch die schichtweise Betrachtung der gewohnten Sagittal- und Frontalebene und andererseits durch die zusätzliche Rekonstruktion der Transversalebene möglich. Durch die Weiterentwicklungen dieses Verfahrens zum Multidetektor- oder Spiral-CT konnte zudem die Bildqualität deutlich verbessert und die Untersuchungsdauer drastisch reduziert werden.^{38,49}

Studien zeigten, dass die CT eine Sensitivität von über 95 Prozent bei der Diagnostik von Wirbelkörperfrakturen aufweist.^{23,42,45–48} Die Spezifität beträgt dabei mehr als 93 Prozent.^{46,48} Bei einer Reihe von Studien dienten die CT-Befunde bereits als Referenz.^{43,44} Zudem ist gezeigt worden, dass die CT sowohl eine bessere Interobserver-Variabilität als auch eine höhere Genauigkeit der Diagnose im Vergleich zum Röntgen erreichte.^{43,44} Somit stellt die CT den Goldstandard in der Diagnostik knöcherner Verletzungen der Wirbelsäule dar. So kommt eine CT entweder als primäre diagnostische Maßnahme bei Verdacht auf eine schwere Wirbelsäulenverletzung zum Einsatz oder folgt einer konventionellen Röntgenaufnahme zur Präzisierung der Diagnose.⁴⁹

Trotzdem weist das CT einige Nachteile auf. Einerseits verursacht es eine vergleichsweise hohe Strahlenbelastung, andererseits ist die Beurteilung der Weichteile, wie bspw. des PLC, mittels CT nur eingeschränkt möglich.

1.3.2.3. Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist grundsätzlich besser zur Beurteilung von Weichteilen geeignet, da bei der Bildgenerierung der Wassergehalt des Gewebes zum Tragen kommt. Daher wird die MRT im Kontext von Wirbelsäulenverletzungen vor allem zur Beurteilung von Rückenmarks-, Bandscheiben-, Muskel- und Ligamentverletzungen eingesetzt.³⁸

Das Magnetresonanztomogramm kann besonders gut zur Beurteilung einer Bandscheibenverletzung herangezogen werden. Zudem ist die Visualisierung eines Knochenmarksödems möglich. Insgesamt wird die MRT jedoch aufgrund von limitierenden Faktoren wie der oft mangelnden Verfügbarkeit, der langen Untersuchungsdauer sowie wegen der hohen Kosten nur selektiv durchgeführt.^{38,50} Zur Beurteilung von knöchernen Verletzungen wird die MRT in der Regel nur bei Kindern oder Schwangeren durchgeführt, um die Strahlenexposition durch das CT zu vermeiden.

1.3.3. Klassifikation der thorakolumbalen Frakturen

Eine Frakturklassifikation spiegelt in der Regel den aktuellen Stand der Forschung wider und dient als klinische Anleitung für die Versorgung von Frakturen. Neue Erkenntnisse zum Verständnis der Biomechanik, der Pathomechanismen sowie neue diagnostische und therapeutische Verfahren haben stets zur Weiterentwicklung der Klassifikationen geführt.^{8-11,13,14,23,24} Im folgenden Abschnitt werden die aktuell relevante Klassifikation der thorakolumbalen Frakturen sowie ein Überblick über die wichtigsten Meilensteine der Entwicklung dieser Kategorisierung vorgestellt.

1.3.3.1. Überblick über die Geschichte der Klassifikation der thorakolumbalen Frakturen

Bereits 1929 hat Böhler die Frakturen der Wirbelsäule anhand der anatomischen Präsentation und der verursachenden Krafteinwirkung in fünf Kategorien eingeteilt: Kompressions-, Anteflexions-, Extensions-, Scher- und Rotationsverletzungen. Diese hat er mit entsprechenden Verletzungen der vorderen oder hinteren Anteile der Wirbelsäulensegmente beschrieben.⁸

Wenig später, im Jahr 1938, beschrieb Watson-Jones das Konzept der Frakturinstabilität und dessen Bedeutung für die Versorgung. Die Rolle des hinteren Bandapparats der Wirbelsäule für die Stabilität der Fraktur rückte damit in den Vordergrund. Unterschieden wurden sieben Frakturtypen, die in drei Kategorien eingeteilt wurden. Diese Kategorien sind: einfache Keilfraktur, Splitterfraktur und Dislokationsfraktur.²⁴

Nicoll (1949) betonte nachfolgend die Bedeutung der Bandscheibe, der Facettengelenke und des interspinalen Ligaments bei der Betrachtung von Wirbelsäulenverletzungen. Seine Einteilung der Frakturen basierte auf vier Kategorien. Erstmals wurde hier zwischen einer anterioren und einer lateralen Keilfraktur unterschieden. Daneben wurden eine Fraktur des Wirbelbogens und eine Dislokationsfraktur, die sich durch die Ruptur des interspinalen Ligaments und Dislokation von Wirbelbogengelenken kennzeichnet, beschrieben.⁹

Das Säulenkonzept wurde zum ersten Mal von Holdsworth (1970) dargelegt. Er hat zwischen zwei Säulen unterschieden (siehe Abbildung 10): Zu der vorderen Säule gehören der Wirbelkörper und die Bandscheibe, zu der hinteren Säule der Wirbelbogen und der PLC. Besonders hervorgehoben wurde dabei die Bedeutung des PLC für die Stabilität der Wirbelsäule. Die bereits etablierten Frakturtypen (anteriore Kompressions- sowie die Dislokations-, Rotations-, Extensions- und Scherfraktur) wurden um das Konzept einer Berstungsfraktur erweitert, die bei intakter hinterer Säule grundsätzlich als stabil zu werten ist.¹¹

Im Jahr 1983 erweiterte Denis das Zwei-Säulen-Modell um die mittlere Säule (siehe Abbildung 10). Definitionsgemäß zählen hier die Hinterwand des Wirbelkörpers, die hinteren Anteile des Annulus fibrosus und das hintere Längsband zur mittleren Säule. Dementsprechend bilden die vorderen Anteile des Wirbelkörpers und des Anulus fibrosus sowie das vordere Längsband die vordere Säule. Die Strukturen der hinteren Säule bleiben im Vergleich zum Modell von Holdsworth unverändert, die stabilitätstragende Rolle wird jedoch der mittleren Säule zugeschrieben.¹⁰

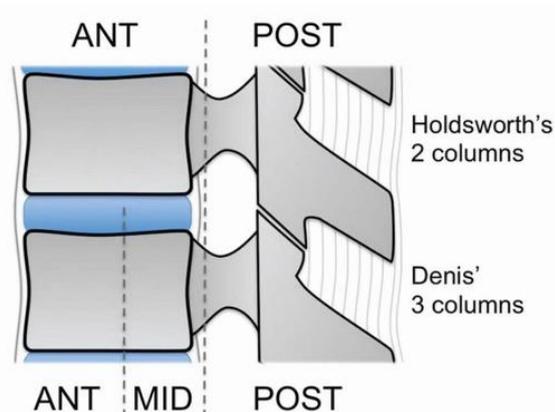


Abbildung 10: Das Zwei- bzw. Drei-Säulen Modell.⁵¹

Oben: Die schematische Darstellung des Zwei-Säulen-Modells nach Holdsworth. In der sagittalen Ansicht werden die Wirbelsäulenstrukturen in die vordere und die hintere Säule eingeteilt. Dabei bildet das hintere Längsband die Grenze. Unten: Die schematische Darstellung des Drei-Säulen-Modells nach Denis. Dieses erweitert das Zwei-Säulen-Modell um die mittlere Säule, zu der definitionsgemäß die Hinterwand des Wirbelkörpers, die hinteren Anteile des Annulus fibrosus und das hintere Längsband zählen.

Insgesamt konnte Denis über zwanzig Frakturtypen identifizieren, die in vier Kategorien eingeteilt wurden: die Kompressionsfraktur (infolge des Versagens der vorderen Säule), die Berstungsfraktur (als Resultat des Versagens der vorderen und mittleren Säule), die „seat belt“-Fraktur (infolge einer Flexions-/Distractionsverletzung mit Versagen der mittleren und hinteren Säule) sowie die Dislokationsfraktur mit Versagen aller drei Säulen.¹⁰ Die Tabelle 1 bietet eine Übersicht der vier Frakturkategorien und der zu erwartenden Verletzung der entsprechenden Säulen.

Tabelle 1: Die Übersicht der Frakturkategorien mit entsprechender Säulenverletzung, adaptiert nach Denis (1983)¹⁰

Kategorie nach Denis	Vordere Säule	Mittlere Säule	Hintere Säule
Kompressionsfraktur	Kompression	keine	selten Distraction
Berstungsfraktur	Kompression	Kompression	keine
„Seat belt“-Fraktur	keine oder Kompression	Distraction	Distraction
Dislokationsfraktur	Kompression, Rotation und Scherung	Distraction, Rotation und Scherung	Distraction, Rotation und Scherung

Die unterschiedlichen Frakturkategorien nach Denis werden nach entsprechenden Verletzungsmechanismen der drei Säulen eingeteilt.

Darüber hinaus teilte Denis die Instabilität in drei Grade ein, wobei der Beurteilung des neurologischen Status erstmals eine größere Bedeutung beigemessen wurde. Der erste Grad (die rein mechanische Instabilität) ist durch eine Reststabilität in der mittleren oder vorderen Säule gekennzeichnet, welche neurologische Schäden unwahrscheinlich macht. Beim zweiten Grad (der neurologischen Instabilität) besteht bei Berstungsfrakturen ein höheres Risiko, neurologische Symptome im Verlauf zu entwickeln. Der dritte Grad (die mechanisch-neurologische Instabilität) ist gegeben, wenn bereits bei der Vorstellung des/der Patienten/-in in der Klinik sowohl mechanische als auch neurologische Defizite vorhanden sind.¹⁰

Basierend auf dem Drei-Säulen-Modell untersuchten McAfee und Kollegen (1983) weiter das Konzept der Frakturinstabilität – mit dem Ergebnis, dass die mittlere Säule die entscheidende Rolle spielt. In diesem Kontext werden drei Verletzungsmechanismen der mittleren Säule beschrieben: axiale Kompression, axiale Distraction und Translation in transversaler Ebene. Je nach Mitbeteiligung der mittleren Säule wird zwischen stabilen und instabilen Berstungsfrakturen unterschieden. Ebenfalls wird die „seat belt“-Fraktur in die rein ossäre „chance“-Fraktur und die meist instabilere Distractionfraktur mit ligamentärer Beteiligung unterteilt.²³

Mit vermehrtem Einsatz von Pedikelschrauben in der Versorgung von Wirbelkörperfrakturen entstanden neue Herausforderungen. Dabei rückte das Schraubenversagen als neue Komplikation in den Fokus der Forschung. McCormack und Kollegen entwickelten 1994 eine neue Klassifikation, um anhand der Frakturmorphologie das Risiko für das Versagen von Pedikelschrauben vorherzusagen. Dafür wurden der Grad der Zersplitterung und das Ausmaß der sagittalen Deformität sowie die axiale Position der Frakturfragmente zueinander jeweils mit bis zu drei Punkten bewertet. Bei einer Summe von sieben Punkten und mehr sollte demnach von einem Versagen der Pedikelschrauben ausgegangen werden und eine zusätzliche vordere Stabilisierung erfolgen.⁵²

Am Vorbild der AO-Klassifikationen (AO: Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen) entwickelten Magerl und Kollegen, ebenfalls 1994, die bis dahin umfangreichste Klassifikation der Wirbelkörperfrakturen, die sogenannte AO-Magerl-Klassifikation. Die Bedeutung des Drei-Säulen-Modells von Denis ist dem Zwei-Säulen-Modell gewichen und die Frakturmorphologie rückte wieder in den Fokus. Die Integrität der hinteren Säule,

speziell des PLC, wurde als Indikator für die Stabilität bestimmt. Zudem wurden drei Frakturtypen in Abhängigkeit von der einwirkenden Krafrichtung unterschieden: Typ A (eine Kompressionsverletzung), Typ B (eine Distraktionsverletzung) und Typ C (eine Rotationsverletzung). Je nach Schwere und Morphologie wurden diese in jeweils drei Gruppen und weitere Subgruppen (A1.1., A1.2, ..., B3.3 etc.) unterteilt. Des Weiteren wurden bis zu sieben Zusatzspezifikationen identifiziert. So wurden insgesamt 55 unterschiedliche Frakturkategorien (exklusive möglicher Kombinationen der B- und A-Verletzung) bestimmt. Der neurologische Status hingegen hat keine direkte Beachtung in der Klassifikation gefunden.¹³

Mit dem TLISS (Thoracolumbar Injury Severity Score) versuchten Vaccaro und Kollegen 2005 ein System mit mehr klinischer Relevanz zu entwickeln. Betrachtet wurden hier Frakturmorphologie, die Integrität des hinteren Bandapparats und der neurologische Status. Die Bewertung der Morphologie und des Verletzungsmechanismus wurde anhand der AO-Magerl-Klassifikation durchgeführt und trug mit bis zu vier Punkten zum Gesamtscore bei. Der neurologische Status wurde anhand von fünf Kriterien mit bis zu drei Punkten bewertet. Die Beurteilung des PLC ergab maximal drei Punkte. Eine Gesamtpunktzahl von vier galt als Grenzwert für eine Empfehlung zur operativen vs. konservativen Therapie.¹²

1.3.3.2. AOSpine-Klassifikation

Mit dem Ziel, die AO-Klassifikation der Wirbelsäulenfrakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule verlässlicher und klinisch relevanter zu machen, wurde diese von Reinhold und Kollegen (2013) sowie Vaccaro und Kollegen (2013) zur AOSpine-Klassifikation weiterentwickelt. Dabei wurden zusätzlich die Beurteilung des neurologischen Status und zusätzliche Modifikatoren eingeführt. Der neurologische Status wird dabei je nach Schwere der Beeinträchtigung in sechs Kategorien eingeteilt. Zu den zusätzlichen Modifikatoren gehören patientenspezifische Komorbiditäten und ein unklarer Status des PLC. Zudem wurde die Beurteilung der Frakturmorphologie weitestgehend vereinfacht. Ähnlich zur AO-Magerl-Klassifikation wurden die Verletzungen in drei Typen eingeteilt: A-, B- und C-Typ. Die Unterkategorisierung beschränkt sich jedoch nur auf den Subtyp (siehe Abbildung 11).^{14,53}

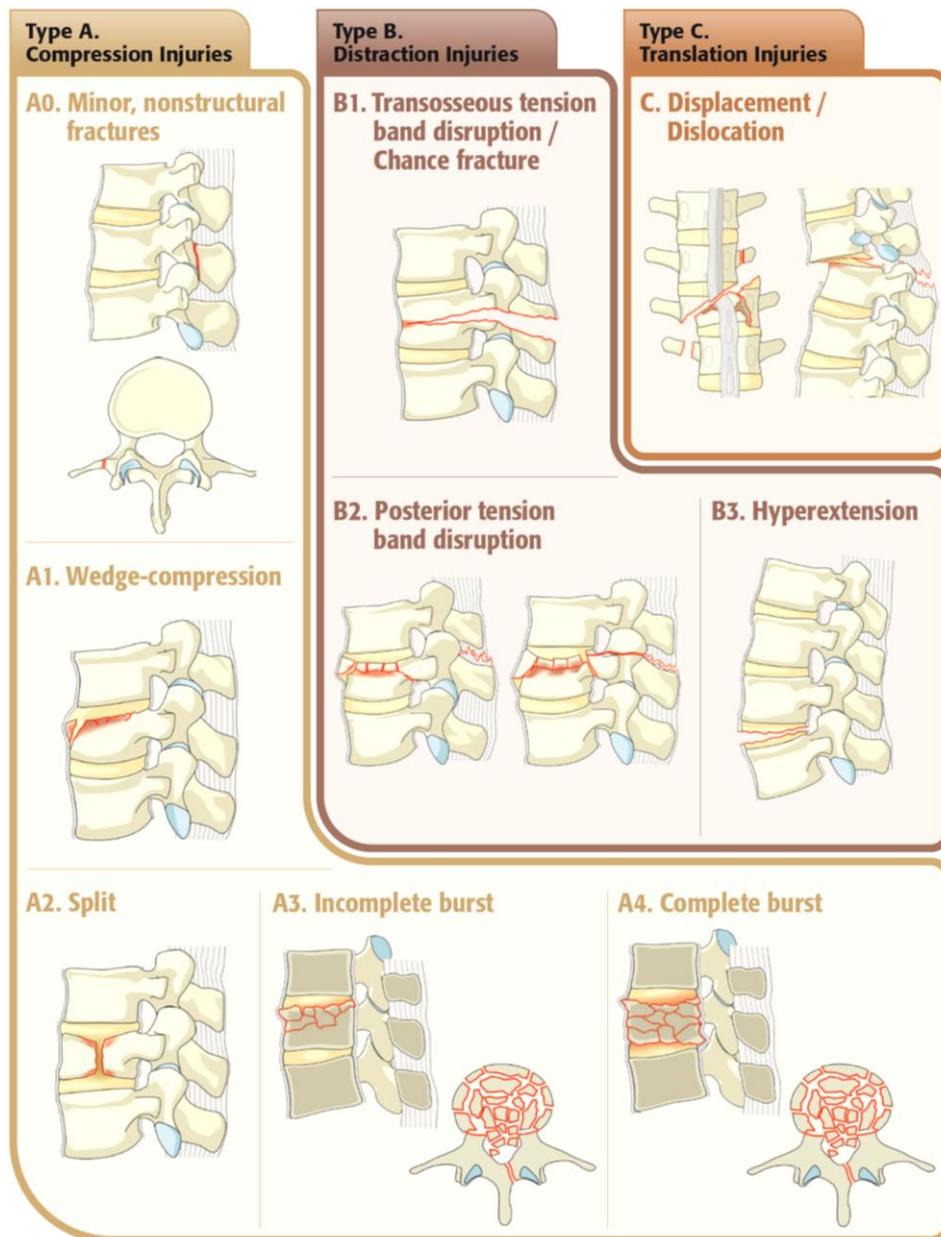


Abbildung 11: AOSpine-Klassifikation der thorakolumbalen Frakturen⁵⁴

Eine Schematische Darstellung der Frakturmorphologie der unterschiedlichen Frakturtypen, eingeteilt in Typ-A (Kompressions)-, Typ-B (Distraktions)- und Typ-C (Translations)-Verletzung sowie ihre Subtypen.

Typ-A-Verletzungen

Typ-A-Verletzungen sind die Folge von Kompressionsverletzungen. Sie äußern sich primär durch eine Fraktur der vorderen Anteile des Wirbels, aber auch leichte, klinisch nicht signifikante Verletzungen werden der Typ-A-Verletzung zugeordnet. Dabei werden fünf Subtypen unterschieden, die im Folgenden dargestellt werden.

Zum Subtyp A0 gehören Verletzungen, bei denen keine oder ausschließlich eine klinisch nicht signifikante Fraktur der Quer- oder Dornfortsätze vorliegt. Die mechanische Integrität der Wirbelsäule bleibt dabei unbeeinträchtigt.

Zum Subtyp A1 werden keilförmige Kompressions- oder Impaktionsfrakturen mit Beteiligung nur einer Endplatte (Deck- oder Bodenplatte) zugeordnet. Die Hinterkante und somit der Spinalkanal sind dabei intakt.

Zu Subtyp-A2-Verletzungen zählen Splitfrakturen, bei denen beide Endplatten frakturiert sind. Die Hinterkante bleibt dabei intakt.

Die Klassifikation Subtyp A3 beinhaltet eine unvollständige Berstungsfraktur, eine Kompressionsfraktur mit Beteiligung der Hinterkante, bei der nur eine der Endplatten frakturiert ist.

Eine Verletzung des Subtyps A4 beschreibt eine komplette Berstungsfraktur und ist sowohl durch Beteiligung der Hinterkante als auch der beiden Endplatten gekennzeichnet. Eine Fraktur der Lamina mit einem vertikalen Frakturspalt kann sowohl beim Subtyp A4 als auch beim Subtyp A3 auftreten, geht jedoch nicht mit einer Verletzung des hinteren Bandapparates einher.

Typ-B-Verletzungen

Eine Typ-B-Verletzung ist durch die begleitende Verletzung des vorderen Längsbandes (des vorderen Bandapparats) oder des PLC gekennzeichnet. Häufig tritt diese Verletzung in Kombination mit einer Typ-A-Verletzung auf, die mitklassifiziert werden soll. Folgende drei Subtypen werden unterschieden:

Dem Subtyp B1 werden rein ossäre Verletzungen eines einzelnen Wirbels zugeordnet, die eine Unterbrechung des hinteren Bandapparats zur Folge haben. Dabei kann sich der Frakturspalt von den Fortsätzen über die Pedikel in den Wirbelkörper fortsetzen. Diese Fraktur entspricht der von McAfee beschriebenen „chance“-Fraktur.

Der Subtyp B2 inkludiert dagegen Verletzungen des PLC mit einer ligamentären Komponente, die in Abgrenzung zum Subtyp B1 die intervertebrale Ebene miteinbezieht.

Der Subtyp B3 beschreibt eine Hyperextensionsverletzung des Wirbelkörpers oder der Bandscheibe. Diese ist durch die Unterbrechung des vorderen Längsbandes

gekennzeichnet. Der intakte PLC stellt ein Widerlager dar, welches eine weitere Dislokation der Wirbelsäule verhindert.

Typ-C-Verletzungen

Eine Typ-C-Verletzung ist durch die Dislokation der Wirbelsäule über das physiologische Maß hinaus gekennzeichnet. Dabei ist typischerweise sowohl der vordere als auch der hintere Bandapparat unterbrochen. Eine Fraktur im Sinne einer Typ-A- und Typ-B-Verletzung kann ebenfalls vorliegen und ist entsprechend mitzuerfassen.

1.3.4. Versorgung von thorakolumbalen Wirbelkörperfrakturen

In der Versorgung der Wirbelkörperfrakturen sind sowohl die konservative Therapie als auch eine Reihe von operativen Verfahren von Bedeutung. Ziele der Therapie sind dabei stets⁵⁵:

- die Wiederherstellung der Stabilität
- die Wiederherstellung der Mobilität
- das Erreichen einer weitestgehenden Schmerzfreiheit
- die Verhinderung, Verbesserung oder Vermeidung der Progression eines neurologischen Defizits
- die Wiederherstellung angemessener Achsenverhältnisse

Der Therapieverlauf wird maßgeblich durch die OP-Indikation bestimmt. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Stabilität einer Fraktur. Grundsätzlich gilt, dass eine stabile Fraktur konservativ behandelt werden kann, während eine instabile Fraktur in der Regel einer operativen Behandlung bedarf.⁵⁶

Bei der Beurteilung der Frakturstabilität ist neben den indirekten Zeichen wie der Dynamik der neurologischen Beschwerden oder der Stellungsänderung der Frakturfragmente auch die direkte Beurteilung der Frakturmorphologie zu beachten. Diese erfolgt mithilfe der AOSpine-Klassifikation (siehe Abschnitt 1.3.3.2.). Während bestimmte Frakturtypen dieser Klassifikation per Definition stabil oder instabil sind, bilden die meisten anderen Klassifikationstypen lediglich Wahrscheinlichkeiten für das Vorliegen einer Instabilität ab. Daher wird empfohlen, zur Beurteilung weitere morphologische Kriterien wie den

Kyphose- und Skoliosewinkel, den Grad der Wirbelkörperzerstörung, die Spinalkanaleinengung und das Ausmaß der Bandscheibenverletzung heranzuziehen.⁵⁶

1.3.4.1. Konservative Therapie

Die konservative Therapie ist als ein multimodales Konzept zu verstehen. Grundpfeiler dieses Konzepts sind die Schmerz- und die Physiotherapie. Doch auch adäquate Pflege, Nachsorge und ggf. weitere Verfahren wie Korsett- oder Extensionsbehandlungen zählen dazu.⁵⁷

Es gibt drei unterschiedliche Therapieansätze: Böhler's Reposition und Stabilisierung, Magnus' „functional bracing“ sowie die funktionelle Therapie. Gemeinsam haben diese Ansätze, dass sie durch angemessene Schmerztherapie die physiotherapeutisch geführte Kräftigung des muskulären Korsetts ermöglichen.⁵⁷

Die von Böhler postulierten Prinzipien der Frakturheilung wurden entsprechend auf die Wirbelsäulenfrakturen übertragen. Frakturen sollen dabei in der Regel auf einem speziellen Tisch durch Hyperextension reponiert und anschließend mittels Cast (Gipsmieder) immobilisiert und stabilisiert werden. Abhängig vom erreichten Kyphosewinkel betrug die Immobilisationsdauer zwölf bis 60 Wochen.⁵⁷

Nach Magnus, ist die Reposition nicht sinnvoll, da ein frakturierter Wirbel in der Regel die ursprüngliche Deformität wieder annimmt. Es solle dagegen direkt immobilisiert werden, je nach Frakturtyp unterschiedlich lang. Anschließend sollen die initiale Mobilisierung im Bett, die Mobilisation im Wasserbad und die orthesengestützte Mobilisation erfolgen. Die Physiotherapie solle erst nach radiologischer Konsolidierung der Fraktur – in der Regel nach drei bis vier Monaten – erfolgen.⁵⁷

Wie einige Studien jedoch zeigten, scheint der Einsatz von Orthesen keinen Vorteil in Bezug auf das Repositionsergebnis oder die Schmerzreduktion zu haben.^{58,59} Den modernen Ansatz der konservativen Therapie bildet daher die funktionelle Therapie. Dabei wird meist auf die Verwendung von Orthesen oder Gipsmieder verzichtet. Die Patienten/-innen werden hier aufgefordert, soweit die Möglichkeiten und der Schmerz es zulassen, direkt zu mobilisieren. Eine entsprechend adäquate Physio- und Schmerztherapie sind dabei unverzichtbar.⁵⁷

Die konservative Therapie kann dann erfolgen, wenn keine neurologische Verschlechterung und keine Stellungsänderung der Frakturfragmente im Rahmen der funktionellen Therapie zu erwarten sind. In der Regel ist dies bei stabilen Frakturen ohne Beteiligung der Hinterkante, also bei Subtyp-A0-, Subtyp-A1- und Subtyp-A2-Verletzungen der AOSpine-Klassifikation der Fall. Ebenfalls können Subtyp-B1-Verletzungen („chance“-Frakturen) konservativ behandelt werden. Darüber hinaus sprechen allgemeine oder spezifische OP-Kontraindikationen für die konservative Therapie.⁵⁶

1.3.4.2. Operative Therapie

Grundsätzlich gilt, dass die Indikation zur operativen Therapie dann gegeben ist, wenn eine neurologische Verschlechterung oder Stellungsänderung der Frakturfragmente im Rahmen der funktionellen Therapie zu erwarten ist.⁵⁶ Konkret lassen sich folgende Umstände als absolute OP-Indikationen identifizieren⁵⁵:

- eine inkomplette Paraparese
- ein progressives neurologisches Defizit
- eine Myelonkompression ohne neurologisches Defizit
- eine Frakturdislokation
- eine erhebliche segmentale Kyphose (mehr als 30 Grad)
- eine vorwiegend ligamentäre Verletzung

Ziel der operativen Therapie von Wirbelsäulenfrakturen ist es, ein besseres Ergebnis bezogen auf die neurologischen Defizite und die anatomische Rekonstruktion sowie ein besseres klinisches und radiologisches Langzeitergebnis gegenüber der konservativen Therapie zu erreichen. Dabei stehen einige Verfahren zur Verfügung. Eine Auswahl der gängigsten und für die vorliegende Arbeit relevanten operativen Verfahren werden im Folgenden vorgestellt.

1.3.4.2.1. Augmentationsverfahren

Die perkutane Vertebroplastie, die Ballonkyphoplastie und das Vertebral Body Stenting stellen die schrittweise Entwicklung der Augmentationsverfahren dar. Alle haben gemein, dass es sich in der Regel um einen minimalinvasiven Eingriff handelt, mit dem Ziel, die Höhe und Ursprungsform des frakturierten Wirbelkörpers durch dessen Auffüllen mit Knochenzement wiederherzustellen (siehe Abbildung 12). Die Vertebroplastie bezeichnet die Grundform des Eingriffs. Bei der Ballonkyphoplastie wird zusätzlich mit dem Einführen und Aufblasen eines Ballons eine Höhle für den Zement vorgeformt. Beim Einsatz eines Vertebral Body Stents wird die durch den aufgeblasenen Ballon präformierte Höhle zusätzlich durch einen Stent gestützt. Eine Kontraindikation für den Einsatz dieser Verfahren stellt eine frakturierte Hinterkante dar, die den unerwünschten Austritt von Zement in den Spinalkanal ermöglicht. Augmentationsverfahren kommen vorrangig bei osteoporotisch- oder tumorbedingten Frakturen zum Einsatz.⁵⁷



Abbildung 12: Röntgenaufnahmen nach Ballonkyphoplastie⁶⁰

Postoperative Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen (links: frontal, rechts: sagittal) eines mittels Ballonkyphoplastie augmentierten Wirbels. Der Zement (als Verdichtung im Wirbelkörper dargestellt) wurde hierbei in eine durch Aufblasen eines Ballons vorgeformte Höhle eingeführt.

1.3.4.2.2. Dorsale Stabilisierung

Grundsätzlich folgen alle offenen und perkutanen Verfahren zur dorsalen Stabilisierung (Spondylodese) der Wirbelsäule dem gleichen Prinzip: Spezielle transpedikuläre Schrauben werden in die Pedikel eingebracht und anschließend durch eine winkelstabile Verankerung mit Längsträgern verbunden. Eine zusätzliche rotatorische Stabilität wird

durch das Anbringen eines Querverbinders erreicht. Durch dieses Vorgehen werden eine Immobilisation und Stabilisierung des frakturierten Segments bzw. des Wirbelkörpers erreicht. Häufig wird bei der Fixierung der Schrauben eine Lordosierung und eine Distraction der Wirbelkörper angestrebt um die Wiederherstellung der anatomischen Krümmungen der Wirbelsäule zu erreichen.⁶¹ Von besonderer Bedeutung sind die in den Spinalkanal dislozierten Fragmente der Hinterkanten. Diese können bei der Distraction des frakturierten Segments indirekt durch den Zug der Fasern des hinteren Längsbands und des Anulus fibrosus, die sogenannte Ligamentotaxis, zumindest anteilig reponiert werden.⁵⁷

Je nach Ausdehnung der Verletzung wird eine mono-, bi- oder mehrsegmentale Stabilisierung durchgeführt. Die monosegmentale Stabilisierung beschränkt sich auf das Versteifen eines Wirbelsäulensegments (siehe Abbildung 13). Dies ist nur möglich, wenn die Morphologie des frakturierten Wirbels einen sicheren Halt der Pedikelschrauben zulässt. Infrage kommt die monosegmentale Stabilisierung also bei Subtyp-A1-Verletzung, in bestimmten Fällen auch bei Subtyp-A3-, Subtyp-B2- oder Subtyp-B3-Verletzungen.⁵⁷

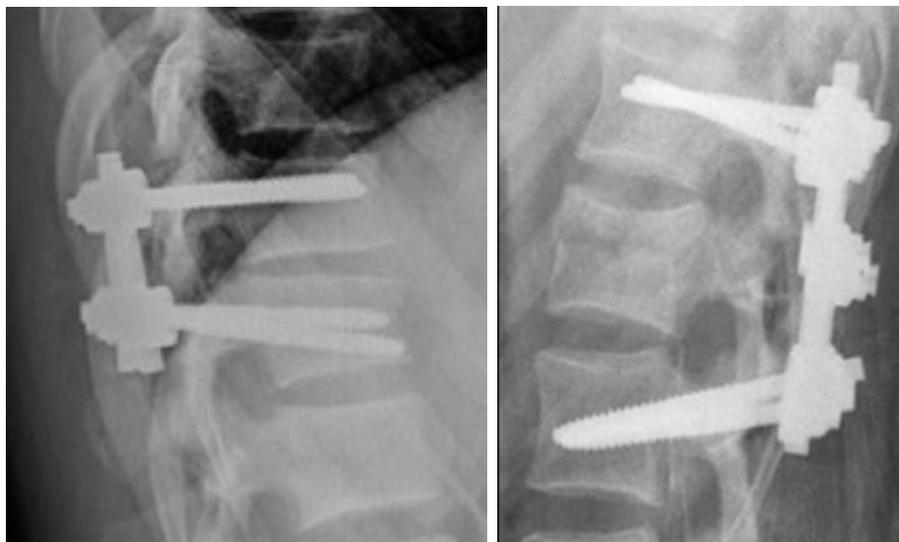


Abbildung 13: Mono- und bisegmentale dorsale Stabilisierung der Wirbelsäule⁶²

Links: Postoperative sagittale Röntgenaufnahme einer monosegmentalen dorsalen Stabilisierung nach einer Fraktur des 12. Brustwirbels. Der 11. und der 12. Brustwirbel sind dabei mit Pedikelschrauben besetzt. Rechts: Postoperative sagittale Röntgenaufnahme einer bisegmentalen dorsalen Stabilisierung nach einer Fraktur des 1. Lendenwirbels. Der 12. Brust- und der 2. Lendenwirbel sind dabei mit Pedikelschrauben besetzt.

Bei der bisegmentalen Stabilisierung werden in der Regel keine Schrauben in den frakturierten Wirbel eingebracht. Stattdessen werden die beiden ihn angrenzenden Wirbel mit den Pedikelschrauben besetzt, wodurch eine Versteifung von zwei Segmenten erfolgt (siehe Abbildung 13). Der Einsatz dieses Verfahrens ist weitestgehend unabhängig von der Frakturmorphologie.⁵⁷

Liegt eine Serienfraktur, eine Fraktur gemäß Typ-C-Verletzung oder eine besonders hohe Belastung des frakturierten Segments (bspw. am thorakolumbalen Übergang) vor, so sollte eine mehrsegmentale Stabilisierung erwogen werden. Für eine stabile Verankerung kann es dabei erforderlich werden, mehrere Wirbel mit Pedikelschrauben zu besetzen (siehe Abbildung 14).⁵⁷

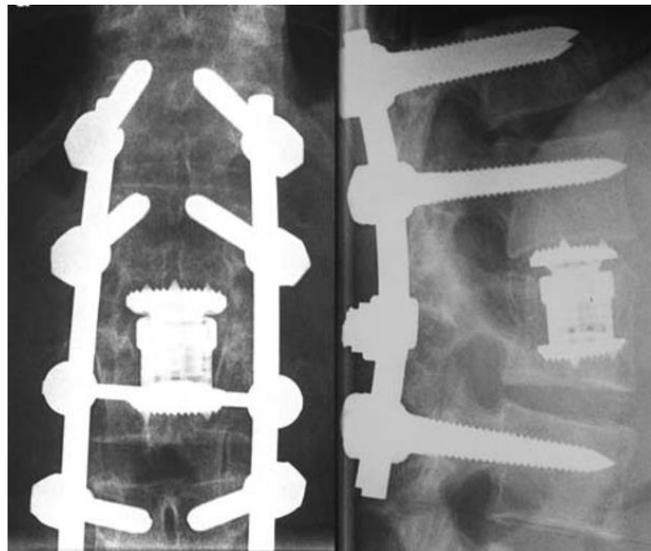


Abbildung 14: Röntgenaufnahmen einer mehrsegmentalen dorsoventralen Stabilisierung der Wirbelsäule⁶³

Postoperative Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen (links: frontal, rechts: sagittal), die das Ergebnis einer dorsoventralen Stabilisierung bei einer Fraktur des 2. Lendenwirbels darstellen. Dabei wurden der 12. Brust- sowie der 1. und 3. Lendenwirbel mit Pedikelschrauben besetzt. Zusätzlich wurden ein Teil des 2. Lendenwirbels und die Bandscheibe des betroffenen Segments reseziert, und es erfolgte eine ventrale Stabilisierung durch den Einsatz eines expandierbaren Titan-Cage.

Der operative Zugang kann sowohl offen als auch minimal-invasiv erfolgen. Beim offenen Zugang wird in der Regel zumindest partiell die autochthone Rückenmuskulatur subperiostal abgelöst. Dabei wird die Facettengelenkebene bis hin zu den Ansätzen der Querfortsätze in gesamter Ausdehnung der zu stabilisierenden Segmente freigelegt. Dies kann zu Komplikationen in Form von Denervierungen, Muskelatrophien oder narbigen

Veränderungen führen.^{6,64,65} Im Versuch, diese Komplikationen zu minimieren, wurden die modernen perkutanen Verfahren entwickelt. Das Einbringen von Pedikelschrauben erfolgt hierbei jeweils über einen eigenen, ca. 1-2 cm großen Zugang. Die Längsträger werden über einen separaten Zugang unter stumpfer Präparation zu den Schrauben vorgeschoben.^{57,64,65}

1.3.4.2.3. Ventrale Stabilisierung

Die lasttragende Funktion des Wirbelkörpers wird, abhängig von der Frakturmorphologie, zum Teil deutlich beeinträchtigt und muss durch die hintere Säule bzw. das Implantat kompensiert werden. Wenn die Kompensationskapazität überschritten wird, sollte zumindest eine anteilige Wiederherstellung der lasttragenden Funktion der vorderen Säule angestrebt werden. Dies kann auf verschiedene Weise erfolgen: durch Einsatz von autologem Knochenspan oder mittels künstlichem Wirbelkörperersatz.

Die ventrale monosegmentale Stabilisierung mit trikortikalem Span stellt ein mögliches Verfahren dar. Hierbei erfolgt die ventrale Fusion eines Bewegungssegments durch Ausräumung der Bandscheibe, ggf. mit einer Teilkorporektomie des frakturierten Wirbelkörpers und durch das Einbringen eines trikortikalen Beckenkammblocks in das geschaffene Spanbett. Anschließend wird der Wirbel mit einer winkelstabilen Platte oder einem Stabsystem fixiert. In ähnlicher Technik kann eine bisegmentale ventrale Stabilisierung erfolgen. Dabei werden neben der Teilkorporektomie des betroffenen Wirbelkörpers beide angrenzenden Bandscheiben reseziert. Ist der frakturierte Wirbelkörper höhergradig destruiert, so kann dessen Ersatz notwendig werden. Neben der Bandscheibenexzision erfolgt in diesem Fall meist eine Korporektomie mit anschließendem Einsatz eines expandierbaren Titan-Cage (siehe Abbildung 14).⁵⁷

Für die Indikationsstellung der ventralen Versorgung sind zuverlässige Kriterien zur Beurteilung der Stabilität der ventralen Säule äußerst wichtig. Dabei sind die Frakturmorphologie und der Grad der Fehlstellung von besonderer Bedeutung. Nachdem das Vorhandensein eines Vakuumphänomens ein indirektes Anzeichen einer frakturbedingten Beteiligung der ventralen Wirbelsäule sein kann, ist dieses zumindest als ein weiterer Einflussfaktor theoretisch in Erwägung zu ziehen.^{66,67} Da das Vakuumphänomen im Kontext der traumatischen Wirbelkörperfrakturen bislang nur unzureichend erforscht ist, wurde darauf der Fokus der vorliegenden Arbeit gelegt.

1.4. Vakuumphänomen der Bandscheibe

Bei den Ausführungen über die Gelenkmechanik hat Fick bereits 1910 als einer der ersten das Vakuumphänomen beschrieben. Auf Röntgenaufnahmen von unter Zug gesetzten Gelenken der Probanden erkannte er das Vakuumphänomen als eine Aufhellung im Gelenkspalt und bezeichnete dieses seinerzeit als „luftleeren Raum“. Für den Zusammenhalt der Gelenke führte er unter anderem die Bedeutung des Luftdrucks näher aus, erkannte aber auch, dass der durch den Zug abgesenkte Druck in der Gelenkkapsel zur Wasserdampfentwicklung führen muss.⁷

Bis Knutsson 1942 den Begriff „Vakuumphänomen“ prägte, wurde dieses Phänomen als der „wirkliche oder echte Gelenkspalt“ bezeichnet.⁶⁸ Im Jahr 1937 bereits hatte Magnusson die ersten Fälle des Vakuumphänomens im intervertebralen Raum beschrieben und hatte den Erklärungsansatz für dessen Entstehung erweitert. Dabei erkannte er, dass der abgefallene Druck in der Gelenkkapsel neben der Entstehung des Wasserdampfes auch zum Austritt der in der Synovia gelösten Gase führen muss.⁶⁹

Mittels Gaschromatographie haben Ford und Kollegen die Zusammensetzung des intervertebralen Vakuumphänomens 1977 untersucht. Sie stellten fest, dass das Gasgemisch zu 90 bis 92 Prozent aus Stickstoff besteht und Sauerstoff, Kohlendioxid sowie weitere Spurengase den Rest ausmachen.⁷⁰ Yoshida und Kollegen (1997) stellten eine ähnliche Zusammensetzung bei der Untersuchung von Pseudozysten des Spinalkanals fest.⁷¹

Aufgrund der hohen Prävalenz des Vakuumphänomens ist es weiterhin von wissenschaftlichem Interesse. Heute wird der Begriff des Vakuumphänomens im Kontext der Orthopädie und Unfallchirurgie zur Beschreibung fast aller Strukturen, die sich radiologisch mit Gasdichte darstellen, verwendet.⁷² Das für die vorliegende Arbeit relevante Vakuumphänomen der Bandscheibe (siehe Abbildung 15) wurde bereits in anderen Studien mit klinischen Symptomen wie Rückenschmerzen in Verbindung gebracht,^{73,74} aber auch als ein Zeichen der segmentalen Instabilität gedeutet.^{66,67} Somit ist das Vakuumphänomen im Kontext von Wirbelkörperfrakturen und in Bezug auf die ventrale Stabilität von großem Interesse, es ist bis jetzt jedoch unzureichend erforscht.

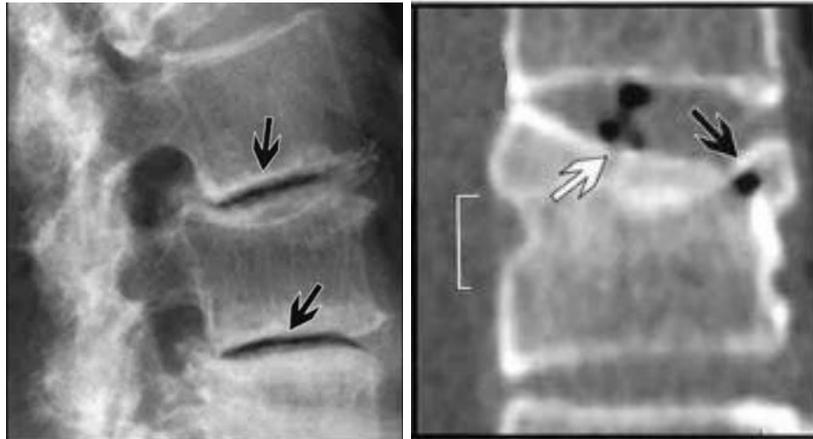


Abbildung 15: Aufnahmen mit Demonstration von Vakuumphänomenen der Bandscheibe⁷²

Links: Darstellung eines Vakuumphänomens in einer seitlichen Röntgenaufnahme. Zu sehen ist eine Dichteminderung der Bandscheibe der Lendenwirbelsäulen-Segmente L3/4 und L4/5 (Pfeile). Rechts: Darstellung eines Vakuumphänomens mittels CT. Hier ist eine Hypodensität im Bereich der Bandscheibe (weißer Pfeil) zusätzlich zu einem intravertebralen Vakuumphänomen (schwarzer Pfeil) erkennbar.

Zahlreiche Untersuchungen konnten zeigen, dass das Auftreten des Vakuumphänomens in der Bandscheibe mit einer Reihe von Pathologien assoziiert ist, dazu zählen^{68,69,72,75–78}:

- degenerative Erkrankungen
 - Osteochondrosis intervertebralis
 - Spondylosis deformans
 - Morbus Scheuermann
- Osteomyelitis
- Bandscheibenvorfälle
- traumatische oder pathologische Wirbelkörperfrakturen

Während die Pathophysiologie der zugrundeliegenden Erkrankungen geklärt zu sein scheint, ist der jeweilige Pathomechanismus der Entstehung des Vakuumphänomens nicht vollständig verstanden. Grundsätzlich scheinen hierbei chronische/degenerative und akute/traumatische Prozesse von Bedeutung zu sein.^{72,78} Die physikalischen Grundsätze, die zur Entstehung eines Vakuumphänomens führen, werden im Folgenden vorgestellt.

1.4.1. Physikalische Grundsätze der Entstehung eines Vakuumphänomens

Das Vakuumphänomen im eigentlichen Sinne beschreibt eine Gasansammlung, die im Zusammenhang mit der Volumenzunahme eines impermeablen Systems entsteht. Ursache für die Volumenzunahme ist meist eine externe Krafteinwirkung. Das Vakuumphänomen entsteht unmittelbar mit der Krafteinwirkung und verschwindet wieder, wenn diese entfällt (siehe Abbildung 16). Es ist bei einem komplett impermeablen System, per Definition, vollständig reversibel und beliebig oft reproduzierbar.

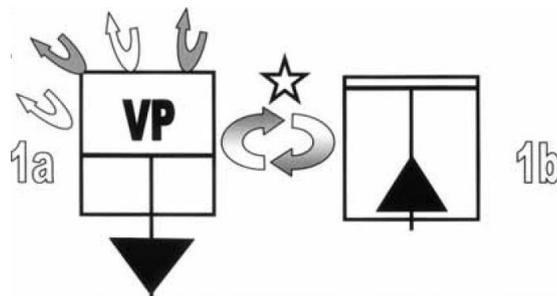


Abbildung 16: Entstehung eines Vakuumphänomens in einem impermeablen System⁷²

1a: In einem impermeablen System (durch geschwungene Pfeile dargestellt) führt eine exzentrisch gerichtete Krafteinwirkung (hier: nach außen gerichtetes schwarzes Dreieck) zur Volumenzunahme und Entstehung eines Vakuumphänomens (VP). 1b: Der Wegfall der exzentrisch gerichteten Kraft bzw. das Einwirken einer konzentrisch gerichteten Kraft (hier: nach innen gerichtetes schwarzes Dreieck) führt zum Verschwinden des Vakuumphänomens. Die Zustandsänderung 1a ↔ 1b ist reversibel und reproduzierbar (durch den Stern und die zueinander zeigenden Pfeile repräsentiert).

Die Entstehung des Vakuumphänomens lässt sich wie folgt erklären: Man stelle sich eine Bandscheibe als ein fest verankertes, begrenzt verformbares und mit Flüssigkeit gefülltes System vor. Führt eine exzentrisch gerichtete Kraft zur Volumenzunahme des Systems, so resultiert dies gemäß dem Gesetz von Boyle in einem Druckabfall im System. Entsprechend dem Gesetz von Henry setzt der abfallende Druck dann die Löslichkeit des Gases in der Gaslösung herab. Die Gase werden freigesetzt – solange, bis ein neues Gleichgewicht zwischen Löslichkeit und Druck erreicht ist. Die Gasentstehung geht mit einer Volumenzunahme, die das System in Richtung der Krafteinwirkung expandieren lässt, einher. Der niedrigere Druck im System persistiert, solange die Krafteinwirkung weiterhin besteht. Fällt die Krafteinwirkung weg, laufen die Prozesse in entgegengesetzter Richtung ab: Der Druck erhöht sich auf den Ausgangswert, die Löslichkeit der Gase steigt und dadurch wird sich in einem impermeablen System das

gesamte ausgetretene Gas wieder in der Flüssigkeit lösen. Somit ist der Ausgangszustand wieder erreicht.^{7,69,72,75}

Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Bandscheibe kein vollständig impermeables System darstellt, insbesondere wenn Kräfteinwirkungen und die Niedrigdruckzustände über längere Zeit persistieren. Die Entstehung eines Vakuumphänomens in einem teilpermeablen System ist in Abbildung 17 schematisch dargestellt.

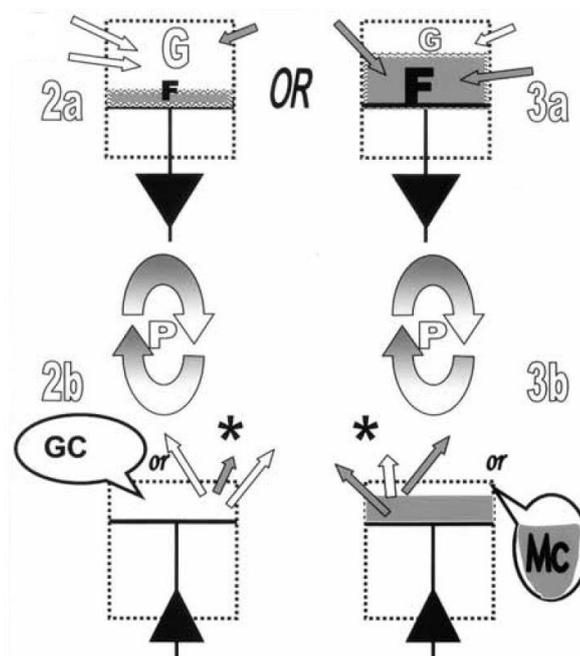


Abbildung 17: Entstehung eines Vakuumphänomens in einem teilpermeablen System⁷²

2a: In einem hauptsächlich für Gas permeablen System führt eine exzentrisch wirkende Kraft zur Volumenzunahme und einer Diffusion eines Gases in das System. 2b: Der Wegfall der exzentrischen Kraft bzw. die zusätzliche Wirkung einer konzentrischen Kraft resultiert entweder in der Verdrängung des Gases in einen toten Raum oder in eine rückgängige Diffusion. 3a und 3b: Das entsprechende Verhalten für ein hauptsächlich für eine Flüssigkeit permeables System. Die sich wiederholenden Zustandsänderungen 2a ↔ 2b und 3a ↔ 3b werden als „pumping“ bezeichnet. G = Gas; F = Flüssigkeit; weiße Pfeile = Gasdiffusion; graue Pfeile = Flüssigkeitsdiffusion; GC/MC = Totraumvolumen; P = „pumpnig“.

Der Mechanismus gleicht dabei bis zur Entstehung des Vakuumphänomens dem des impermeablen Systems. Der Unterschied besteht darin, dass in einem teilpermeablen System durch Diffusion entlang des entstandenen Druckgradienten ein Stoffaustausch zwischen dem Inneren und dem Äußeren des Systems möglich ist. Abhängig von der Permeabilität des Systems und der Zusammensetzung der es umgebenden Strukturen können Gase oder Flüssigkeiten durchdiffundieren. Die Menge des Diffusats hängt unter

anderem vom Grad der Permeabilität und der Gesamtdauer der Krafteinwirkung ab.⁷² Wendet man dieses Modell auf eine Bandscheibe an, so muss berücksichtigt werden, dass deren Expansionskapazität durch ligamentäre, muskuläre und knöcherne Strukturen begrenzt ist. Der Widerstand dieser Strukturen gleicht in maximaler Extension die exzentrisch wirkende Kraft aus und lässt keine weitere Expansion zu. In einem solchen Fall führt die Gas- bzw. Flüssigkeitsdiffusion zu Angleichung des Drucks zwischen dem Inneren und Äußeren des Systems. Mit dem Druckausgleich lösen sich die Gase des Vakuumphänomens wieder auf und werden durch das Diffusat ersetzt. Der Wegfall der exzentrisch wirkenden Kraft allein ist nun nicht mehr ausreichend, um das Diffusat aus der Bandscheibe zu beseitigen. Da in der Bandscheibe in der Regel aber weitere konzentrisch gerichtete Kräfte wirken, führen diese zur entsprechenden Umkehr des Druckgradienten. Sich wiederholende diffusionsbedingte Gas- oder Flüssigkeitsbewegungen in und aus dem System bzw. in und aus der Bandscheibe werden als „pumping“ bezeichnet.⁷²

1.4.2. Degeneratives Vakuumphänomen der Bandscheibe

Die beobachtete Prävalenz des Vakuumphänomens der Bandscheibe im Zusammenhang mit degenerativen Veränderungen reicht in Abhängigkeit vom selektierten Patientenkollektiv und von der Untersuchungstechnik von zwei bis 46 Prozent.^{68,76–81} Bereits 1942 hatte Knutsson das Auftreten eines Vakuumphänomens mit der Bandscheibendegeneration in Zusammenhang gebracht. Neben Kalzifikationen gehört das Vakuumphänomen demnach zu den ersten radiologischen Zeichen der primären Bandscheibendegeneration (Osteochondrosis intervertebralis). Die Entstehung wurde auf das Austrocknen und die resultierende Rissbildung des Nucleus zurückgeführt. Davon abgegrenzt wurde ein randständiges, auf die Rissbildung des Anulus fibrosus zurückzuführendes Vakuumphänomen. Dieses wurde als erstes Zeichen der Spondylosis deformans gedeutet.⁶⁸ Resnick und Kollegen (1981) bestätigten diese Beobachtungen bei der Untersuchung von resezierten Wirbelsäulen und gingen näher auf die Morphologie des Vakuumphänomens ein. Sowohl die primäre als auch die sekundäre Osteochondrosis intervertebralis wurde mit dem Auftreten von initial kleinen zirkulären oder linearen Gasformationen assoziiert. Im Verlauf expandieren diese bis in die äußeren Fasern des Anulus fibrosus.⁷⁶

Weitere Untersuchungen der Bandscheibendegeneration zeigten, dass diese im fortgeschrittenen Stadium mit einer Rissbildung assoziiert ist.^{82–85} Diese Risse können sich in der Bildgebung ebenfalls als Vakuumphänomen zeigen.⁷² Dabei wird die Degeneration der Endplatten als mögliche Ursache für die Bandscheibendegeneration und das vermehrte Auftreten des Vakuumphänomens diskutiert.^{83,86}

1.4.3. Traumatisches Vakuumphänomen der Bandscheibe

In vergleichsweise wenigen Arbeiten wurde das Auftreten des Vakuumphänomens im Zusammenhang mit Frakturen untersucht. Neben einer Reihe von Publikationen, in denen von Einzelfällen des intervertebralen Vakuumphänomens bei höhergradigen Wirbelkörperfrakturen berichtet wurde,^{77,87,88} untersuchten Lafforgue und Kollegen (1994) systematisch das Auftreten eines frakturassozierten Vakuumphänomens. Jedoch waren bei dieser Untersuchung lediglich bei 43 Patienten/-innen die Frakturen primär auf ein Trauma zurückzuführen. Von diesen wiesen nur sieben Prozent ein frakturassoziertes Vakuumphänomen auf.⁷⁸ Aufgrund des geringen Patientenkollektivs konnten so keine verlässlichen Aussagen hinsichtlich des Auftretens und weiterer Zusammenhänge eines traumatischen Vakuumphänomens gemacht werden.

1.5. Fragestellungen und Hypothesen

Das Ziel dieser Arbeit war es, das Auftreten eines Vakuumphänomens der Bandscheibe bei Patienten/-innen mit traumatischen Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule zu untersuchen. Folgende Fragestellungen wurden hierbei identifiziert:

- Besteht ein Zusammenhang zwischen dem Alter, dem Geschlecht der Patienten/-innen und dem Auftreten des Vakuumphänomens?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen dem Unfallmechanismus und dem Auftreten des Vakuumphänomens?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen der Frakturlokalisierung, Frakturmorphologie oder radiologischen Parametern und dem Auftreten des Vakuumphänomens?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Vakuumphänomens und der erfolgten Versorgung?

2. Methoden

Im Vorfeld der Erstellung dieser Arbeit erfolgte die Teilnahme an der *Pflichtvorlesung für Doktoranden zur guten wissenschaftlichen Praxis* durch die Charité – Universitätsmedizin Berlin. Zusätzlich wurde eine Beratung durch das Institut für Biometrie und Klinische Epidemiologie der Charité wahrgenommen.

Für die Literaturrecherche wurde vorwiegend die PubMed-Datenbank verwendet. Die Suchanfragen wurden hierbei, soweit verfügbar, mit Verwendung von MeSH Terms durchgeführt. Eine Beurteilung der Relevanz der ausgegebenen Artikel erfolgte anhand der Titel und Abstracts. Die einschlägigen Artikel wurden erfasst und weitere relevante Arbeiten dann anhand ihrer Literaturverzeichnisse identifiziert. Diese konnten als direkte Suchanfragen ebenfalls über die PubMed-Datenbank abgerufen werden. Weitere Fachliteratur wie Fachbücher der Anatomie und der Chirurgie wurden ebenfalls verwendet.

2.1. Studiendesign

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine retrospektive Analyse von 674 Patienten/-innen, die aufgrund einer Fraktur der thorakolumbalen Wirbelsäule in den Jahren 2014 und 2015 an der Charité – Universitätsmedizin Berlin behandelt worden waren. Die Ethikkommission der Charité hat die Durchführung der vorliegenden medizinisch-wissenschaftlichen Arbeit genehmigt (Antragsnummer EA4/125/17). An dieser Stelle sei auch darauf verwiesen, dass die geltenden Datenschutzrichtlinien sowie die Satzung der Charité zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis beachtet wurden.

2.2. Ein- und Ausschlusskriterien

Folgende Einschlusskriterien wurden definiert:

- Vorstellung des/der Patienten/-in an der Charité – Universitätsmedizin Berlin im Jahr 2014 oder 2015
- Vorliegen einer Fraktur der thorakolumbalen Wirbelsäule

Folgende Ausschlusskriterien wurden definiert:

- alleiniges Vorliegen einer Fraktur älterer Genese
- pathologische Frakturgenese (bspw. manifeste Osteoporose, Morbus Bechterew, fortgeschrittene Tumorerkrankung)
- unvollständige Daten (bspw. keine Zugriffsmöglichkeit auf CT-Aufnahmen oder keine Angaben zum Unfallhergang)
- Subtyp-A0-Verletzungen

2.3. Datenerhebung

Die primäre Akquise der Daten erfolgte mithilfe der Abteilung des medizinischen Controllings der Charité – Universitätsmedizin Berlin. Dafür wurden die Daten aller Fälle mit Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule mittels ICD-10-Codes S22.- und S32.- angefordert. Die Datenbank wurde mit dem Programm Microsoft Excel® angelegt und geführt. In der weiteren Datenerhebung wurden die elektronischen Akten über die SAP-Software aufgerufen und die durchgeführte Bildgebung über die entsprechende PACS-Software beurteilt.

2.3.1. Patientenspezifische Daten

Folgende patientenspezifische Daten wurden erhoben:

- Patientenummer
- Alter bei Aufnahme
- Geschlecht
- Unfalldatum
- Unfallhergang
- Polytraumastatus

2.3.2. Erkrankungsspezifische Daten

Folgende erkrankungsspezifische Daten wurden erhoben:

- Aufnahme- und Entlassungsdaten von den im Zusammenhang mit der Wirbelsäulenfraktur stehenden Klinikaufenthalte
- Daten und Modalitäten der durchgeführten Schnittbildgebung (CT, MRT)
- Frakturhöhe
- Klassifikation der Fraktur
- Kyphose- bzw. Lordose- und Skoliose-Winkel
- Vorhandensein des Vakuumphänomens mit Angabe des betroffenen Wirbelsäulensegments und dem Datum der Feststellung

2.3.3. Behandlungsspezifische Daten

Folgende behandlungsspezifische Daten wurden erhoben:

- Behandlungsmodalität
- Datum der Operation
- Operationsverfahren

Die primäre Behandlungsmodalität wurde als konservativ oder operativ erfasst. Im letzteren Fall wurde zusätzlich das Operationsverfahren identifiziert. Ebenso wurden, falls vorhanden, die Behandlungserweiterungen als sekundäre Versorgung erfasst.

2.4. Datenanalyse

2.4.1. Beurteilung des Unfallmechanismus

Die Angaben zum Unfalldatum und -hergang wurden möglichst detailliert dem Erste-Hilfe-Schein und den Entlassungs-/Verlegungsbriefen entnommen. Zusätzlich wurde festgehalten, ob die Einweisung als Polytraumafall erfolgte. Anhand der erhobenen Daten fand anschließend die Zuordnung zu einem Unfalltyp statt. Die für diese Arbeit verwendete Klassifikation ist an die von Reinhold und Kollegen (2010) verwendete Einteilung (siehe Abschnitt 1.3.1.) angelehnt.¹⁶ Bei der Abgrenzung der einzelnen

Unfalltypen wurde jedoch eine Anpassung an die Polytraumakriterien vorgenommen. Folgende Kategorien wurden festgelegt:

- Unfalltyp I: Sturz aus dem Stand oder vergleichbarer Höhe
- Unfalltyp II: Sturz aus geringer Höhe (< 3 m)
- Unfalltyp III: Sturz aus großer Höhe (\geq 3 m)
- Unfalltyp IV: Unfall im Straßenverkehr
- Unfalltyp V: Anpralltrauma

Nicht näher beschriebene Treppenstürze oder Sportunfälle wurden als Unfalltyp II eingestuft. Alle Unfälle mit Beteiligung eines motorisierten Fahrzeugs oder Fahrradstürze ohne Dritteinwirkung, aber mit dokumentiert hoher Geschwindigkeit wurden zum Unfalltyp IV gezählt. Unfalltyp V beinhaltete solche Unfälle, bei denen bspw. schwere Gegenstände auf oder gegen den Rücken gefallen sind.

Ebenfalls wurden die Unfälle nach Rasananz eingestuft. Dabei wurden die Unfalltypen III, IV und V den Hochrasanztraumata zugeordnet, die Unfalltypen I und II dementsprechend den Niedrigrasanztraumata.

2.4.2. Beurteilung der Frakturen

Die primäre Beurteilung der Frakturen erfolgte unabhängig von den vorliegenden Befunden und anhand der CT-Aufnahmen, die zuerst nach dem Unfall angefertigt worden waren. Dabei wurden die Wirbelkörperfrakturen identifiziert und anhand der AOSpine-Klassifikation (siehe Abschnitt 1.3.3.2.) eingeteilt. Anschließend erfolgte der Vergleich mit der Diagnose und der Klassifikation aus den vorliegenden Befunden. Zeigte dieser Vergleich eine Abweichung, so erfolgte eine zusätzliche Beurteilung durch einen Facharzt für Unfallchirurgie. Die in den Jahren 2014 und 2015 noch angewandte AO-Magerl-Klassifikation wurde in die entsprechenden Kategorien der AOSpine-Klassifikation überführt.

Von der Betrachtung der Subtyp-A0-Verletzungen wurde abgesehen, da diese per Definition keine Frakturen der Wirbelkörper darstellen. Somit sind bei solchen Verletzungen weder eine direkte Verletzung der Bandscheiben durch Fraktur der

Endplatte noch eine indirekte Verletzung durch eine Fehlstellungen der Wirbelsäule zu erwarten.

Falls mehrere Frakturen gleichzeitig vorgelegen haben, wurde bei der Betrachtung der Patienten/-innen die jeweils schwerwiegendste Fraktur vermerkt. Der Schweregrad der Frakturtypen wurde nach der folgenden Rangfolge festgelegt: $A1 < A2 < A3 < A4 < B < C$. Für die statistische Auswertung aller Frakturen wurde zusätzlich eine entsprechende Tabelle erstellt.

In der primären Erfassung der Frakturen wurden Typ-B und Typ-C-Verletzungen immer mit der begleitenden Typ-A-Verletzung klassifiziert. Zwecks Vereinfachung und Vereinheitlichung des Datensatzes wurde jedoch bei der statistischen Auswertung auf die Berücksichtigung der begleitenden Typ-A-Verletzung verzichtet.

Zur Beurteilung des Kyphose- bzw. Lordosewinkels wurde der Grund-Deckenplatten-Winkel (GDW) ermittelt. Hierfür wurden mithilfe des Cobb-Winkel-Tools der PACS-Software die Winkel zwischen den Deck- und Grundplatten gemessen. Diese Messung erfolgte auf Höhe des Processus spinosus in sagittaler Projektion der CT. Der Skoliosewinkel wurde ebenfalls mithilfe des Cobb-Winkels ermittelt. Die Messung erfolgte hierfür in frontaler Projektion auf Höhe der Wirbelkörpermitte. In Abhängigkeit davon, ob die Grundplatte des frakturierten Wirbelkörpers intakt war oder eine Serienfraktur vorlag, wurde ein mono-, bi- oder mehrsegmentaler GDW gemessen. Hierfür wurden grundsätzlich die erste intakte Deckplatte kranial und die erste intakte Grundplatte kaudal der Fraktur herangezogen.

2.4.3. Beurteilung des Vakuumphänomens

Alle im Zusammenhang mit der Wirbelsäulenfraktur durchgeführten CT- und MRT-Untersuchungen wurden auf das Vorhandensein eines Vakuumphänomens der Bandscheibe geprüft. Dabei wurde nicht nur die betroffene Höhe, sondern auch der gesamte abgebildete Abschnitt der Wirbelsäule beurteilt. Die Abgrenzung zwischen dem traumatischen und degenerativen Vakuumphänomen erfolgte nach dem Vorbild der Arbeit von Lafforgue und Kollegen (1994). Als traumatisch wurde ein Vakuumphänomen dann bewertet, wenn es in dem von der Fraktur betroffenen Segment festgestellt wurde.

Dementsprechend wurde ein Vakuumphänomen als degenerativ eingestuft, wenn es in einem nicht von der Fraktur betroffenen Segment festgestellt wurde.⁷⁸

Bei der Betrachtung der Patienten/-innen wurde vermerkt, ob ein degeneratives oder ein traumatisches Vakuumphänomen aufgetreten ist und ob es in der Initial- oder Verlaufsbildgebung festgestellt wurde. Zudem wurde das Auftreten des traumatischen Vakuumphänomens für die entsprechende Fraktur in der frakturbezogenen Tabelle erfasst.

Um Aussagen über die Dynamik der Entstehung eines traumatischen Vakuumphänomens treffen zu können, wurde festgehalten, in welcher der erfolgten bildgebenden Untersuchung dieses zuerst aufgetreten ist. Der zeitliche Abstand vom Unfallereignis bis zum Feststellen des Vakuumphänomens wurde in Tagen ermittelt. Anschließend wurde zwischen Initial- und Verlaufsbildgebung unterschieden. Als initial wurde die erste verfügbare Bildgebung aufgefasst, die während des Krankenhausaufenthalts, welcher dem Unfallereignis unmittelbar folgte, und binnen 60 Tagen nach dem Unfallereignis durchgeführt worden war.

2.4.4. Statistische Auswertung

Die deskriptive Statistik wurde anhand von Mittelwerten, Standardabweichung, Minimum und Maximum dargestellt. Die Testung der Hypothesen erfolgte in Abhängigkeit von der Skalierung der zu vergleichenden Variablen entweder mithilfe des Chi-Quadrat-Tests, dem t-Test oder der einfaktoriellen Varianzanalyse. Dabei wurde zweiseitig getestet und ein Signifikanzniveau von fünf Prozent zugrunde gelegt. Zur statistischen Auswertung wurde das Programm IBM SPSS Statistics® in der Version 24 (aktuelle Version zum Zeitpunkt der Datenauswertung) verwendet. In Abhängigkeit von der Fragestellung wurden statistische Berechnungen basierend auf den Daten, die in der patienten- und/oder frakturbezogenen Tabelle festgehalten waren, durchgeführt.

3. Ergebnisse

3.1. Deskriptive Statistik

3.1.1. Patientenspezifische Daten

Während der primären Datenerhebung konnten 674 Fälle identifiziert werden, davon 309 aus dem Jahr 2014 und 365 aus dem Jahr 2015. In 274 Fällen handelte es sich um eine nicht traumatische Wirbelkörperfraktur. Darüber hinaus konnten in elf Fällen ausschließlich ältere Frakturen und in 49 Fällen ausschließlich Subtyp-A0-Verletzungen festgestellt werden. Weitere 139 Fälle wurden aufgrund fehlender Bildgebung oder fehlender Angaben zum Unfallmechanismus ausgeschlossen. So erfüllten insgesamt 201 Fälle die Einschlusskriterien, sodass 116 männliche und 85 weibliche Patienten/-innen in die Studie aufgenommen wurden. Das Durchschnittsalter des gesamten Studienkollektivs betrug 50,1 Jahre. Dabei waren die Männer mit durchschnittlich 47,8 Jahren ca. 5,6 Jahre jünger als die Frauen mit durchschnittlich 53,4 Jahren (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Geschlecht und Alter der Patienten/-innen

	n Patienten/-innen (h _n in %)	Alter (SD) – Jahre
Gesamt	201 (100)	50,1 (±18,6)
weiblich	85 (42,3)	53,4 (±19,6)
männlich	116 (57,7)	47,8 (±17,5)

n = Anzahl; h_n = relative Häufigkeit; SD = Standardabweichung

3.1.2. Unfallmechanismus

Bei der Betrachtung des Unfallmechanismus (siehe Tabelle 3) konnte beobachtet werden, dass ca. 30 Prozent der Patienten/-innen (n = 61) einen Sturz aus dem Stand oder vergleichbarer Höhe (Unfalltyp I) erlitten hatten. Das Durchschnittsalter dieser Gruppe war mit 63 Jahren das höchste. Ungefähr 19 Prozent der Patienten/-innen (n = 39), mit einem Durchschnittsalter von 49,4 Jahren, hatten einen Sturz aus unter drei Metern Höhe (Unfalltyp II) erlitten. Stürze aus einer Höhe von über drei Metern (Unfalltyp

III) und Straßenverkehrsunfälle (Unfalltyp IV) wurden in jeweils 47 Fällen, ca. 23 Prozent, als Unfallmechanismus identifiziert. Das Anpralltrauma (Unfalltyp V) stellte mit ca. vier Prozent (n = 7) der Fälle den seltensten Unfallmechanismus dar.

Tabelle 3: Verteilung des Unfallmechanismus nach Unfalltyp

Unfallmechanismus	n Patienten/-innen (h _n in %)	Alter (SD) – Jahre
Unfalltyp I	61 (30,3)	63,0 (±16,0)
weiblich	33 (54,1)	66,8; (±14,9)
männlich	28 (45,9)	58,4 (±16,4)
Unfalltyp II	39 (19,4)	49,4; (±16,2)
weiblich	22 (56,4)	49,7; (±18,0)
männlich	17 (43,6)	48,9; (±14,4)
Niedrigrasanztrauma	100 (49,8)	57,9; (±17,2)
weiblich	55 (55,0)	60,0; (±18,1)
männlich	45 (45,0)	54,8; (±16,2)
Unfalltyp III	47 (23,4)	41,0; (±16,0)
weiblich	12 (25,5)	40,7; (±18,8)
männlich	35 (74,5)	41,1; (±15,2)
Unfalltyp IV	47 (23,4)	43,4; (±17,3)
weiblich	16 (34,0)	40,8; (±13,4)
männlich	31 (66,0)	44,7; (±19,0)
Unfalltyp V	7 (3,5)	49,9; (±18,8)
weiblich	2 (28,6)	48,0; (±32,5)
männlich	5 (71,4)	50,6; (±16,1)
Hochrasanztrauma	101 (50,2)	42,6; (±16,8)
weiblich	30 (29,7)	41,2; (±16,4)
männlich	71 (70,3)	43,3; (±17,0)

n = Anzahl; h_n = relative Häufigkeit; SD = Standardabweichung; die Unfalltypen werden in Abschnitt 2.4.1. definiert; das Niedrigrasanztrauma stellt die Zusammenfassung der Unfalltypen I und II dar und das Hochrasanztrauma die der Unfalltypen III, IV und V.

Die Niedrigrasanz- (n = 100; 49,8 %) und Hochrasanztraumata (n = 101; 50,2 %) wurden annähernd gleich oft beobachtet. Unabhängig davon, dass mehr Männer in die Studie aufgenommen worden waren, konnte beobachtet werden, dass Frauen häufiger ein

Niedrigrasanztrauma erlitten als Männer (n = 55; 65 % vs. n = 45; 39 %). Entsprechend erfuhr Männer häufiger ein Hochrasanztrauma als Frauen (n = 71; 61 % vs. n = 30; 35 %).

Das Durchschnittsalter der Gruppe mit einem Hochrasanztrauma war mit 42,6 Jahren niedriger als das Durchschnittsalter der Gruppe mit einem Niedrigrasanztrauma, welches bei 57,9 Jahren lag. Männer und Frauen, die ein Hochrasanztrauma erlitten haben, waren im Durchschnitt annähernd gleich alt (43,3 vs. 41,2 Jahre). Bei den Patienten/-innen, die ein Niedrigrasanztrauma erlitten haben, waren die Frauen im Durchschnitt 5,2 Jahre älter als die Männer.

3.1.3. Frakturtyp und -lokalisierung

Die 201 ausgewerteten Patienten/-innen erlitten insgesamt 305 Frakturen. Eine Übersicht der klassifizierten Frakturen ist in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Morphologie der Wirbelkörperfrakturen nach AOSpine-Klassifikation und Auftreten eines traumatischen Vakuumphänomens

	AOSpine-Klassifikation	n Patienten/-innen (h _n in %)	n Frakturen (h _n in %)	Alter (SD) – Jahre	n Fx-VP initial / im Verlauf
Stabile Verletzungen	A1	101 (50,2)	192 (63,0)	51,0 (±20,0)	9/16
	A2	13 (6,5)	16 (5,2)	47,8 (±16,0)	0/3
	A3	41 (20,4)	46 (15,1)	55,0 (±16,9)	5/15
	A4	17 (8,5)	21 (6,9)	46,7 (±13,7)	1/6
Instabile Verletzungen	B	21 (10,4)	22 (7,2)	41,6 (±17,7)	0/6
	C	8 (4,0)	8 (2,6)	48,0 (±18,9)	1/1
Gesamt		201 (100)	305 (100)	49,2 (±17,7)	16/47

n = Anzahl; h_n = relative Häufigkeit; SD = Standardabweichung; Fx-VP = traumatisches Vakuumphänomen;

Die Kompressionsfraktur (Subtyp A1) war mit ca. 63 Prozent die häufigste Fraktur. Da sie oftmals bei Serien- oder Mehrfachfrakturen beobachtet wurde, verteilten sich 192 dieser Frakturen auf 101 Patienten/-innen. Splitfrakturen (Subtyp A2) (n=16; 5,2 %) wurden bei 13 Patienten/-innen beobachtet. Darüber hinaus konnten 46 (15,1 %) inkomplette (Subtyp A3) und 21 (6,9 %) komplette (Subtyp A4) Berstungsfrakturen identifiziert werden bei 41 respektive 17 Patienten/-innen. Die instabilen Typ-B- (n = 22; 17,7 %) und Typ-C-Verletzungen (n = 8; 2,6 %) wurden bei 21 respektive 8 Patienten/-innen beobachtet.

Die Verteilung der Frakturen entlang der thorakolumbalen Wirbelsäule ist in Abbildung 18 dargestellt. Typ-A-Verletzungen konnten auf jeder Höhe beobachtet werden, jedoch besonders häufig im Bereich des thorakolumbalen Übergangs. Dabei frakturierte der erste lumbale Wirbelkörper am häufigsten im Sinne einer Typ-A-Verletzung. Die selteneren Typ-B- und Typ-C-Verletzungen wurden zwar nicht auf jeder Höhe festgestellt, eine Häufung im Bereich des ersten lumbalen Wirbels konnte aber ebenfalls beobachtet werden.

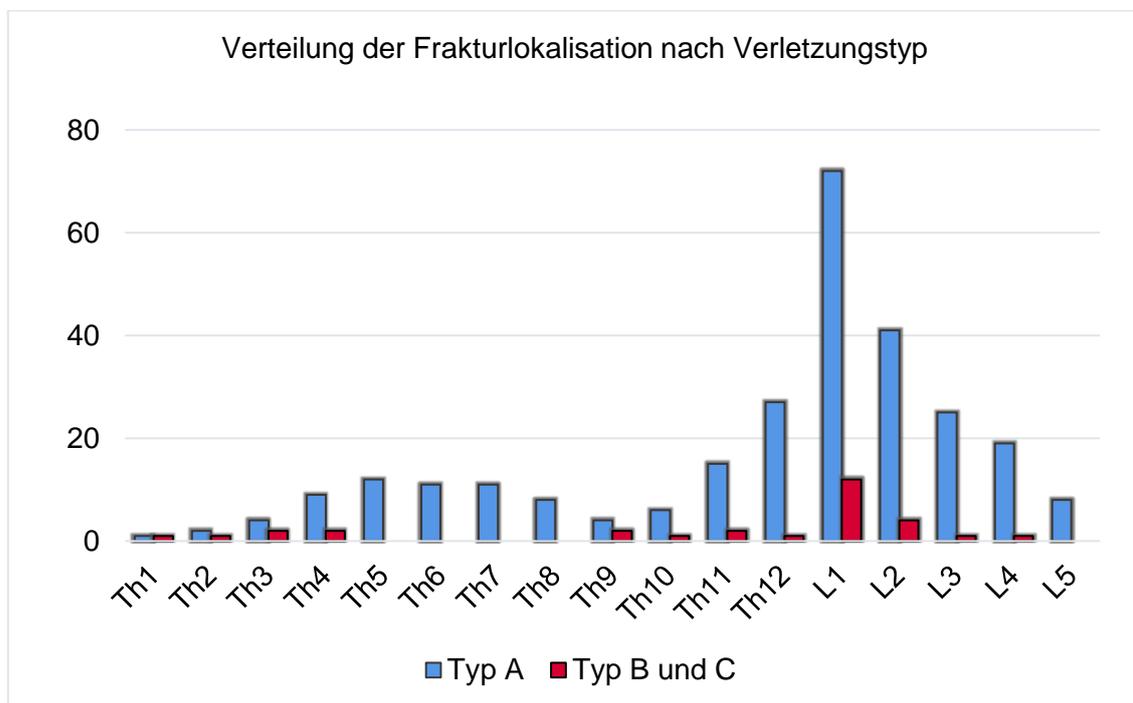


Abbildung 18: Verteilung der Frakturlokalisationen nach Verletzungstyp

Die Grafik zeigt die Verteilung der Frakturlokalisation. Dabei wurde zwischen Typ-A-Verletzungen sowie Typ-B-/Typ-C-Verletzungen (zusammengenommen) unterschieden.

3.1.4. Radiologische Parameter

Die Ergebnisse der Untersuchung des segmentalen GDW und des Cobb-Winkels sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Segmentaler GDW und Cobb-Winkel nach Frakturtyp und -lokalisierung

		Ø Segmentaler GDW – Grad (Kyphose)	Ø Segmentaler GDW – Grad (Lordose)	Ø Segmentaler Cobb-Winkel – Grad
Frakturtyp	A1	13,02	12,98	2,68
	A2	13,36	11,8	3,21
	A3	13,25	12,78	3,60
	A4	13,52	14,37	3,83
	B	16,23	12,85	3,49
	C	12,33	-	4,21
Frakturlokalisierung	C7/Th1	17,8	2,4	1,55
	Th1/2	25,37	-	1,45
	Th2/3	18,35	-	3,08
	Th3/4	18,83	-	3,18
	Th4/5	17,68	-	2,79
	Th5/6	22,87	-	3,77
	Th6/7	21,55	-	3,28
	Th7/8	19,75	-	3,06
	Th8/9	12,93	-	2,73
	Th9/10	10,32	1,1	3,93
	Th10/11	13,85	-	3,66
	Th11/12	13,2	4,9	3,28
	Th12/L1	11,82	8,53	3,02
	L1/2	7,03	11,87	3,00
	L2/3	6,38	10,79	3,32
	L3/4	16,75	15,18	2,6
	L4/5	14,2	20,1	1,74
		Gesamt	13,27	12,97

Ø = Durchschnitt; C = Halswirbel; Th = Brustwirbel; L = Lendenwirbel

3.1.5. Behandlungsspezifische Daten

Von 201 Patienten/-innen wurden primär 75 (37,3 %) konservativ und 126 (62,7 %) operativ behandelt. Die primär operativ versorgten Fälle umfassten dabei 15 (11,9 %) Augmentationsverfahren, 109 (86,5 %) dorsale und zwei (1,6 %) dorsoventrale Stabilisierungen. Im Verlauf wurde bei 21 (10,4 %) der Patienten/-innen weitere operative Therapie notwendig. Hierbei handelt es sich um zwei primär konservativ behandelte Patienten/-innen, die sekundär mit einer dorsalen Stabilisierung versorgt worden waren. In vier Fällen musste die dorsale Stabilisierung revidiert werden. Bei 15 primär dorsal versorgten Patienten/-innen wurde im Verlauf eine zusätzliche ventrale Versorgung erforderlich.

3.1.6. Vakuumphänomen

In den durchgeführten CT-Untersuchungen wurde das Vakuumphänomen in 125 Bandscheiben bei 68 Patienten/-innen identifiziert (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Inzidenz des Vakuumphänomens nach Art und Zeitpunkt der Feststellung

Art des VP	n Patienten/-innen mit VP *	n VP (h _n in %)	Alter (SD) – Jahre)
Traumatisch	46	58 (46,4)	48,2 (±16,4)
initial	16 (34,8)	16 (27,6)	60,6 (±15,9)
im Verlauf	30 (65,2)	42 (72,4)	41,5 (±12,5)
Degenerativ	37	67 (53,6)	58,9 (±17,1)
initial	35 (94,6)	65 (97,0)	60,4 (±16,4)
im Verlauf	2 (5,4)	2 (3,0)	34,0 (±9,9)
Gesamt	68	125 (100)	53,1 (±17,9)

n = Anzahl; VP = Vakuumphänomen; h_n = relative Häufigkeit; SD = Standardabweichung;
 * Die Anzahl der Patienten/-innen mit einem Vakuumphänomen entspricht nicht der Summe aus degenerativen und traumatischen Vakuumphänomenen aufgrund von teilweise gleichzeitigem Vorkommen beider Arten, daher auch keine relativen Häufigkeiten

In der Initialbildgebung konnten 16 (19,8 %) traumatische und 65 (80,2 %) degenerative Vakuumphänomene bei 16 (8,0 %) respektive 35 (17,4 %) Patienten/-innen beobachtet

werden. Das Durchschnittsalter dieser Patientengruppen war mit etwas über 60 Jahre vergleichbar. Von den 71 (35,3 %) Patienten/-innen, bei denen eine Verlaufsbildgebung vorhanden war, konnte bei zwei jeweils ein neues degeneratives Vakuumphänomen und bei 30 insgesamt 42 neue traumatische Vakuumphänomene festgestellt werden. Beide der neu festgestellten degenerativen Vakuumphänomene wurden in einem Segment beobachtet, das zwischen zwei frakturierten Segmenten lag.

In der Initialbildgebung wurde in vier Fällen ein traumatisches neben einem degenerativen Vakuumphänomen festgestellt. Bei der Betrachtung der Verlaufsbildgebung konnten zudem acht weitere Fälle einer Koinzidenz eines degenerativen neben einem traumatischen Vakuumphänomen beobachtet werden.

3.2. Vakuumphänomen in der Initialbildgebung

3.2.1. Zusammenhang mit den patientenspezifischen Daten

Bei der Betrachtung des Alters der Patienten/-innen (siehe Abbildung 19) konnte festgestellt werden, dass Patienten/-innen mit einem traumatischen Vakuumphänomen in der Initialbildgebung signifikant älter waren als die Patienten/-innen ohne ein Vakuumphänomen ($p = 0,018$). Dieser Zusammenhang ließ sich ebenfalls bei der frakturbezogenen Auswertung des traumatischen Vakuumphänomens beobachten ($p < 0,004$). Patienten/-innen mit einem degenerativen Vakuumphänomen in der Initialbildgebung waren ebenfalls signifikant älter als die Patienten/-innen ohne ein Vakuumphänomen ($p < 0,001$).

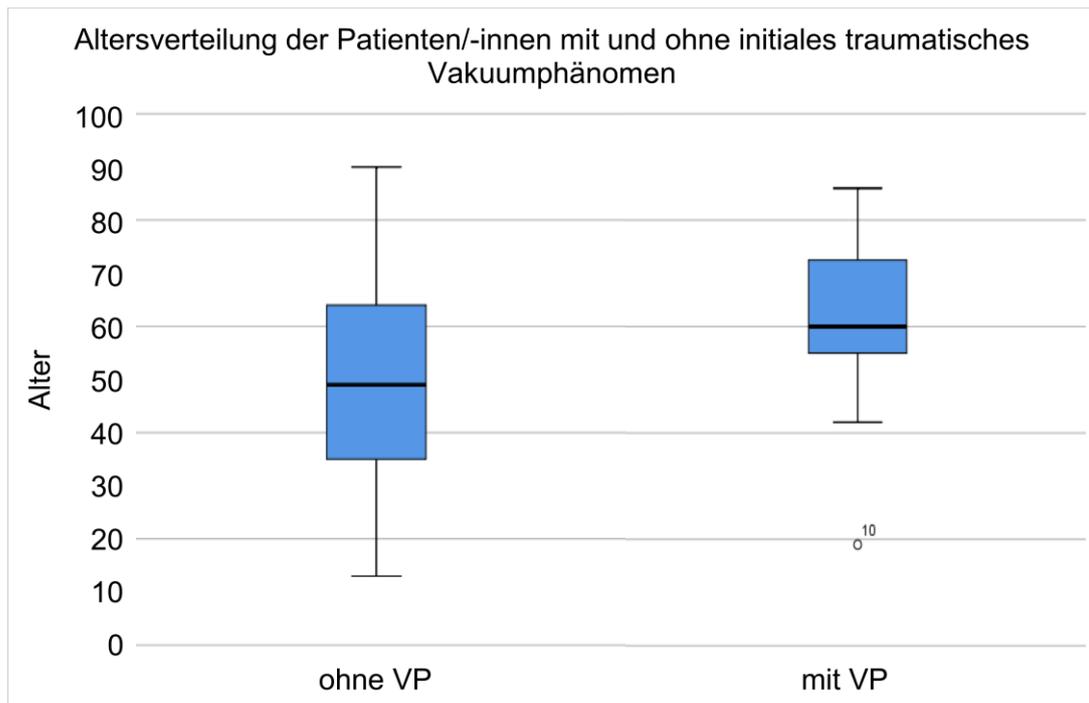


Abbildung 19: Altersverteilung der Patienten/-innen mit und ohne initiales traumatisches Vakuumphänomen

Die Grafik zeigt die Altersverteilung der Patienten/-innen mit und ohne initiales traumatisches Vakuumphänomen (VP) anhand von Boxplots.

Beim Vergleich von Männern und Frauen konnte kein signifikanter Unterschied bezüglich der Häufigkeit des Auftretens eines traumatischen Vakuumphänomens festgestellt werden, weder bei der patientenbezogenen Betrachtung ($p = 0,902$), noch bei der frakturbezogenen Betrachtung ($p = 0,588$). Beim Auftreten degenerativer Vakuumphänomene ließ sich ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern beobachten ($p = 0,198$).

3.2.2. Zusammenhang mit dem Unfallmechanismus

Bei der Prüfung des Zusammenhangs zwischen dem Unfallmechanismus und der Häufigkeit des Auftretens des Vakuumphänomens in der Initialbildgebung konnte sowohl bei den Patienten/-innen ($p = 0,007$) als auch bei den Frakturen ($p = 0,001$) ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Hierbei wurde das traumatische Vakuumphänomen bei Unfalltyp I (Sturz aus dem Stand) häufiger und bei Unfalltyp III (Sturz aus über drei Metern) seltener als statistisch erwartet beobachtet (siehe Abbildung 20)

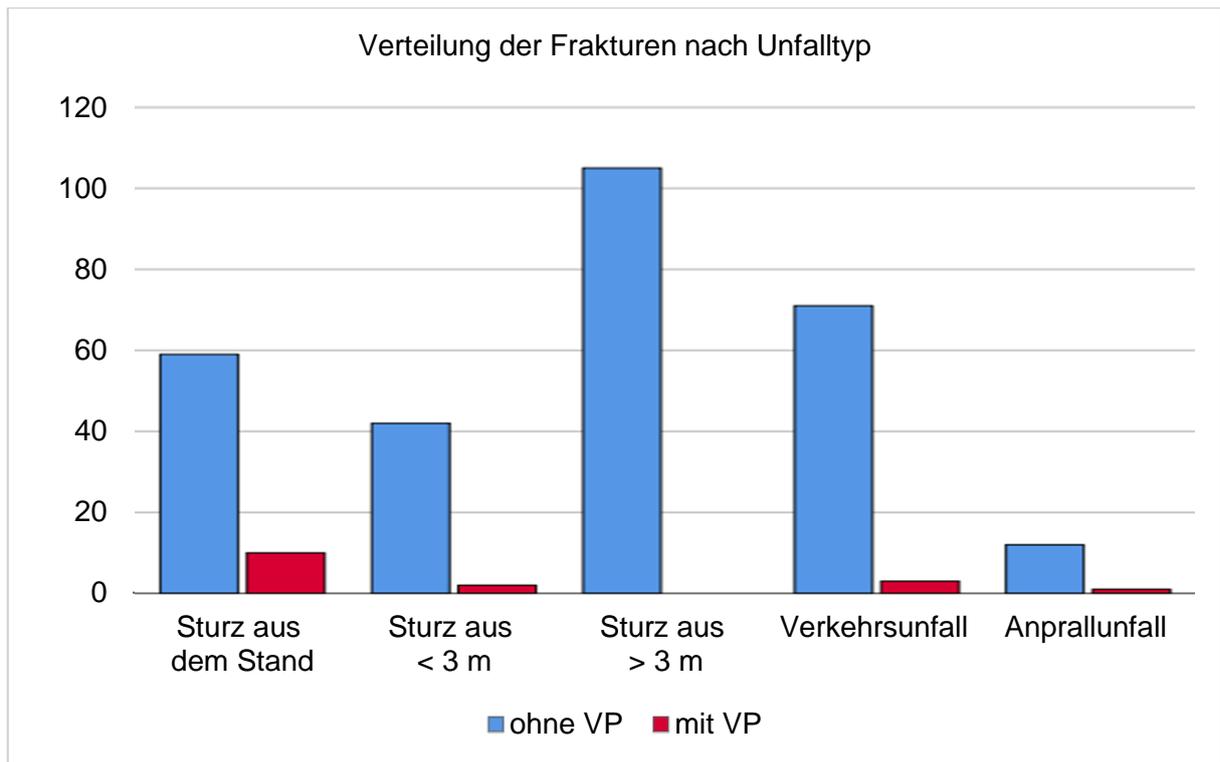


Abbildung 20: Verteilung der Frakturen nach Unfalltyp

Die Grafik zeigt die Verteilung der Wirbelkörperfrakturen bezüglich der unterschiedlichen Unfalltypen. Zusätzlich wurde nach Vorhandensein eines traumatischen Vakuumphänomens (VP) eingeteilt.

Ebenfalls konnten signifikante Unterschiede bei der patienten- ($p = 0,009$) und bei der frakturbezogenen Betrachtung ($p < 0,001$) beim Auftreten des traumatischen Vakuumphänomens in Abhängigkeit von der Rasanz des Traumas beobachtet werden. Dabei wurde ein Vakuumphänomen bei den Niedrigrasanztraumata häufiger festgestellt. Die Häufigkeit des Auftretens des degenerativen Vakuumphänomens zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Unfalltypen.

3.2.3. Zusammenhang mit dem Frakturtyp und der Frakturlokalisierung

Es konnte kein signifikanter Unterschied bezüglich der Häufigkeit des initialen traumatischen Vakuumphänomens zwischen den verschiedenen Frakturtypen beobachtet werden ($p = 0,422$). Des Weiteren ließen sich keine signifikanten Unterschiede bei der Häufigkeit des initialen traumatischen Vakuumphänomens in Abhängigkeit von der Frakturlokalisierung feststellen, weder bei der Betrachtung aller

Segmenthöhen ($p = 0,377$) noch nach Zuordnung zum thorakalen oder lumbalen Abschnitt ($p = 0,208$).

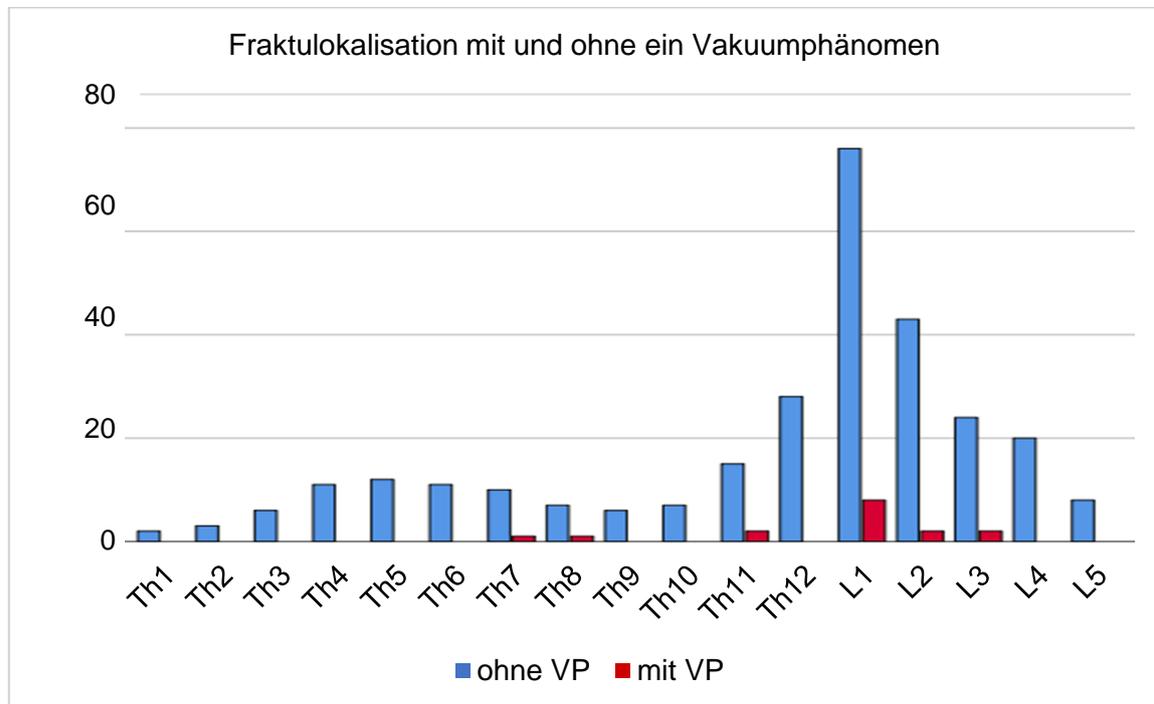


Abbildung 21: Frakturlokalisation mit und ohne ein Vakuumphänomen

Th = Brustwirbel, L = Lendenwirbel. Die Grafik zeigt die Verteilung der Frakturlokalisationen. Dabei wurde nach Vorhandensein eines initialen traumatischen Vakuumphänomens (VP) unterteilt.

3.2.4. Zusammenhang mit den radiologischen Parametern

Bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Auftreten des initialen traumatischen Vakuumphänomens und den radiologischen Parametern konnten allein bezüglich des Lordosewinkel ein signifikantes Ergebnis ($p = 0,012$) beobachtet werden. Dabei war der Mittelwert des Lordosewinkel bei vorhandenem initialem traumatischem Vakuumphänomen kleiner.

3.3. Traumatisches Vakuumphänomen und Frakturversorgung

Von den 75 (37,3 %) primär konservativ behandelten Patienten/-innen zeigten sechs ein initiales traumatisches Vakuumphänomen. Aufnahmen von zwei der Patienten/-innen wiesen ein neu aufgetretenes traumatisches Vakuumphänomen in der

Verlaufsbildgebung auf, die in elf Fällen vorlag. Von zwei primär konservativ versorgten Patienten, die sekundär dorsal versorgt werden mussten, zeigte einer bereits initial und einer erst im Verlauf ein traumatisches Vakuumphänomen auf.

Von den 15 (7,5 %) primär mit einem Augmentationsverfahren versorgten Patienten/-innen wiesen drei ein initiales traumatisches Vakuumphänomen auf. Keiner der sieben nachuntersuchten Patienten/-innen zeigte ein Vakuumphänomen im Verlauf.

Sieben (6,4 %) der 109 primär dorsal versorgten Patienten/-innen wiesen ein initiales traumatisches Vakuumphänomen auf. 28 der 53 nachuntersuchten Patienten/-innen zeigten ein traumatisches Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung. Von den vier revidierten Patienten zeigte einer gar kein, einer nur initial und zwei nur im Verlauf ein traumatisches Vakuumphänomen.

Die beiden primär dorsoventral versorgten Fälle wiesen in der Initialbildgebung kein Vakuumphänomen auf. In den 15 sekundär dorsoventral versorgten Fällen konnte bei 12 ein Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung (vor der zweiten Operation) beobachtet werden. Dabei wies keiner der sekundär dorsoventral versorgten Fälle ein traumatisches Vakuumphänomen in der Initialbildgebung auf.

Insgesamt konnten weder bei der Betrachtung der primären noch der sekundären Frakturversorgung signifikante Unterschiede ($p = 0,322$ respektive $p = 0,069$) zwischen Patienten/-innen mit und ohne initiales traumatisches Vakuumphänomen festgestellt werden. An dieser Stelle konnte nur eine patientenbezogene Auswertung erfolgen, da die Angaben zur Frakturversorgung einzig auf Ebene der Patienten/-innen erfasst wurden.

3.4. Traumatisches Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung

Bei 71 Patienten/-innen mit insgesamt 125 Frakturen wurde eine Verlaufsbildgebung durchgeführt. Die Prüfung der Altersunterschiede zwischen den Patienten/-innen mit und ohne ein im Verlauf entstandenes traumatisches Vakuumphänomen ergab keine signifikanten Unterschiede: $p = 0,206$ bei der patienten- und $p = 0,717$ bei der frakturbezogenen Betrachtung.

Ebenfalls konnten keine signifikanten Unterschiede bezüglich erlittenem Unfalltyp und bezüglich Rasanz gezeigt werden: $p = 0,733$ respektive $p = 0,540$ bei der patienten- und $p = 0,225$ respektive $p = 0,117$ bei der frakturbezogenen Betrachtung.

Signifikante Unterschiede ($p = 0,007$) ließen sich bei der Testung nach Frakturtypen feststellen. Dabei wurde ein traumatisches Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung bei einer Subtyp-A1-Verletzung seltener und bei einer Subtyp-A3-Verletzung häufiger als statistisch erwartet beobachtet.

Die Überprüfung hinsichtlich der Frakturlokalisierung ergab keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,258$) bei der segmentalen Betrachtung. Bei der Betrachtung des betroffenen Wirbelsäulenabschnitts zeigte sich jedoch, dass Frakturen des lumbalen Abschnitts signifikant häufiger ($p = 0,01$) ein traumatisches Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung aufwiesen.

Die Patienten/-innen mit und ohne ein traumatisches Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung zeigten keinen signifikanten Unterschied in der primären Frakturversorgung ($p = 0,238$). Bei der Testung der sekundären Versorgung wurde hingegen festgestellt, dass Patienten/-innen mit einem traumatischen Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung signifikant häufiger ($p = 0,009$) ventral stabilisiert wurden.

4. Diskussion

Das Vakuumphänomen der Bandscheibe ist mit einer Vielzahl an Wirbelsäulenerkrankungen assoziiert und als ein Zeichen degenerativer Bandscheibenveränderungen weitestgehend anerkannt.^{68,76,82–85} Dessen Rolle in Verbindung mit traumatischen Wirbelkörperfrakturen ist hingegen noch relativ unklar. Die bisherige systematische Untersuchung des Vakuumphänomens der Bandscheibe nach Wirbelkörperfrakturen beschränkt sich auf eine Arbeit von Lafforgue und Kollegen (1994), die 310 Patienten/-innen mit 945 Wirbelkörperfrakturen untersuchten. Darin waren jedoch lediglich 52 (5,5 %) Frakturen bei 43 (13,9 %) Patienten/-innen auf ein traumatisches Ereignis zurückzuführen. Die Ergebnisse basieren somit auf einer relativ kleinen Fallzahl. In der vorliegenden Arbeit wurden 201 Patienten/-innen mit 305 ausschließlich traumatisch bedingten Frakturen untersucht. Dies stellt somit das größte bisher untersuchte Patientenkollektiv bezüglich Fragestellungen zum traumatischen Vakuumphänomen dar. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse dieser Arbeit der aktuellen Literatur gegenübergestellt und diskutiert.

4.1. Traumatisches Vakuumphänomen in der Initialbildgebung

4.1.1. Zusammenhang mit den patientenspezifischen Daten

Die in dieser Arbeit beobachtete Prävalenz des traumatischen Vakuumphänomens in der initialen Bildgebung von ca. acht Prozent (siehe Tabelle 6) ist vergleichbar mit der von Lafforgue und Kollegen (1994) beobachteten Prävalenz von sieben Prozent. Das Durchschnittsalter des Patientenkollektivs in der vorliegenden Arbeit war im Vergleich dagegen deutlich höher (50,1 Jahre vs. 41 Jahre). Obwohl das Durchschnittsalter in der Arbeit von Lafforgue und Kollegen (1994) geringer war, konnte auch dort ein Zusammenhang zwischen höherem Alter und dem Auftreten des traumatischen Vakuumphänomens hergestellt werden. Dieser Zusammenhang ließ sich in der vorliegenden Arbeit bestätigen ($p = 0,018$). In beiden Arbeiten konnte darüber hinaus kein Zusammenhang zwischen dem Geschlecht und dem Auftreten eines traumatischen Vakuumphänomens gezeigt werden (Initialbildgebung $p = 0,902$; Verlaufsbildgebung $p = 0,344$). Erwartungsgemäß scheint das Geschlecht somit keinen Einfluss auf die Häufigkeit des traumatischen Vakuumphänomens zu haben.

4.1.2. Zusammenhang mit dem Unfallmechanismus

Der mehrfach beobachtete Zusammenhang zwischen der Art des Unfallmechanismus und dem daraus resultierenden Frakturtyp^{6,37} konnte in der vorliegenden Arbeit nicht gezeigt werden. Dies gilt sowohl für die Betrachtung nach Patienten/-innen ($p = 0,210$) als auch für die Betrachtung im Hinblick auf Frakturen ($p = 0,125$). Dennoch ließ sich beobachten, dass das initiale traumatische Vakuumphänomen beim Unfalltyp I (Sturz aus dem Stand) signifikant häufiger aufgetreten ist ($p = 0,007$ bei der patienten- und $p = 0,001$ bei der frakturbezogenen Betrachtung) als bei anderen Unfalltypen. Hierbei ist anzumerken, dass erhebliche Altersunterschiede der Patienten/-innen in den unterschiedlichen Unfalltyp-Gruppen beobachtet werden konnten. Dies könnte zumindest anteilig den beobachteten Zusammenhang zwischen Unfalltyp und der Häufigkeit des Auftretens eines traumatischen Vakuumphänomens erklären. Im Detail zeigte sich, dass das Alter der Patienten/-innen, die einen Unfalltyp I erlitten hatten, mit 63 Jahren (siehe Tabelle 3) deutlich höher war als das Alter bei den Patienten/-innen, die einen der anderen Unfalltypen erlitten hatten. Dementsprechend konnte ein signifikant häufigeres Auftreten des traumatischen Vakuumphänomens bei den Niedrigrasanztraumata als bei den Hochrasanztraumata beobachtet werden. Dieses könnte ebenfalls durch das durchschnittlich höhere Alter der Patienten/-innen erklärt werden.

Der Unfallmechanismus scheint somit nur bedingt eine Rolle bei der Entstehung des traumatischen Vakuumphänomens zu spielen. Aufgrund der bisher fehlenden Untersuchungen dieses Zusammenhangs lässt sich diese Beobachtung jedoch nicht vergleichend einordnen.

4.1.3. Zusammenhang mit dem Frakturtyp und der Frakturlokalisierung

In einzelnen Fallstudien wurde das Auftreten des Vakuumphänomens bei hochgradigen traumatischen Frakturen beschrieben.^{87,88} Jedoch konnte in der vorliegenden Arbeit kein Zusammenhang ($p = 0,422$) zwischen dem Frakturtyp und der Häufigkeit des Auftretens des initialen traumatischen Vakuumphänomens festgestellt werden.

Absolut betrachtet trat das initiale traumatische Vakuumphänomen im Bereich des thorakolumbalen Übergangs am häufigsten auf (siehe Abbildung 21). Dies ist mit der

aktuellen Literatur durchaus vergleichbar.^{6,37} Die statistische Prüfung liefert jedoch keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf die relative Häufigkeit des Auftretens des initialen traumatischen Vakuumphänomens in Abhängigkeit von der Frakturlokalisation ($p = 0,377$). Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass auch die meisten Frakturen im Bereich des thorakolumbalen Übergangs beobachtet wurden (siehe Abbildung 18), erscheint dies plausibel. Allerdings kann dieser Umstand auch der Tatsache geschuldet sein, dass in der vorliegenden Arbeit relativ wenige initiale traumatische Vakuumphänomene pro Segment (Minimum = 0; Maximum = 8) beobachtet werden konnten. Es ist denkbar, dass in Studien mit noch höheren Fallzahlen signifikante Ergebnisse für das Auftreten des Vakuumphänomens in Abhängigkeit von der Frakturlokalisation festgestellt werden könnten. In der vorliegenden Arbeit wie auch in der Arbeit von Lafforgue und Kollegen (1994) konnte ein solcher Zusammenhang jedoch nicht beobachtet werden.⁷⁸

4.1.4. Zusammenhang mit den radiologischen Parametern

Die Aussagekraft der statistischen Ergebnisse bezüglich des post-traumatischen GDW ist stark eingeschränkt. Einerseits weist jedes einzelne Wirbelsäulensegment bereits physiologisch einen unterschiedlichen GDW (meist ungleich 0 Grad) auf. Andererseits ist die Ex-post-Bestimmung und der Vergleich aufgrund der individuellen physiologischen Variabilität erschwert. Zudem ist anzumerken, dass die Interpretationsfähigkeit des GDW bei der Beurteilung von Serienfrakturen eingeschränkt ist. In der vorliegenden Arbeit konnte lediglich gezeigt werden, dass Frakturen mit einem initialen traumatischen Vakuumphänomen geringere Lordosewinkel aufweisen als Frakturen ohne Vakuumphänomen ($p = 0,012$). Aufgrund der genannten Limitationen wird im Folgenden das Ergebnis nicht weiterführend diskutiert, sondern verworfen.

4.1.5. Zusammenhang mit der Versorgung

An dieser Stelle lässt sich festhalten, dass in einigen Studien bereits die Rolle des Vakuumphänomens im Hinblick auf das Behandlungsergebnis bestimmter Operationstechniken untersucht wurde.^{66,89–91} Für das traumatische Vakuumphänomen

liegen solche Ergebnisse in Bezug auf die zugrunde gelegte Operationsstrategie jedoch noch nicht vor.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Auftreten des initialen traumatischen Vakuumphänomens keinen Zusammenhang mit der Modalität der primären Versorgung hatte ($p = 0,322$). Dies ist nicht verwunderlich, da das traumatische Vakuumphänomen kein Kriterium bei der Indikationsstellung einer operativen Versorgung darstellt. Es konnte ebenfalls kein Zusammenhang mit der sekundären Versorgung ($p = 0,069$) beobachtet werden. Das Vorhandensein des initialen traumatischen Vakuumphänomens scheint also keinen prädikativen Wert für die Notwendigkeit einer sekundären Versorgung zu haben. Trotzdem ist ein nicht signifikanter Trend in den Daten der vorliegenden Arbeit nachvollziehbar: Patienten/-innen, die ein Vakuumphänomen aufwiesen, wurden vermehrt additiv ventral versorgt.

4.2. Traumatisches Vakuumphänomen in der Verlaufsbildgebung

Mit dem Einbeziehen der Verlaufsbildgebung steigt die Gesamtprävalenz des traumatischen Vakuumphänomens auf ca. 23 Prozent. Allein unter den nachuntersuchten Patienten/-innen erreichte die Prävalenz einen Wert von 44 Prozent. Zu beachten ist jedoch, dass eine Verlaufsbildgebung in weniger als der Hälfte der Fälle durchgeführt worden war. Obwohl zu dem zeitlichen Verlauf des Auftretens von Vakuumphänomenen bislang keine Studien vorliegen, sind diese Daten dennoch von Relevanz. In vorangegangenen Untersuchungen wurde das zeitliche Auftreten eines traumatischen Vakuumphänomens nicht näher klassifiziert.⁷⁸ Zusammenfassend zeigen die aktuellen Daten nun erstmalig, dass die Verlaufsbildgebung zur Erfassung des traumatischen Vakuumphänomens eine wichtige Rolle zu spielen scheint. Es lassen sich zusätzlich eine Reihe von Aussagen ableiten, die sich von den bisherigen zum Teil deutlich unterscheiden. Darauf soll nachfolgend eingegangen werden.

Im Gegensatz zur Initialbildgebung hatte das Alter des/der Patienten/-in in der Verlaufsbildgebung keinen Einfluss ($p = 0,206$) auf das Auftreten eines traumatischen Vakuumphänomens. Ebenfalls scheinen der Unfallmechanismus und die Rasananz ($p = 0,540$ respektive $p = 0,733$ bei der patienten- und $p = 0,117$ respektive $p = 0,225$ bei der frakturbezogenen Betrachtung) keinen Einfluss auf das Auftreten des Vakuumphänomens in der Verlaufsbildgebung zu haben. Dies unterstützt die Vermutung,

dass sich die unterschiedlichen Häufigkeiten des initialen traumatischen Vakuumphänomens bei den einzelnen Unfalltypen durch die Altersunterschiede erklären lassen.

Im Gegensatz zum initialen traumatischen Vakuumphänomen konnte gezeigt werden, dass das im Verlauf entstandene traumatische Vakuumphänomen seltener bei einer Sybtyp-A1-Verletzung und häufiger bei einer Fraktur, die der Subtyp-A3-Verletzung zuzuordnen ist, aufgetreten ist ($p = 0,007$). Der Frakturtyp, insbesondere bei Beteiligung der Deckplatte des Wirbelkörpers, scheint somit einen Einfluss auf die Entstehung eines Vakuumphänomens im Verlauf zu haben. Während es keine vergleichbaren Untersuchungen in der bisher veröffentlichten Literatur gibt, erscheint die Beobachtung, dass eine stärkere Destruktion des Wirbelkörpers zu einer stärkeren Bandscheibenverletzung führt, plausibel. Darüber hinaus offenbarte die Prüfung des zeitlichen Abstandes bis zur Feststellung des traumatischen Vakuumphänomens in der Verlaufsbildgebung keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,142$ bei der patienten- und $p = 0,911$ bei der frakturbezogenen Betrachtung).

Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass Frakturen, die in der Verlaufsbildgebung ein Vakuumphänomen gezeigt hatten, signifikant häufiger ($p = 0,009$) sekundär ventral versorgt wurden. Das im Verlauf entstandene traumatische Vakuumphänomen scheint somit im Zusammenhang mit der sekundären ventralen Versorgung zu stehen und gewinnt dadurch an klinischer Relevanz.

4.3. Degeneratives Vakuumphänomen

Die Angaben zur Prävalenz des degenerativen Vakuumphänomens variieren in Abhängigkeit von der Untersuchungstechnik und dem Alter der Patienten/-innen der Studien erheblich. Dabei wurde in vorangegangenen Studien eine Prävalenz von zwei bis 46 Prozent beschrieben.^{68,76–81} Die in dieser Arbeit beobachtete Prävalenz des degenerativen Vakuumphänomens von 16,9 Prozent (siehe Tabelle 6) lässt sich weitestgehend in eine Linie mit den bisherigen Beobachtungen einordnen und bestätigt die radiologische Aufarbeitung des Patientenkollektivs der vorliegenden Untersuchung. Ebenfalls konnte aktuell der mehrfach in der Literatur beschriebene Zusammenhang zwischen höherem Alter und der Häufigkeit des Auftretens des degenerativen Vakuumphänomens bestätigt werden ($p < 0,001$).^{68,76–81}

In vorangegangenen Arbeiten wurden ein gehäuftes Auftreten des degenerativen Vakuumphänomens vor allem im unteren lumbalen Wirbelsäulenabschnitt beschrieben. Im Rahmen der deskriptiven Statistik der vorliegenden Arbeit konnte festgestellt werden, dass das degenerative Vakuumphänomen gehäuft im unteren lumbalen und im unteren thorakalen Abschnitt auftrat. Die Wirbelsäulensegmente Th9/10 und L5/S1 waren dabei die am häufigsten betroffenen.

4.4. Abgrenzung des traumatischen vom degenerativen Vakuumphänomen

Um die klinische Relevanz des traumatischen Vakuumphänomens besser einordnen zu können, ist eine genauere Abgrenzung zum degenerativen Vakuumphänomen notwendig. Die Einteilung der Vakuumphänomene im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde in Anlehnung an die Publikation von Lafforgue und Kollegen (1994) vorgenommen.⁷⁸ Diese Einteilung schließt jedoch keineswegs aus, dass ein auf Frakturhöhe beobachtetes Vakuumphänomen nicht auch degenerativ bedingt sein kann und bereits vor dem Trauma bestanden hat. Dieser Umstand wurde bereits in der genannten Publikation ausführlich diskutiert und bleibt auch für die vorliegende Arbeit relevant.⁷⁸ Folgende Überlegung besteht dabei weiterhin: Es ist relativ unwahrscheinlich, dass ein degeneratives Vakuumphänomen, welches zum Zeitpunkt des Traumas bereits vorhanden war, ausgerechnet die Bandscheibe des frakturierten Wirbelsäulensegment betrifft. Insbesondere wenn im abgebildeten Bereich der Wirbelsäule nur ein einzelnes Vakuumphänomen zu beobachten ist.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine höhere Anzahl an traumatischen Frakturen als in der Publikation von Lafforgue und Kollegen (1994) berücksichtigt. Dies sollte es erlauben zuverlässigere Aussagen bezüglich des traumatischen Vakuumphänomens treffen zu können. Trotzdem muss zusammenfassend gesagt werden, dass in der vorliegenden Arbeit die Abgrenzung zwischen einem durch die Fraktur entstandenen traumatischen Vakuumphänomen und einem inzidentell die gleiche Bandscheibe betreffenden degenerativen Vakuumphänomen anhand der Initialbildgebung nicht sicher möglich ist. Dies lässt sich unter anderem damit begründen, dass der bereits häufig gezeigte Zusammenhang zwischen höherem Alter und dem Auftreten eines degenerativen Vakuumphänomens in der vorliegenden Arbeit ebenso im Zusammenhang mit dem traumatischen Vakuumphänomen beobachtet wurde. Dabei war auch der

Altersdurchschnitt der beiden Patientengruppen annähernd gleich. Auch konnte kein Zusammenhang zwischen dem Auftreten des traumatische Vakuumphänomen und dem Frakturtyp festgestellt werden. Ein Umstand, welcher ebenso mit einem degenerativen Vakuumphänomen vereinbar ist. Die Verteilungsmuster der Vakuumphänomene scheinen sich zwar bei direkter Gegenüberstellung zu unterscheiden, diese Unterschiede sind jedoch für eine sichere Abgrenzung nicht ausreichend. Zum Zeitpunkt der Initialbildgebung wäre es daher zutreffender, auch im Kontext eines Traumas zunächst die Bezeichnung eines „frakturassoziierten“ statt „traumatischen“ Vakuumphänomens zu verwenden.

Bei der Berücksichtigung der Verlaufsbildgebung scheint eine Fraktur das Auftreten eines Vakuumphänomens hingegen zu begünstigen. So traten fast alle im Verlauf entstandenen Vakuumphänomene in der Bandscheibe des frakturierten Wirbelsäulensegments auf. Deshalb ist die Bezeichnung als „traumatisches“ Vakuumphänomen hier eher zutreffend. In der statistischen Auswertung zeigten sich zudem Unterschiede zu den in der Initialbildgebung festgestellten Vakuumphänomenen auf. Der zeitliche Abstand der Verlaufsbildgebung zum Unfalltag hatte dabei keinen Einfluss auf das Auftreten des Vakuumphänomens. So scheint eine Fraktur, insbesondere mit Beteiligung der Endplatte, die Entstehung eines Vakuumphänomens zu begünstigen. Dies ist mit den bisherigen pathophysiologischen Theorien über den Ursprung des Vakuumphänomens, bei denen die Endplatte eine entscheidende Rolle spielte, vereinbar.^{72,83,86}

4.5. Limitationen

4.5.1. Selektionsbias

Der Selektionsbias stellt ein grundsätzliches Problem vieler Studien dar, von dem auch die vorliegende Arbeit betroffen ist. Die Untersuchung von Patienten/-innen, die eine traumatische Wirbelsäulenverletzung erlitten haben, hat jedoch den Vorteil einer höheren Heterogenität des Patientenkollektivs gegenüber Untersuchungen anderer Pathologien. Dadurch wird der Effekt des Selektionsbias reduziert. Die zusätzliche Auswertung der Patienten/-innen anhand der Verlaufsbildgebung verstärkt hingegen den Effekt des Selektionsbias. Dadurch wurde die Prävalenz des traumatischen Vakuumphänomens in

der Verlaufsbildgebung möglicherweise überschätzt. Der Frakturtyp allein scheint für diese Vorauswahl nicht entscheidend gewesen zu sein, da die Verteilung der Frakturtypen unter den Patienten/-innen mit einer Verlaufsbildgebung ähnlich zu der des gesamten Kollektivs war.

4.5.2. Klassifikation

Jede Aufarbeitung der Daten mittels einer Klassifikation geht mit einem Informationsverlust einher. Bereits bei der primären Datenerfassung unterlagen die verfügbaren Informationen zum Unfallmechanismus sehr großen Qualitätsunterschieden, sodass der Informationsverlust durch die Klassifizierung der Daten in diesem Fall relativ groß ist.

4.5.3. Aussagekraft der Computertomographie

Wie einige Publikationen zeigen, variiert die Prävalenz des Vakuumphänomens der Bandscheibe in Abhängigkeit von der Untersuchungsposition und der Untersuchungstechnik. Die CT zählt dabei zu einer der präzisesten Untersuchungstechniken für die Diagnostik des Vakuumphänomens. Außerdem ist die CT, neben der MRT, am sensitivsten.^{68,92,93} Gleichzeitig wurde gezeigt, dass die CT-Untersuchung das Auftreten eines Vakuumphänomens begünstigt.^{94,95} Die Ursache dafür liegt in der Tatsache begründet, dass die liegende Position des/der Patienten/-in während der Untersuchung zur Folge hat, dass die biomechanisch relevanten Zustände im Bewegungssegment, vor allem die axiale Belastung, nicht gegeben sind. Dies und die zusätzliche dorsale Extension, die damit einhergeht, können das Auftreten des Vakuumphänomens unabhängig von der zugrunde liegenden Pathologie begünstigen. So erschwert der Einsatz der CT die Abgrenzung zwischen traumatischen, degenerativ und gar nicht pathologischen Vakuumphänomenen. Die Prävalenz der pathologischen Vakuumphänomene wird dadurch überschätzt.

4.6. Ausblick

Eine zweifache Schwerpunktsetzung ist für zukünftige Untersuchungen zum Thema traumatisches Vakuumphänomen und seiner Abgrenzung vom degenerativen Vakuumphänomen von besonderem Interesse. Einerseits bietet es sich an, einen stärkeren Fokus auf die Verlaufsbildgebung zu setzen. Für eine robustere Statistik müsste dabei ein größeres Patientenkollektiv, welches eine Verlaufsbildgebung zu standardisierten Zeitpunkten aufweist, akquiriert werden. Andererseits wäre es hilfreich, das traumatische Vakuumphänomen zum Zeitpunkt der Initialbildgebung besser einordnen zu können, wenn man nämlich die Patienten/-innen betrachtet, die zusätzlich eine CT- oder MRT-Voruntersuchung aufweisen. Im Kontext von traumatischen Frakturen ist Letzteres jedoch schwierig zu realisieren. Hier wäre möglicherweise sinnvoll, in zukünftigen Erhebungen das Patientenkollektiv um die Patienten/-innen mit pathologischen Frakturen zu erweitern, da diese häufiger eine CT- oder MRT-Voruntersuchung aufweisen. In jedem Fall erscheint eine genauere Berücksichtigung begleitender degenerativer Vakuumphänomene sinnvoll.

Um den mit der CT assoziierten Limitationen zukünftig besser entgegenzuwirken, kann es sich als hilfreich erweisen, zur Beurteilung zusätzlich Röntgenaufnahmen der jeweiligen Patienten/-innen in stehender Position heranzuziehen. Jedoch ist an dieser Stelle anzumerken, dass die Untersuchung im Stehen nicht bei jedem/r Patienten/-in mit traumatischen Wirbelsäulenverletzungen möglich ist.

Darüber hinaus zeigten einige Untersuchungen Unterschiede hinsichtlich Morphologie und Anordnung des Vakuumphänomens in Abhängigkeit vom Grad der Degeneration der Bandscheibe und der zugrunde liegenden Pathologie.^{68,76,81} Bislang gibt es jedoch keine Untersuchungen der pathomorphologischen Unterschiede des traumatischen Vakuumphänomens. Es ist allerdings durchaus denkbar, dass die Morphologie des Vakuumphänomens zur besseren Beurteilung der Ätiologie herangezogen werden kann.

Ein Vorteil der MRT-Untersuchung könnte zukünftig ebenfalls zum Tragen kommen, nämlich dass neben dem Vakuumphänomen weitere Zeichen des Bandscheibenschadens aufgezeigt werden können.^{92,93} Der Einsatz der MRT stellt jedoch im Rahmen des Polytraumamanagements nicht die Standarduntersuchung dar. Die neuen Entwicklungen im Bereich der CT, insbesondere der Dual-Energy-CT, können hierbei eine Brücke schlagen und in den zukünftigen Untersuchungen ebenfalls mit

einbezogen werden. Der Einsatz der Dual-Energy-CT ermöglicht im Vergleich zur konventionellen CT nicht nur eine bessere Erkennung von Knochenmarksödemen,⁹⁶ sondern auch von Weichteilen wie ligamentären und knorpeligen Strukturen.^{97,98} Neueste Studien zur Dual-Energy-CT-Diagnostik zeigen zudem ähnliche Ergebnisse bei der Beurteilung von Bandscheibenschäden wie bei der MRT.⁹⁹

5. Literaturverzeichnis

1. Hu R, Mustard CA, Burns C. Epidemiology of incident spinal fracture in a complete population. *Spine (Phila Pa 1976)* 1996;21:492–9.
2. Hebert JS, Burnham RS. The effect of polytrauma in persons with traumatic spine injury. A prospective database of spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976)* 2000;25:55–60.
3. Gertzbein SD. Scoliosis Research Society. Multicenter spine fracture study. *Spine (Phila Pa 1976)* 1992;17:528–40.
4. Bengnér U, Johnell O, Redlund-Johnell I. Changes in incidence and prevalence of vertebral fractures during 30 years. *Calcif Tissue Int* 1988;42:293–6.
5. Leucht P, Fischer K, Muhr G, Mueller EJ. Epidemiology of traumatic spine fractures. *Injury* 2009;40:166–72.
6. Reinhold M, Knop C, Beisse R, Audigé L, Kandziora F, Pizanis A, Pranzl R, Gercek E, Schultheiss M, Weckbach A, Bühren V, Blauth M. Operative Behandlung traumatischer Frakturen der Brust- und Lendenwirbelsäule, Teil I: Epidemiologie [Operative treatment of traumatic fractures of the thoracic and lumbar spinal column. Part I: epidemiology]. *Unfallchirurg* 2009;112:33-42, 44-5.
7. Fick R. Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke unter Berücksichtigung der Bewegenden Muskeln, Zweiter Teil: Allgemeine Gelenk- und Muskelmechanik. Jena: Verlag von Gustav Fischer, 1910. 414 p. (Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke : unter Berücksichtigung der bewegenden Muskeln; vol. 2).
8. Böhler L. Die Technik der Knochenbruchbehandlung. 1. 12th ed. Wien: Wilhelm Maudrich, 1951.
9. Nicoll EA. Fractures of the dorso-lumbar spine. *J Bone Joint Surg Br* 1949;31B:376–94.
10. Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine (Phila Pa 1976)* 1983;8:817–31.
11. Holdsworth F. Fractures, dislocations, and fracture-dislocations of the spine. *J Bone Joint Surg Am* 1970;52:1534–51.
12. Vaccaro AR, Lehman RA, Hurlbert RJ, Anderson PA, Harris M, Hedlund R, Harrop J, Dvorak M, Wood K, Fehlings MG, Fisher C, Zeiller SC, Anderson DG, Bono CM, Stock GH, Brown AK, Kuklo T, Oner FC. A new classification of thoracolumbar injuries, The

importance of injury morphology, the integrity of the posterior ligamentous complex, and neurologic status. *Spine (Phila Pa 1976)* 2005;30:2325–33.

13. Magerl F, Aebi M, Gertzbein SD, Harms J, Nazarian S. A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. *Eur Spine J* 1994;3:184–201.

14. Vaccaro AR, Oner C, Kepler CK, Dvorak M, Schnake K, Bellabarba C, Reinhold M, Aarabi B, Kandziora F, Chapman J, Shanmuganathan R, Fehlings M, Vialle L. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system, Fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine (Phila Pa 1976)* 2013;38:2028–37.

15. Verheyden AP, Spiegl UJ, Ekkerlein H, Gercek E, Hauck S, Josten C, Kandziora F, Katscher S, Kobbe P, Knop C, Lehmann W, Meffert RH, Müller CW, Partenheimer A, Schinkel C, Schleicher P, Scholz M, Ulrich C, Hoelzl A. Treatment of Fractures of the Thoracolumbar Spine, Recommendations of the Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU). *Global Spine J* 2018;8:34S-45S.

16. Reinhold M, Knop C, Beisse R, Audigé L, Kandziora F, Pizanis A, Pranzl R, Gercek E, Schultheiss M, Weckbach A, Bühren V, Blauth M. Operative treatment of 733 patients with acute thoracolumbar spinal injuries: comprehensive results from the second, prospective, Internet-based multicenter study of the Spine Study Group of the German Association of Trauma Surgery. *Eur Spine J* 2010;19:1657–76.

17. Josten C, Katscher S, Gonschorek O. Therapiekonzepte bei Frakturen des thorakolumbalen Überganges und der Lendenwirbelsäule [Treatment concepts for fractures of the thoracolumbar junction and lumbar spine]. *Orthopade* 2005;34:1021–32.

18. Bornemann R, Koch EMW, Wollny M, Pflugmacher R. Treatment options for vertebral fractures an overview of different philosophies and techniques for vertebral augmentation. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 2014;24 Suppl 1:131-43.

19. Aumüller G, Wurzinger LJ. Anatomie, 208 Tabellen. 2nd ed. Stuttgart: Thieme, 2010. 1218 p. (Duale Reihe). ISBN: 978-3-13-136042-7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1055/b-002-46981>.

20. Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Prometheus. LernAtlas der Anatomie. Band 1, Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. 4th ed., 2014. 1 Online-Ressource (XV, 613 Seiten). ISBN: 9783132404908. Available from: <http://dx.doi.org/10.1055/b-004-129726>.

21. Bommas-Ebert U, Teubner P, Voß R, Krahn V. Kurzlehrbuch Anatomie und Embryologie, 46 Tabellen. 3rd ed. Stuttgart: Thieme, 2011. 478 p. ISBN: 9783131355331. Available from: <http://dx.doi.org/10.1055/b-002-21536>.

22. Joaquim AF, Patel AA. Relationships between the Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen Spine System and the Thoracolumbar Injury Classification System: an analysis of the literature. *J Spinal Cord Med* 2013;36:586–90.
23. 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;65:461–73.
24. Watson-Jones R. The results of postural reduction of fractures of the spine. *J Bone Joint Surg Am* 1938;20:567–86.
25. Schünke M. Funktionelle Anatomie, Topografie und Funktion des Bewegungssystems. 2nd ed. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 2014. 391 p. ISBN: 3131694025.
26. White AA, Panjabi MM. Clinical biomechanics of the spine. 2nd ed. Philadelphia, Pa.: Lippincott, 1990. 722 p. ISBN: 0-397-50720-8.
27. Junghans H. Das Bewegungssegment der Wirbelsäule und seine praktische Bedeutung. *Arch Orthop Putti* 1954;104:87–91.
28. Inoue M, Mizuno T, Sakakibara T, Kato T, Yoshikawa T, Inaba T, Kasai Y. Trajectory of instantaneous axis of rotation in fixed lumbar spine with instrumentation. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* 2017;12:177.
29. Le Huec J-C, Richards J, Tsoupras A, Price R, Léglise A, Faundez AA. The mechanism in junctional failure of thoraco-lumbar fusions. Part I, Biomechanical analysis of mechanisms responsible of vertebral overstress and description of the cervical inclination angle (CIA). *Eur Spine J* 2018;27:129–38.
30. Hettrich CM, Browner B. High-energy trauma. *Best Pract Res Clin Rheumatol* 2012;26:281–8.
31. Kohn MA, Hammel JM, Bretz SW, Stangby A. Trauma team activation criteria as predictors of patient disposition from the emergency department. *Acad Emerg Med* 2004;11:1–9.
32. Cooper C, Dunham CM, Rodriguez A. Falls and major injuries are risk factors for thoracolumbar fractures, Cognitive impairment and multiple injuries impede the detection of back pain and tenderness. *J Trauma* 1995;38:692–6.
33. Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie. S3 – Leitlinie Polytrauma/Schwerverletzten-Behandlung, 2019. (Accessed April 26, 2020, at https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-019l_S3_Polytrauma_Schwerverletzten-Behandlung_2017-08.pdf).

34. Lowe DK, Oh GR, Neely KW, Peterson CG. Evaluation of injury mechanism as a criterion in trauma triage. *Am J Surg* 1986;152:6–10.
35. Sasser SM, Hunt RC, Faul M, Sugerman D, Pearson WS, Dulski T, Wald MM, Jurkovich GJ, Newgard CD, Lerner EB. Guidelines for field triage of injured patients, Recommendations of the National Expert Panel on Field Triage, 2011. *MMWR Recomm Rep* 2012;61:1–20.
36. Lenarz CJ, Place HM. Evaluation of a new spine classification system, does it accurately predict treatment? *J Spinal Disord Tech* 2010;23:192–6.
37. Jacobs C, Hartwig T, Rößler PP, Meila D, Nikiforov I, Plöger MM, Burger C, Scheidt S. Einfluss des Unfallmechanismus auf die Wirbelkörperfraktur [Influence of trauma mechanisms on thoracic and lumbar spinal fractures]. *Unfallchirurg* 2018;121:739–46.
38. Bohndorf K, Imhof H, Wörtler K. *Radiologische Diagnostik der Knochen und Gelenke*. 4th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2017. 544 p. ISBN: 978-3-13-241497-6.
39. Daffner RH, Deeb ZL, Rothfus WE. The posterior vertebral body line, Importance in the detection of burst fractures. *AJR Am J Roentgenol* 1987;148:93–6.
40. Atlas SW, Regenbogen V, Rogers LF, Kim KS. The radiographic characterization of burst fractures of the spine. *AJR Am J Roentgenol* 1986;147:575–82.
41. Jelsma RK, Kirsch PT, Rice JF, Jelsma LF. The radiographic description of thoracolumbar fractures. *Surg Neurol* 1982;18:230–6.
42. Wintermark M, Mouhsine E, Theumann N, Mordasini P, van Melle G, Leyvraz PF, Schnyder P. Thoracolumbar spine fractures in patients who have sustained severe trauma, Depiction with multi-detector row CT. *Radiology* 2003;227:681–9.
43. Campbell SE, Phillips CD, Dubovsky E, Cail WS, Omary RA. The value of CT in determining potential instability of simple wedge-compression fractures of the lumbar spine. *AJNR Am J Neuroradiol* 1995;16:1385–92.
44. Dai L-Y, Wang X-Y, Jiang L-S, Jiang S-D, Xu H-Z. Plain radiography versus computed tomography scans in the diagnosis and management of thoracolumbar burst fractures. *Spine (Phila Pa 1976)* 2008;33:E548-52.
45. Antevil JL, Sise MJ, Sack DI, Kidder B, Hopper A, Brown CVR. Spiral computed tomography for the initial evaluation of spine trauma, A new standard of care? *J Trauma* 2006;61:382–7.
46. Berry GE, Adams S, Harris MB, Boles CA, McKernan MG, Collinson F, Hoth JJ, Meredith JW, Chang MC, Miller PR. Are plain radiographs of the spine necessary during

evaluation after blunt trauma? Accuracy of screening torso computed tomography in thoracic/lumbar spine fracture diagnosis. *J Trauma* 2005;59:1410-3; discussion 1413.

47. Sheridan R, Peralta R, Rhea J, Ptak T, Novelline R. Reformatted visceral protocol helical computed tomographic scanning allows conventional radiographs of the thoracic and lumbar spine to be eliminated in the evaluation of blunt trauma patients. *J Trauma* 2003;55:665–9.

48. Hauser CJ, Visvikis G, Hinrichs C, Eber CD, Cho K, Lavery RF, Livingston DH. Prospective validation of computed tomographic screening of the thoracolumbar spine in trauma. *J Trauma* 2003;55:228-34; discussion 234-5.

49. Roos JE, Hilfiker P, Platz A, Desbiolles L, Boehm T, Marincek B, Weishaupt D. MDCT in emergency radiology, Is a standardized chest or abdominal protocol sufficient for evaluation of thoracic and lumbar spine trauma? *AJR Am J Roentgenol* 2004;183:959–68.

50. Shah LM, Ross JS. Imaging of Spine Trauma. *Neurosurgery* 2016;79:626–42.

51. Bernstein MP, Baxter AB, Harris JH JR. Imaging Thoracolumbar Spine Trauma, 2016. (Accessed April 9, 2020, at <https://radiologykey.com/imaging-thoracolumbar-spine-trauma/>).

52. McCormack T, Karaikovic E, Gaines RW. The load sharing classification of spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976)* 1994;19:1741–4.

53. Reinhold M, Audigé L, Schnake KJ, Bellabarba C, Dai L-Y, Oner FC. AO spine injury classification system: a revision proposal for the thoracic and lumbar spine. *Eur Spine J* 2013;22:2184–201.

54. AOSpine International. AOSpine Thoracolumbar Classification System, 2018. (Accessed September 23, 2019, at https://aospine.aofoundation.org/-/media/project/aocmf/aospine/documents/clinical-library-and-tools/classifications/aos_pcard100x150_thoracocs_mar18.pdf?la=en&hash=E2D9CA6C2C4023761DC298C030FD5EF9527B3C54).

55. Boos N, Aebi M, eds. *Spinal Disorders, Fundamentals of Diagnosis and Treatment*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. ISBN: 978-3-540-69091-7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69091-7>.

56. Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie. S1-Leitlinie: Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule, 2018. (Accessed April 26, 2020, at https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-028l_S1_Verletzungen-der-thorakolumbalen-Wirbels%C3%A4ule_2019-02_.pdf).

- 57.** Rauschmann M, Winking M, Arand M, Stücker R. Wirbelsäule interdisziplinär, Operative und konservative Therapie. Börm W, Meyer F, Bullmann V, Knop C, eds. Stuttgart: Schattauer, 2017. 716 p.
- 58.** Bailey CS, Urquhart JC, Dvorak MF, Nadeau M, Boyd MC, Thomas KC, Kwon BK, Gurr KR, Bailey SI, Fisher CG. Orthosis versus no orthosis for the treatment of thoracolumbar burst fractures without neurologic injury, A multicenter prospective randomized equivalence trial. *Spine J* 2014;14:2557–64.
- 59.** Shamji MF, Roffey DM, Young DK, Reindl R, Wai EK. A pilot evaluation of the role of bracing in stable thoracolumbar burst fractures without neurological deficit. *J Spinal Disord Tech* 2014;27:370–5.
- 60.** Maestretti G, Cremer C, Otten P, Jakob RP. Prospective study of standalone balloon kyphoplasty with calcium phosphate cement augmentation in traumatic fractures. *Eur Spine J* 2007;16:601–10.
- 61.** Ewerbeck V, Holz F, Krämer K-L, Pfeil J, Sabo D, Wentzensen A. Standardverfahren in der operativen Orthopädie und Unfallchirurgie. 3rd ed. Stuttgart: Thieme, 2007. 922 p. ISBN: 3-13-100533-5. Available from: <http://dx.doi.org/10.1055/b-001-39>.
- 62.** La Maida GA, Luceri F, Ferraro M, Ruosi C, Mineo GV, Misaggi B. Monosegmental vs bisegmental pedicle fixation for the treatment of thoracolumbar spine fractures. *Injury* 2016;47 Suppl 4:35-43.
- 63.** Lange U, Edeling S, Knop C, Bastian L, Oeser M, Krettek C, Blauth M. Anterior vertebral body replacement with a titanium implant of adjustable height, A prospective clinical study. *Eur Spine J* 2007;16:161–72.
- 64.** Gejo R, Matsui H, Kawaguchi Y, Ishihara H, Tsuji H. Serial changes in trunk muscle performance after posterior lumbar surgery. *Spine (Phila Pa 1976)* 1999;24:1023–8.
- 65.** Prokop A, Löhlein F, Chmielnicki M, Volbracht J. Minimal-invasive perkutane Instrumentation bei Wirbelsäulenfrakturen [Minimally invasive percutaneous instrumentation for spine fractures]. *Unfallchirurg* 2009;112:621-4, 626-8.
- 66.** Liao JC, Lu ML, Niu CC, Chen WJ, Chen LH. Surgical outcomes of degenerative lumbar spondylolisthesis with anterior vacuum disc: can the intervertebral cage overcome intradiscal vacuum phenomenon and enhance posterolateral fusion? *J Orthop Sci* 2014;19:851–9.

67. Iguchi T, Ozaki T, Chin T, Tsumura N, Kanemura A, Kasahara K, Kuroda R, Doita M, Nishida K. Intimate relationship between instability and degenerative signs at L4/5 segment examined by flexion-extension radiography. *Eur Spine J* 2011;20:1349–54.
68. Knutsson F. The Vacuum Phenomenon in the Intervertebral Discs. *Acta Radiologica* 1942;23:173–9.
69. Magnusson W. Uber Die Bedingungen Des Hervortretens Der Wirklichen Gelenkspalte Auf Dem Rontgenbilde. *Acta Radiologica* 1937;18:733–41.
70. Ford LT, Gilula L. A., Murphy WA, Gado M. Analysis of gas in vacuum lumbar disc. *AJR Am J Roentgenol* 1977;128:1056–7.
71. Yoshida H, Shinomiya K, Nakai O, Kurosa Y, Yamaura I. Lumbar nerve root compression caused by lumbar intraspinal gas. Report of three cases. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997;22:348–51.
72. Coulier B. The spectrum of vacuum phenomenon and gas in spine. *JBR-BTR* 2004;87:9–16.
73. Morishita K, Kasai Y, Uchida A. Clinical symptoms of patients with intervertebral vacuum phenomenon. *Neurologist* 2008;14:37–9.
74. Kasai Y, Takegami K, Uchida A. Change of barometric pressure influences low back pain in patients with vacuum phenomenon within lumbar intervertebral disc. *J Spinal Disord Tech* 2002;15:290–3.
75. Gohil I, Vilensky JA, Weber EC. Vacuum phenomenon: Clinical relevance. *Clin Anat* 2014;27:455–62.
76. Resnick D, Niwayama G, Guerra J JR, Vint V, Usselman J. Spinal vacuum phenomena: anatomical study and review. *Radiology* 1981;139:341–8.
77. Larde D, Mathieu D, Frijia J, Gaston A, Vasile N. Spinal vacuum phenomenon: CT diagnosis and significance. *J Comput Assist Tomogr* 1982;6:671–6.
78. Lafforgue PF, Chagnaud CJ, Daver LM, Daumen-Legre VM, Peragut JC, Kasbarian MJ, Volot F, Acquaviva PC. Intervertebral disk vacuum phenomenon secondary to vertebral collapse: prevalence and significance. *Radiology* 1994;193:853–8.
79. Marr JT. Gas in intervertebral discs. *Am J Roentgenol Radium Ther Nucl Med* 1953;70:804–9.
80. Ford LT, Goodman FG. X-ray studies of the lumbosacral spine. *South Med J* 1966;59:1123–8.

- 81.** Murata K, Akeda K, Takegami N, Cheng K, Masuda K, Sudo A. Morphology of intervertebral disc ruptures evaluated by vacuum phenomenon using multi-detector computed tomography, Association with lumbar disc degeneration and canal stenosis. *BMC Musculoskelet Disord* 2018;19:164.
- 82.** Burns JE, Yao J, Munoz H, Summers RM. Automated Detection, Localization, and Classification of Traumatic Vertebral Body Fractures in the Thoracic and Lumbar Spine at CT. *Radiology* 2016;278:64–73.
- 83.** Boos N, Weissbach S, Rohrbach H, Weiler C, Spratt KF, Nerlich AG. Classification of age-related changes in lumbar intervertebral discs: 2002 Volvo Award in basic science. *Spine (Phila Pa 1976)* 2002;27:2631–44.
- 84.** Vernon-Roberts B, Moore RJ, Fraser RD. The natural history of age-related disc degeneration, The pathology and sequelae of tears. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007;32:2797–804.
- 85.** Wang J, Zhou Y, Zhang ZF, Li CQ, Zheng WJ, Liu J. Radiological study on disc degeneration of thoracolumbar burst fractures treated by percutaneous pedicle screw fixation. *Eur Spine J* 2013;22:489–94.
- 86.** Li F-C, Zhang N, Chen W-S, Chen Q-X. Endplate degeneration may be the origination of the vacuum phenomenon in intervertebral discs. *Med Hypotheses* 2010;75:169–71.
- 87.** Hartman J, Granville M, Berti A, Jacobson RE. An Unusual Vertical T12 Fracture Extending into the T12-L1 Disc in a Patient with Diffuse Idiopathic Spondylitic Hyperostosis, A Case Study Using Vertebroplasty to Stabilize the Fracture. *Cureus* 2019;11:e4477.
- 88.** Tash RR, Weitzner I JR. Acute intervertebral gas following vertebral fracture: CT demonstration. *J Comput Assist Tomogr* 1986;10:707–8.
- 89.** An K-C, Kong G-M, Park D-H, Baik J-M, Youn J-H, Lee W-S. Comparison of Posterior Lumbar Interbody Fusion and Posterolateral Lumbar Fusion in Monosegmental Vacuum Phenomenon within an Intervertebral Disc. *Asian Spine J* 2016;10:93–8.
- 90.** Bu BX, Wang MJ, Liu WF, Wang YS, Tan HL. Short-segment posterior instrumentation combined with calcium sulfate cement vertebroplasty for thoracolumbar compression fractures: radiographic outcomes including nonunion and other complications. *Orthop Traumatol Surg Res* 2015;101:227–33.
- 91.** Lin T-Y, Liao J-C, Tsai T-T, Lu M-L, Niu C-C, Chen W-J, Chen L-H. The effects of anterior vacuum disc on surgical outcomes of degenerative versus spondylolytic

spondylolisthesis: at a minimum two-year follow-up. *BMC Musculoskelet Disord* 2014;15:329.

92. Berns DH, Ross JS, Kormos D, Modic MT. The spinal vacuum phenomenon: evaluation by gradient echo MR imaging. *J Comput Assist Tomogr* 1991;15:233–6.

93. Schweitzer ME, el-Noueam KI. Vacuum disc: frequency of high signal intensity on T2-weighted MR images. *Skeletal Radiol* 1998;27:83–6.

94. Goobar JE, Pate D, Resnick D, Sartoris DJ. Radiography of the hyperextended lumbar spine, An effective technique for the demonstration of discal vacuum phenomena. *Can Assoc Radiol J* 1987;38:271–4.

95. Wang HJ, Chen BB, Yu CW, Hsu CY, Shih TT. Alteration of disc vacuum contents during prolonged supine positioning: evaluation with MR image. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007;32:2610–5.

96. Bierry G, Venkatasamy A, Kremer S, Dosch J-C, Dietemann J-L. Dual-energy CT in vertebral compression fractures, Performance of visual and quantitative analysis for bone marrow edema demonstration with comparison to MRI. *Skeletal Radiol* 2014;43:485–92.

97. Mallinson PI, Coupal TM, McLaughlin PD, Nicolaou S, Munk PL, Ouellette HA. Dual-Energy CT for the Musculoskeletal System. *Radiology* 2016;281:690–707.

98. Mallinson PI, Stevens C, Reisinger C, Nicolaou S, Munk PL, Ouellette H. Achilles tendinopathy and partial tear diagnosis using dual-energy computed tomography collagen material decomposition application. *J Comput Assist Tomogr* 2013;37:475–7.

99. Pumberger M, Fuchs M, Engelhard N, Hermann KG, Putzier M, Makowski MR, Hamm B, Diekhoff T. Disk injury in patients with vertebral fractures-a prospective diagnostic accuracy study using dual-energy computed tomography. *Eur Radiol* 2019;29:4495–502.

6. Eidesstattliche Versicherung

Ich, Igor Nikiforov, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: [Das Vakuumphänomen: Radiologische Ergebnisse von Patienten/-innen mit traumatischen Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule] selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

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

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

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

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

Datum

Unterschrift

Anteilerklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Igor Nikiforov hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1: Jacobs C, Hartwig T, Rößler PP, Meila D, Nikiforov I, Plöger MM, Burger C, Scheidt S, Einfluss des Unfallmechanismus auf die Wirbelkörperfraktur [Influence of trauma mechanisms on thoracic and lumbar spinal fractures], Der Unfallchirurg, 2018

Beitrag im Einzelnen:

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der oben genannten Publikation hat der Erstautor meine Doktorarbeit betreut. Im Rahmen meiner Doktorarbeit habe ich retrospektiv 674 Patienten/-innen, die aufgrund einer traumatischen Fraktur der thorakolumbalen Wirbelsäule im Jahr 2014 und 2015 an der Charité behandelt worden waren, analysiert. Dafür habe ich zunächst anhand der ICD-10-Codes S22.- und S32.- eine Tabelle mit den Patienten/-innen-Daten generieren lassen. Anschließend habe ich anhand der elektronischen Akte in der SAP-Software und der radiologischen Bilder in der PACS-Software patienten/-innen-, fraktur- und unfallbezogene Daten erhoben. Ich habe dem Erstautor, meinem damaligem Betreuer, die bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung gesammelten Daten für die Publikation überlassen. Die überlassenen Daten umfassten ausschließlich Patienten/-innen aus dem Jahr 2014. Sie beinhalteten unter anderem Angaben zur Anzahl und Lokalisation der Fraktur sowie Angaben zum Unfallmechanismus. Zudem wurden die Frakturen und die Unfallmechanismen von mir klassifiziert. Die komplette Beschreibung der erhobenen Daten findet sich im Methodenteil der Doktorarbeit/Monographie. Wenngleich ich nicht in die Anfertigung der Grafiken, die statistische Analyse der Daten oder das Anfertigen der Publikation involviert war, basieren die Ergebnisse und somit die Abbildungen und Tabellen dieser Publikation auf den von mir gesammelten Daten.

Publikation 2: Schömig F, Palmowski Y, Nikiforov I, Hartwig T, Pumberger M, Schwabe P, Jacobs C. Burst fractures lead to a fracture-associated intervertebral vacuum phenomenon: a case series of 305 traumatic fractures of the thoracolumbar spine. Eur Spine J 2020; <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06590-6>

Beitrag im Einzelnen:

Im Rahmen meiner Doktorarbeit habe ich retrospektiv 674 Patienten/-innen, die aufgrund einer traumatischen Fraktur der thorakolumbalen Wirbelsäule im Jahr 2014 und 2015 an der Charité behandelt worden waren, identifiziert. Dafür wurden zunächst anhand der ICD-10-Codes S22.- und S32.- eine Tabelle mit den Patienten/-innen-Daten generiert. Anschließend habe ich anhand der elektronischen Akte in der SAP-Software und der radiologischen Bilder in der PACS-Software patienten/-innen-, fraktur- und unfallbezogene Daten vorläufig erhoben. Diese wurden durch die Arbeit von Frau Schömig, Herrn Palmowski und Herrn Pumberger erweitert und komplementiert. Ich habe der Erstautorin einen Teil der gesammelten Daten für die Erstellung der Publikation überlassen. Die überlassenen Daten umfassten Patienten/-innen aus den Jahren 2014 und 2015. Sie beinhalteten unter anderem Angaben zur Anzahl, Klassifikation und Lokalisation der Fraktur sowie Angaben zum traumatischen Vakuumphänomen. Die komplette Beschreibung der erhobenen Daten findet sich im Methodenteil der Monographie.

Unterschrift, Datum und Stempel des/der erstbetreuenden Hochschullehrers/in

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

7. Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

8. Publikationsliste

Jacobs C, Hartwig T, Rößler PP, Meila D, Nikiforov I, Plöger MM, Burger C, Scheidt S. Einfluss des Unfallmechanismus auf die Wirbelkörperfraktur [Influence of trauma mechanisms on thoracic and lumbar spinal fractures]. Unfallchirurg 2018;121:739–46.

Schömig F, Palmowski Y, Nikiforov I, Hartwig T, Pumberger M, Schwabe P, Jacobs C. Burst fractures lead to a fracture-associated intervertebral vacuum phenomenon: a case series of 305 traumatic fractures of the thoracolumbar spine. Eur Spine J 2020; <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06590-6>

9. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Promotion unterstützt haben. Insbesondere bei PD Dr. Cornelius Jacobs, der mich bei der Fertigstellung der Hausarbeit, die den Grundstein der Arbeit gelegt hat, betreut hat.

Für die Überlassung des Themas möchte ich mich bei PD Dr. Philipp Schwabe bedanken. Ein großer Dank für die fachliche Betreuung bei der Datenerhebung gebührt Dr. Tony Hartwig. Ebenfalls möchte ich mich bei Dr. Oliver Dobrint bedanken, der mir freundlicherweise seinen Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt hat.

Ein besonderer Dank ist an PD Dr. Tobias Winkler und PD Dr. Matthias Pumberger gerichtet, die mich sowohl fachlich als auch formell beim Verfassen der Arbeit unterstützt haben und die Fertigstellung erst ermöglicht haben.

Mein außerordentlicher Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, Sofiya und Igor, die mir stets einen sicheren Rückhalt geboten haben und meinen bisherigen Lebensweg erst möglich gemacht haben.