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

# **DISSERTATION**

# Röntgenologische und sonografische Diagnostik von Flexions-Distraktions-Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Felix Markus Hubertus von Scotti aus Heiligenhaus

Gutachter: 1. Priv.-Doz. Dr. med. F. Kandziora

2. Prof. Dr. med. M. J. Raschke

3. Priv.-Doz. Dr. med. C. Khodadadyan-Klostermann

Datum der Promotion: 08. April 2011

I.	EINLEITUNG	7
I.1	Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule	7
I.2	Anatomie	7
I.3	Klassifikation von Wirbelkörperfrakturen	8
I.3.1	Geschichtliche Entwicklung	8
I.3.2	AO-Klassifikation	11
I.3.2.1	A-Verletzungen	11
I.3.2.2	B-Verletzungen	13
I.4	Diagnostisches Problem und Hinweise auf B-Verletzungen	14
I.5	Therapie	16
I.6	Additive Diagnostik	18
I.6.1	Magnetresonanztomographie	18
I.6.2	Ultraschall	19
I.7	Problem und Aufgabenstellung	19
II.	MATERIAL UND METHODEN	21
II.1	Retrospektive Analyse	21
II.1.1	Patienten	21
II.1.2	Methodik	21
II.1.2.1	Algorithmus in der Notaufnahme	21
II.1.2.2	Operation	21
II.1.2.3	Datenerhebung	22
II.1.2.3.1	Procedere und Quellen	22
II.1.2.3.2	Demographische und klinische Daten	22
II.1.2.3.3	Wirbelkörperhöhe	22
II.1.2.4	Kriterien der Reevaluation	23
II.1.2.4.1	Vergrößerter Abstand der Dornfortsätze	23
II.1.2.4.2	Segmentwinkel	24
II.1.2.4.3	Reduktion der Höhe der Wirbelkörpervorderkante	24
II.1.2.4.4	Kompression der Wirbelkörperspongiosa	25
II.1.2.4.5	Verlängerte Wirbelkörperhinterkante (> 9%)	26
II.1.2.4.6	Erweiterte Facettengelenke	26
II.1.2.4.7	Nach kranial disloziertes Hinterkantenfragment (inverse cortical sign)	27

II.1.3	Software	27
II.1.4	Statistische Auswertung	27
II.2	Prospektive Studie	28
II.2.1	Einheit	28
II.2.2	Patienten	29
II.2.3	Methodik	29
II.2.3.1	Voruntersuchungen	29
II.2.3.2	Untersuchungsablauf	29
II.2.3.3	Protokollierung	33
II.2.4	Auswertung	34
II.2.4.1	Treffsicherheit des diagnostischen Verfahrens	34
II.2.4.2	Radiologische Evaluation	35
III.	ERGEBNISSE	36
III.1	Retrospektive Analyse	36
III.1.1	Patienten und Frakturen	36
III.1.2	Demographische Daten	36
III.1.3	Verletzungsklassifikation	37
III.1.4	Klinische Daten der Patienten mit B-Verletzungen	39
III.1.5	Verteilung auf die Wirbelkörperhöhen	41
III.1.5.1	Wirbelkörperhöhen aller Verletzungen	41
III.1.5.2	Wirbelkörperhöhen der B-Verletzungen	43
III.1.6	Primäre Fehlklassifikationen	44
III.1.6.1	Vergleiche	45
III.1.6.1.1	Wirbelkörperhöhen	45
III.1.6.1.2	Alter	47
III.1.6.1.3	Neurologisches Defizit	48
III.1.6.1.4	Unfallursache Sturz	48
III.1.7	Radiologische Reevaluation	50
III.1.7.1	Mittelwerte der radiologischen Kriterien aller B1-Verletzungen	50
III.1.7.2	Häufigkeit der Kriterien bei B1-Verletzungen mit Existenz	
	radiologischer Diagnosekriterien	52
III.1.7.3	Fehlinterpretierte dorsal knöcherne B-Verletzungen	59

III.2	Prospektive Studie	60
III.2.1	Voruntersuchungen	60
III.2.2	Patienten und Frakturen	63
III.2.3	Unfallursachen	63
III.2.4	Wirbelkörperhöhe	63
III.2.5	Verletzungsklassifikation	64
III.2.6	Untersuchungsergebnisse	65
III.2.6.1	Patienten mit B-Verletzungen	67
III.2.6.1.1	Sonografische und intraoperative Befunde	67
III.2.6.1.2	Radiologische Bildgebung	67
III.2.7	Fallbeispiele	69
III.2.8	Treffsicherheit des diagnostischen Verfahrens	73
IV.	DISKUSSION	74
IV.1	Retrospektive Analyse	74
IV.1.1	Diskussion der Methoden – Kriterien der Reevaluation	75
IV.1.1.1	Vergrößerter Abstand der Dornfortsätze	75
IV.1.1.2	Segmentwinkel	77
IV.1.1.3	Reduktion der Höhe der Wirbelkörpervorderkante	80
IV.1.1.4	Kompression der Wirbelkörperspongiosa	81
IV.1.1.5	Verlängerte Wirbelkörperhinterkante	81
IV.1.1.6	Erweiterte Facettengelenke	82
IV.1.1.7	Inverse cortical sign	82
IV.1.2	Diskussion der Ergebnisse	83
IV.1.2.1	Demografische Daten	83
IV.1.2.2	Verletzungsklassifikation	83
IV.1.2.3	Klinische Daten der Patienten mit B-Verletzungen	84
IV.1.2.4	Verteilung der Frakturen auf die Wirbelkörperhöhen	85
IV.1.2.4.1	Wirbelkörperhöhen aller Verletzungen	85
IV.1.2.4.2	Wirbelkörperhöhen der B-Verletzungen	86
IV.1.2.5	Primäre Fehlklassifikationen	86
IV.1.2.5.1	Vergleiche	88
IV.1.2.5.1.	1 Wirbelkörperhöhen	89
IV.1.2.5.1.2	2 Alter	89

IV.1.2.6.	1 Mittelwerte der radiologischen Kriterien aller B1-Verletzungen	90			
IV.1.2.6.	2 Häufigkeit der Kriterien bei B1-Verletzungen mit Existenz				
	radiologischer Zeichen	92			
IV.1.2.6.	2.1 Vergrößerter Abstand der Dornfortsätze	93			
IV.1.2.6.	2.2 Segmentwinkel	94			
IV.1.2.6.	2.3 Reduktion der Höhe der Wirbelkörpervorderkante	95			
IV.1.2.6.	2.4 Kompression der Wirbelkörperspongiosa	96			
IV.1.2.6.	2.5 Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante	96			
IV.1.2.6.	2.6 Erweiterte Facettengelenke	97			
IV.1.2.6.	2.7 Inverse cortical sign	97			
IV.1.2.6.	Fehlinterpretierte dorsal knöcherne B-Verletzungen	97			
IV.2	Prospektive Studie	98			
IV.2.1	Schwierigkeiten der Untersuchung	98			
IV.2.2	Ultraschalldiagnostik bei Wirbelkörperfrakturen	100			
IV.2.3	Existenz radiologischer Kriterien bei B-Verletzungen	103			
IV.2.4	Alternative Diagnostik	104			
IV.2.5	Treffsicherheit des Ultraschalls gegenüber der MRT	108			
IV.3	Klassifikationsprobleme und aktueller Stellenwert des PLC	109			
V.	ZUSAMMENFASSUNG	111			
LITER	ATURVERZEICHNIS	113			
LEBEN	LEBENSLAUF DANKSAGUNG				
DANK					
EIDES	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG				

#### I. EINLEITUNG

# I.1 Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule

Traumatische Schädigungen der Wirbelsäule spielen aufgrund ihrer unmittelbaren Nähe zum Rückenmark und zu den Nervenwurzeln eine besondere Rolle in der Rettungsmedizin, der unfallchirurgischen Diagnostik und der konservativen und chirurgischen Versorgung. Zudem ist die Wirbelsäule als Hauptbestandteil des Achsenskeletts bei Unfällen besonders gefährdet. Die Brust- und Lendenwirbelsäule stellt dabei den anatomisch längsten Abschnitt dar. Bis zu 80% der relevanten Wirbelsäulenverletzungen betreffen diesen Bereich, davon mehr als die Hälfte den thorakolumbalen Übergang [1]. Frakturen der Wirbelkörper können aus direktem Aufprall oder Stauchungen resultieren, häufig bei Unfällen im Verkehr, Stürzen aus der Höhe, Sportverletzungen oder Arbeitsunfällen. Hinzu kommen geriatrische Verletzungen nach Bagatelltraumata und osteoporotischen Spontanfrakturen.

Der Ablauf der klinischen Diagnostik bei Verdacht auf eine Wirbelsäulenverletzung folgt einem strikten Algorithmus und beginnt mit der Unfallanamnese. Nach einer körperlichen Untersuchung folgt die radiologische Übersichtsdiagnostik durch Röntgenaufnahmen in der anterioposterioren und seitlichen Ebene. Im Anschluss liefert die Computertomographie (CT) bei Verdachtsbestätigung die relevanten Informationen zum Verletzungsausmaß und somit zu den Therapieoptionen.

Die Beteiligung der ventralen und dorsalen Anteile des knöchernen Wirbelkörpers, der Bandscheiben, Nerven und Bandstrukturen spielen eine entscheidende Rolle in der Therapieplanung und Prognose. Die Beurteilung der Stabilität bei Wirbelkörperfrakturen ist entscheidend für Abgrenzung zwischen konservativer und operativer Therapie.

#### I.2 Anatomie

Die Wirbelsäule besteht aus vielen einzelnen übereinander gelagerten Wirbelsäulensegmenten. Dabei kann jedes einzelne Wirbelsäulensegment, auch als Bewegungssegment bezeichnet, für sich als funktionelle Einheit betrachtet werden. Ein Bewegungssegment setzt sich zusammen aus jeweils zwei benachbarten Wirbelkörpern und der dazwischen liegenden Bandscheibe, sowie den

zwei Facettengelenken, dem Bandscheibengelenk, den Bändern, Muskeln, Nerven und Gefäßen. Abbildung 1 zeigt ein solches Segment im Sagittalschnitt im Bereich der Lendenwirbelsäule.

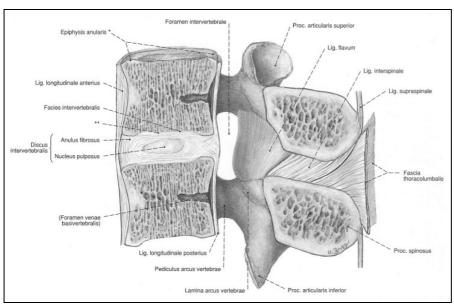


Abbildung 1: Lumbales Bewegungssegment im Medianschnitt (aus [2])

# I.3 Klassifikation von Wirbelkörperfrakturen

Eine Klassifikation ist praktikabel, wenn sie einem einfachen Algorithmus folgt, der auf leicht erkennbaren radiologischen und klinischen Merkmalen basiert, und Informationen zu dem Schweregrad, den Therapieoptionen und der Prognose der Verletzung vermittelt. Das Verständnis und die Kenntnis der verschiedenen Verletzungsmuster in der Brust- und Lendenwirbelsäule und deren Einteilung sind Vorraussetzungen für einen erfolgreichen Therapieplan. Außerdem erleichtert eine standardisierte Einteilung die interprofessionelle Kommunikation. Seit den vierziger Jahren besteht eine lebhafte Dynamik in der Beschreibung von thorakolumbalen Wirbelkörperfrakturen.

# I.3.1 Geschichtliche Entwicklung

1949 nahm Nicoll erstmals eine Einteilung in zwei wesentliche Gruppen vor. Sie beschrieben stabile und instabile Frakturen und unterschieden instabile Verletzungen mit Subluxation, Dislokation, gerissenen interspinalen Bändern oder Frakturen der Laminae des vierten oder fünften Lendenwirbelkörpers [3].

Holdsworth untersuchte über 1000 Patienten mit neurologischem Defizit und zog aus dem knöchernen Verletzungsmuster Rückschlüsse auf den Unfallmechanismus [4]. Basierend auf den klinischen und radiologischen Befunden nahm er eine Einteilung in fünf Kategorien vor und beschrieb die einwirkenden Kräfte von Flexion, Flexion-Rotation, Extension, Kompression und Abscherung. Holdsworth präzisierte die Unterscheidung zwischen stabilen und instabilen Verletzungen durch Einführung des dorsalen Bandapparates in der hinteren Säule, dem Posterior Ligament Complex (PLC), mit einem entscheidenden Beitrag zur Wirbelsäulenstabilität (Abb. 2a). Dieser Bandapparat besteht aus dem über die Dornfortsätze ziehenden Ligamentum supraspinale, dem zwischen des Dornfortsätzen befindlichen Ligamentum interspinale, den Kapseln der Facettengelenke und dem die Wirbelbögen verbindenden Ligamentum flavum.

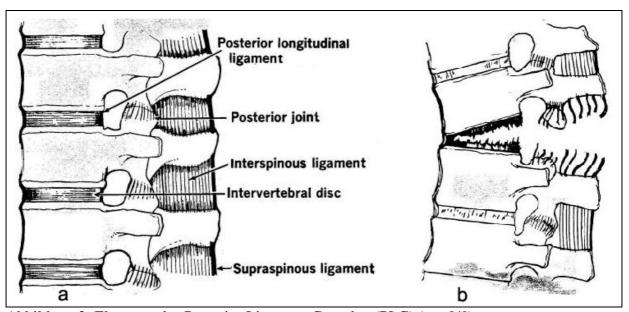


Abbildung 2: Elemente des Posterior Ligament Complex (PLC) (aus [4])

Die Stabilität wird nach Holdsworth maßgeblich durch den Zustand der hinteren Säule bestimmt. Insofern wurden durch Kompression hervorgerufene Berstungsfrakturen als stabil beurteilt. Mit seiner Arbeit zur Zwei-Säulen-Theorie gilt Sir Frank Holdsworth als Pionier in der Klassifikation von thorakolumbalen Frakturen und leistete einen entscheidenden Beitrag zum Verständnis der Wirbelsäulenstabilität. Abbildung 2b zeigt eine Zeichnung einer Ruptur des PLC aus seiner Arbeit aus dem Jahr 1970 [4].

Whitesides modifizierte 1977 die Klassifikation durch Definition eines Zwei-Säulen-Konzepts und führte einen Vergleich mit einem Baukran an [5]. Die vordere Säule, repräsentiert durch die Wirbelkörper und Bandscheiben, überträgt die Drucklasten entsprechend einem Krankörper. Die

hintere Säule, bestehend aus den Gelenken und den dazugehörigen Kapsel-Band-Verbindungen, fängt analog zu dem Zugseil eines Kranes Zugbelastungen ab.

Louis dagegen stellte im gleichen Jahr ein morphologisches Klassifikationssystem mit drei Säulen auf [6]. Dabei stehen die Wirbelkörper für einen Pfeiler und die dahinter liegenden Facettengelenkpaare für die anderen beiden Pfeiler. Louis differenzierte zwischen vorübergehender knöcherner Instabilität und einer Instabilität durch diskoligamentäre Schäden, doch seine Klassifikation fand keine breite Akzeptanz. Das Problem instabiler Verletzungen schilderten White und Panjabi mit verzögertem Auftreten von Schmerzen, neurologischem Defizit und einer Deformität der Wirbelsäule [7].

Große Aufmerksamkeit erlangte erst wieder Denis 1983 mit einer retrospektiven Studie an über 400 thorakolumbalen Frakturen [8]. Er betrachtete den hinteren Teil der vorderen Säule als für die Stabilität verantwortliche Hauptstruktur und definierte diese als dritte und mittlere Säule. Diese Säule beinhaltet den hinteren Anteil des Wirbelkörpers und der Bandscheibe und das Ligamentum longitudinale posterius (Abb. 3). Nach Denis beruht die Stabilität im Drei-Säulen-Modell auf der Integrität zweier Säulen. Eine Instabilität wird durch die zusätzliche Läsion der mittleren Säule neben einer Ruptur des PLC verursacht. Jedem Hauptverletzungsmuster wurde ein Unfallmechanismus zugeordnet. Der Kompression wurde die Flexion, der Berstung die axiale Stauchung, der "Anschnallgurt-Verletzung" die Flexion-Distraktion und der Dislokation die Rotation oder Abscherung zugewiesen.

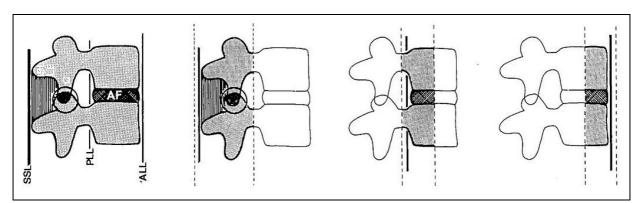


Abbildung 3: Illustration des Drei-Säulen-Modells nach Denis (aus [8])

Berstungsfrakturen wurden von Denis für instabil gehalten, doch im gleichen Jahr unterschieden McAfee et al. erstmalig zwischen stabilen und instabilen Berstungsfrakturen [9]. Bei instabilen Berstungsfrakturen waren neben der vorderen und mittleren Säule auch die hinteren Elemente durch Kompression, laterale Flexion oder Rotation betroffen.

Die Reform in der Klassifikation von thorakolumbalen Wirbelsäulenfrakturen wurde nach Untersuchungen an über 1400 Patienten über einen Zeitraum von zehn Jahren 1994 durch Magerl et al. ausgelöst [10]. Das Schema der Autoren basiert auf dem Zwei-Säulen-Konzept, berücksichtigt die primär einwirkenden Kräfte, unterstreicht das Ausmaß von Weichteilverletzungen, erfasst im Detail die verschiedenen Anteile eines verletzten Segments, die eine Rolle in der mechanischen, neurologischen und Langzeit-Stabilität spielen, und weist eine logische hierarchische Struktur auf. Es stellt die AO-Klassifikation der Arbeitgemeinschaft für Osteosynthesefragen bei Wirbelsäulenverletzungen dar. Die Einteilung erfolgt in Typen anhand des Verletzungsmechanismus und weiter in Gruppen und Untergruppen anhand pathomorphologischer Kriterien. Typ A-Verletzungen stellen Kompressionsfrakturen der Wirbelkörper dar. Typ B-Verletzungen zeichnen sich durch die Beteiligung von dorsalen und ventralen Strukturen im Sinne von Distraktionsverletzungen aus. Bei Typ C-Frakturen handelt es sich um komplexe Rotationsverletzungen im Sinne von A-, B-, oder Abscherverletzungen. Der Schweregrad der Verletzung nimmt von Typ A nach Typ C, sowie innerhalb der Typen, Gruppen und Untergruppen zu. So finden sich neurologische Ausfälle bei etwa einem Fünftel der Verletzungen und kommen am häufigsten bei Typ C-Verletzungen vor [10].

#### I.3.2 AO-Klassifikation

Im Folgenden wird die Einteilung der Kompressions- und Flexions-Distraktions-Verletzungen nach Magerl et al. näher erläutert [10].

#### I.3.2.1 A-Verletzungen

Bei Typ A-Verletzungen handelt es sich um Kompressionsfrakturen in der ventralen Säule durch axiale Stauchung oder Flexion. Tabelle 1 zeigt eine detaillierte Auflistung der Einteilung von Kompressionsverletzungen und Abbildung 4 Schemazeichnungen als Klassifikationsbeispiele weiterer Unterteilungen.

Tabelle 1: Klassifikation der thorakolumbalen Kompressionsverletzungen der Wirbelsäule nach Magerl et al. in Gruppen, Untergruppen und Spezifikationen [10]

Mager	l et al. in	Gruppen, Untergruppen und Spezifikationen [10]							
Typ .	A: Komp	ressionsverletzungen							
4.7	Imaktionhanah								
<i>A1</i> .		paktionbruch							
	A1.1.	Deckplattenimpaktion							
	A1.2.	Keilbruch							
		1 Kranial							
		2 Lateral							
		3 Kaudal							
	A1.3.	Wirbelkörperimpaktion							
<i>A2</i> .	Spaltbr								
	A2.1.	Sagittaler Spaltbruch							
	A2.2.	Frontaler Spaltbruch							
	A2.3.	Kneifzangenbruch							
<i>A3</i> .	Rerstui	ngsbruch							
710.	A3.1.	Inkompletter Berstungsbruch							
	113.1.	1 Kranial							
	1 Kraniai 2 Lateral								
		3 Kaudal							
	A3.2.	Berstungsspaltbruch							
	AJ.2.	1 Kranial							
		2 Lateral							
		3 Kaudal							
	A3.3.	Kompletter Berstungsbruch							
	A3.3.	1 Kneifzangenberstungsbruch							
		3 Kompletter axialer Berstungsbruch							

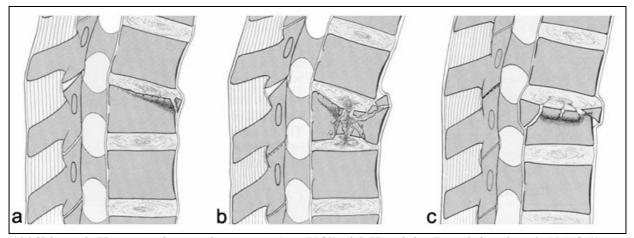


Abbildung 4: Kompressionsverletzungen (aus [10]): (a) Kranialer Impaktionsbruch (A1.2.1), (b) Kneifzangenbruch (A2.3), (c) inkompletter kranialer Berstungsbruch (A3.1.1)

## I.3.2.2 B-Verletzungen

Übersteigt der Grad der Flexion bzw. Extension beim Unfallmechanismus die Stabilität der osteoligamentären Strukturen, resultiert eine Typ B-Verletzung [10]. Dabei liegt in den meisten Fällen eine Beteiligung sowohl der vorderen als auch der hinteren Säule vor (Tab. 2, Abb. 5). Verhältnismäßig selten ist eine Ruptur der vorderen Säule durch die Bandscheibe [10]. Die Einteilung der B-Verletzungen erfolgt zum einen in dorsal überwiegend ligamentäre (Typ B1) und dorsal überwiegend knöcherne (Typ B2) Flexions-Distraktions-Verletzungen und zum anderen in Hyperextensionsverletzungen (Typ B3).

Tabelle 2: Klassifikation der thorakolumbalen B-Verletzungen der Wirbelsäule nach Magerl et al. in Gruppen, Untergruppen und Spezifikationen [10]

		zung der anterioren und posterioren Elemente					
<i>B1</i> .	Ruptur	der hinteren Säule überwiegend ligamentär					
	(Flexions-Distraktions-Verletzung)						
	B1.1.	Mit horizontaler Bandscheibenzerreißung					
		1 Flexions-Subluxation					
		2 Anteriore Dislokation					
	3 Flexions-Subluxation/Anteriore Dislokation						
		mit Gelenkfortsatzfraktur					
	B1.2.	Mit Typ A-Fraktur des Wirbelkörpers					
		1 Flexions-Subluxation + Typ A Fraktur					
		2 Anteriore Dislokation + Typ A Fraktur					
		3 Flexions-Subluxation/Anteriore Dislokation					
		mit Gelenkfortsatzfraktur + Typ A Fraktur					
<i>B</i> 2.	Ruptur	der hinteren Säule überwiegend knöchern					
	(Flexio	ns-Distraktions-Verletzung)					
	B2.1.	Mit horizontaler Wirbelzerreißung (Zwei-Säulen-Fraktur)					
	B2.2. Mit horizontaler Bandscheibenzerreißung						
	1 Ruptur durch Pedikel und Bandscheibe						
	2 Ruptur durch Pars interarticularis und Bandscheibe						
		(Flexions-Spondylolyse)					
	B2.3.	Mit Typ A-Fraktur des Wirbelkörpers					
		1 Fraktur durch Pedikel + Typ A Fraktur					
		2 Fraktur durch Pars interarticularis (Flexions-Spondylolyse)					
		+ Typ A Fraktur					
<i>B3</i> .	Ruptur	der vorderen Säule durch die Bandscheibe					
	(Hyperextensions-Scher-Verletzung)						
	В3.1.	Hyperextensions-Subluxation					
		1 Ohne Verletzung der hinteren Säule					
		2 Mit Verletzung der hinteren Säule					
	B3.2.	Hyperextensions-Spondylolyse					
	B3.3.	Posteriore Dislokation					

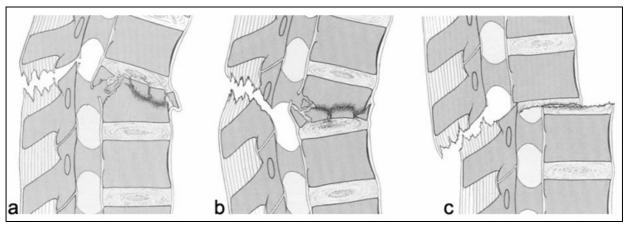


Abbildung 5: Verletzung der vorderen und hinteren Elemente (aus [10]): (a) dorsal ligamentäre Zerreißung assoziiert mit einer kranialen inkompletten Berstungsfraktur (B1.2.1 mit A3.1.1), (b) dorsal überwiegend knöcherne Zerreißung assoziiert mit einer kaudalen inkompletten Berstungsfraktur (B2.3.2 mit A3.1.3), (c) Hyperextensions-Verletzung mit posteriorer Dislokation (B3.3)

Flexions-Distraktions-Verletzungen (Typ B1 und Typ B2) umfassen in der ventralen Säule meist eine Kompressionsfraktur des betroffenen Wirbelkörpers [10]. Abbildung 5a zeigt eine häufig vorkommende Verletzung mit dorsaler Ruptur der supraspinalen und interspinalen Bänder (Typ B1.2.1). Eine dorsal überwiegend knöcherne B-Verletzung mit gleichzeitiger Zerreißung der ligamentären Strukturen ist in Abbildung 5b dargestellt (Typ B2.3.2).

Die Einführung des Beckengurtes in den sechziger Jahren führte zum erhöhten Bewusstsein für Flexions-Distraktions-Verletzungen [8]. Durch die Beugung der Wirbelsäule unter der Hebelwirkung des Gurtes kommt es zu einer Einstauchung in der vorderen Säule und zu einer Distraktion der hinteren Elemente. Hauptmerkmal der Gruppe B1, die mit etwa 60% den Hauptanteil aller B-Verletzungen darstellt, ist die Läsion des für die Stabilität entscheidenden posterioren Ligamentkomplex (PLC) [10].

# I.4 Diagnostisches Problem und Hinweise auf B-Verletzungen

Knöcherne Verletzungen sind mit der radiologischen Standarddiagnostik durch konventionelles Röntgen in zwei Ebenen und durch die Computertomographie in der Regel eindeutig erkennbar und klassifizierbar. Diskoligamentäre Schäden lassen sich dagegen nur eingeschränkt beurteilen [11, 12]. Magerl et al. betonen, dass eine Weichteilbeteiligung die Hauptunterscheidung zwischen Typ A- und Typ B-Frakturen zulässt, doch die Integrität der hinteren Säule lässt sich neben klinischen Zeichen lediglich indirekt aus Röntgenaufnahmen und CT ableiten [10]. Als

typische klinische Zeichen einer B-Verletzung beschreiben die Autoren lokale Schmerzen, eine Schwellung, subkutane Hämatome, einen tastbare Delle oder Stufe zwischen den Dornfortsätzen. Schon Holdsworth beschrieb diese interspinöse Weichteildelle als Folge eines rupturierten Ligamentum supraspinale [4]. Als radiologische Zeichen wurden ein vergrößerter Dornfortsatzbabstand, eine anteriore Dislokation, Facettenfraktur, ein knöcherner Ausriss des Ligamentum supraspinale am Dornfortsatz und das "inverse cortical sign" beschrieben. Bei Letzterem wird ein knöchernes Fragment der Wirbelkörperhinterwand nicht nur nach dorsal, sondern auch nach kranial disloziert und um 90° verrotiert [10]. Weitere Zeichen sind ein vergrößerter Segmentwinkel, eine erhebliche Reduktion der Wirbelkörpervorderkante und ein erweiterter Gelenkspalt der Zwischenwirbelgelenke [7, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21].

Aufgrund der eingeschränkten Evaluationsmöglichkeit dieser indirekten Hinweise auf ligamentäre Läsionen besteht die Möglichkeit einer diagnostischen Lücke vor allem bei den Verletzungen des Typs B1 [10, 22]. Eine Studie zur Interobserverreliabilität spiegelt eindrucksvoll wider, dass die größte Schwierigkeit in der AO-Klassifikation in der therapeutisch wichtigen Unterscheidung zwischen A- und B-Frakturen liegt [23]. Mittels Basisdiagnostik anhand konventioneller Röntgenaufnahmen und CT kann eine B-Verletzung nicht immer sicher erkannt werden. Die Ruptur der dorsalen Ligamente, eine Distraktionskomponente, lässt sich oft erst intraoperativ erkennen. Erschwerend kommt hinzu, dass eine B-Komponente durch Lagerung reponiert werden und damit im CT unerkannt bleiben kann [23]. Ähnlich problematisch ist die Beurteilung von Röntgenaufnahmen in Rücken- oder Seitenlage, besonders die Evaluation des Dornfortsatzabstandes. Dabei können die Zeichen für eine Verletzung des PLC fehlen, da die Wirbelsäule nicht belastet wird [24].

Zahlreiche weitere Autoren sehen eine Problematik in der Erkennung von Flexions-Distraktions-Verletzungen durch konventionelle Diagnostik [11, 25, 26]. Nach Petersilge et al. liegt sogar überhaupt keine Korrelation zwischen dem radiologischen Bild der Wirbelkörperfrakturen und dem Zustand des PLC vor [11].

## I.5 Therapie

Verschiedene konservative und operative Verfahren werden weiterhin anhaltend diskutiert. Dabei herrscht in einigen Bereichen weitgehend Übereinstimmung, in anderen wiederum liegen bis heute keine einheitlichen Behandlungskonzepte vor. A1- und A2-Verletzungen werden in der Regel konservativ therapiert [1, 27]. Die aufwändige Behandlung mittels Gipsmieder nach Reposition der Fehlstellung im dorsalen Durchhang unter Bildwandlerkontrolle spielt gegenwärtig nur noch eine geringe Rolle [28]. Heute wird meist unter analgetischer Therapie eine frühe Mobilisierung des Patienten vorgenommen, entweder ohne äußere Fixierung oder mit temporärer Ruhigstellung mit Hilfe einer Drei-Punkt-Orthese [27]. Eine Anfälligkeit für die Entwicklung einer Pseudarthrose bei konservativ behandelten A2.3-Verletzungen (Kneifzangenbrüche) spricht jedoch für eine operative Versorgung dieser Untergruppe [1].

Typ A3-Verletzungen bilden die Grenzzone zwischen konservativer und operativer Therapie. Folglich gestaltet sich die Diskussion um die Stabilität und die günstigste Therapie dieser Verletzungen besonders kontrovers [1, 27, 29]. Bei diesen Verletzungen besteht bei konservativer Behandlung die Gefahr einer weiteren Dorsaldislokation des Hinterkantenfragments mit sekundärer neurologischer Störung. Ebenso ist die potenziell instabile Ausheilung der Bandscheibe und die zunehmende Fehlstellung durch axiale Instabilität zu befürchten. Gleichwohl können zahlreiche A3.1-Verletzungen durchaus erfolgreich konservativ therapiert werden. Leibl et al. zeigten in einer retrospektiven Studie, dass die Klassifikation nach Magerl gegenüber dem Drei-Säulen-Modell von Denis eine bessere Therapieentscheidung erlaubt, da nach ihr die inkompletten Berstungsfrakturen (A3.1) als stabil gewertet und somit konservativ behandelt werden können [30]. Ist bei A3.1- oder A3.2-Verletzungen die Hinterkante nur minimal betroffen und liegt eine nur geringe Achsfehlstellung vor, kann eine konservative Therapie erwogen werden. Bei Zunahme der kyphotischen Fehlstellung oder Dislokation des Hinterkantenfragments in den Röntgenkontrolluntersuchungen sollte hingegen eine operative Stabilisierung der Verletzung vorgenommen werden [31]. Bei diesen Verletzungen kann es sich aufgrund der beschriebenen diagnostischen Lücke um nicht erkannte B-Verletzungen handeln. Aus diesem Grund und angesichts der potentiellen Instabilität stellen A3-Frakturen in vielen Kliniken prinzipiell eine Operationsindikation dar [31, 32].

Typ B-Verletzungen stellen aufgrund der Instabilität und des schlechten Heilungspotentials diskoligamentärer Schäden im Allgemeinen eine Operationsindikation dar [1, 10, 33]. Übersehene B-Verletzungen können infolge der defekten dorsalen Zuggurtung in schweren kyphotischen Fehlstellungen enden, die im Verlauf insbesondere an der Brustwirbelsäule zu neurogenen Ausfällen führen kann [1]. Eine exakte Klassifikation und eine diagnostische Abgrenzung zu Typ A-Verletzungen sind somit entscheidend für die Auswahl der geeigneten Therapie.

Die Beschreibung vieler operativer Verfahren und anschließende Diskussionen ergaben keine Einigung über eine optimale Therapie [34]. Die prospektive multizentrische Studie der Arbeitsgemeinschaft Wirbelsäule der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie zeigte, dass ein winkelstabiler Fixateur interne bei der Korrektur kyphotischer Fehlstellungen wirkungsvoller ist als ventrale Implantate [34]. Bei ausschließlich ventralem oder kombiniertem Vorgehen kommt es häufiger zu einer segmentalen Fehlstellung, doch auch bei dorsaler Reposition und anschließender Wiederherstellung der ventralen Säule mit autologem Beckenkammspan ist ein Korrekturverlust nicht völlig zu verhindern. Die zweite multizentrische Studie aus dem Jahr 2009 untermauert diese Ergebnisse und beschreibt zudem bessere Ergebnisse bei kombiniert dorso-ventralem Vorgehen als bei isoliert dorsaler Behandlung [32].

Ebenso zeigte eine aktuelle systematische Literaturrecherche von über 100 Artikeln zur operativen Therapie hinsichtlich Techniken, Komplikationen und Ergebnissen traumatischer Frakturen, dass die meisten Studien zum operativen Vorgehen für thorakolumbale Frakturen unzureichend sind [35]. Unabhängig von der Schwere der Verletzung führt keine Technik zu einer langfristigen Einhaltung des korrigierten Winkels in dem betroffenen Segment. Es mangelt an evidenzbasierten Leitlinien für die Therapie thorakolumbaler Frakturen. Auch Blauth et al. konnten in ihrer Arbeit zu der AO-Klassifikation [10] zeigen, dass kein einheitliches Konzept zur Behandlung der Wirbelsäulenverletzungen existiert [23]. Zudem ist das operative Vorgehen stark von Präferenz der Einrichtung abhängig [35]. Entsprechend den chirurgischen Schulen bestehen durchaus beträchtliche Unterschiede in den Auffassungen operativer Vorgänge bei thorakolumbalen Frakturen.

Für eine vollständige initiale Reposition ist gegenwärtig ein "Fixateur interne" am besten geeignet [32, 34]. Dieser wird nach Reposition durch Lagerung und Zug unter Bildwandlerkontrolle von dorsal auf ober- und unterhalb des verletzten Segments transpedikulär

eingebrachten Schrauben montiert. Durch Lordosierung über die Gelenkverbindungen kann eine weitere Feinreposition erfolgen (Abb. 6). Durch Blockierung der Gelenke entsteht eine winkelstabile Montage, die dorsal eine Zuggurtungs- und ventral eine überbrückende Neutralisierungsfunktion übernimmt. A3-, sowie B- und C-Frakturen können von dorsal bzw. kombiniert dorso-ventral mit diesem Instrumentarium stabilisiert werden.

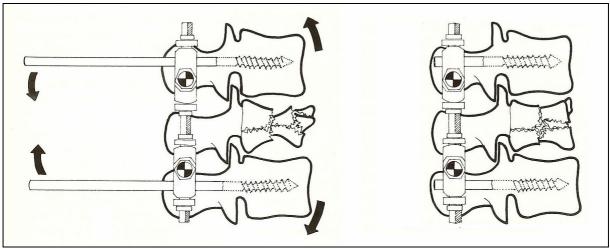


Abbildung 6: Reposition einer Fraktur mittels Fixateur interne (aus [7])

# I.6 Additive Diagnostik

Da die Erkennung einer Verletzung des PLC essentiell für die Wahl der Therapie ist, muss ein bildgebendes Verfahren angestrebt werden, das zur Einschätzung des Status der Bandstrukturen entscheidend beitragen kann.

# I.6.1 Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie (MRT) hat seine Stärken in der langstreckigen mehrsegmentalen Abbildung sowie in der Darstellung von Weichteilstrukturen und Hämatomen. Bei neurologischen Ausfällen ohne radiologisches Korrelat kann es über Lokalisation und Ausmaß der intraduralen Läsionen Auskunft geben. Weiterhin werden Schädigungen der Bandscheiben und Ligamente direkt abgebildet [1]. Derzeit wird die MRT für eine exakte Beurteilung des PLC empfohlen und ist somit hilfreich bei der Wahl der Therapie [23, 24, 25, 36]. Nach Meinung einiger Autoren sollten MRT-Befunde sogar in zukünftige Klassifikationen integriert werden, andere empfehlen eine auf der MRT basierende grundlegende Überarbeitung der AO-Klassifikation [25, 37]. Die MRT stellt bisher jedoch keine Standarddiagnostik bei thorakolumbalen Wirbelsäulenfrakturen dar.

Die MRT-Diagnostik birgt einige Probleme in sich. Zum einen ist die Untersuchung bei verschiedenen Patientengruppen nicht oder nur bedingt geeignet, z.B. bei Patienten mit ferromagnetischen Implantaten. Zum anderen ist die Untersuchung aufwändig, kostenintensiv und, besonders in der Akutsituation, nicht immer verfügbar. Zudem sind kleinere Kliniken nicht immer mit einem MRT-Gerät ausgestattet. Jedoch ist angesichts der zunehmenden Einschränkung der Klinikbudgets auch bei vorhandener MRT eine kostengünstigere diagnostische Methode erstrebenswert.

#### I.6.2 Ultraschall

Ultraschalluntersuchungen an der Wirbelsäule finden bisher Anwendung in der Pränataldiagnostik. In Screeninguntersuchungen können unter anderem Neuralrohrdefekte wie die Spina bifida (Spaltwirbel) oder Sakrococcygeale Teratome, Sakralanomalien und fetale Skoliosen und Kyphosen an der kindlichen Wirbelsäule erkannt werden [38]. Zum anderen wird Ultraschall bei der Darstellung des Spinalkanals und der Bandscheiben durch eine transabdominale Untersuchung beim Erwachsenen eingeschränkt angewendet [39, 40]. Die Anwendung des dreidimensionalen Ultraschalls als Hilfe bei der Biopsieentnahme und Resektion von Rückenmarkstumoren wird heutzutage noch untersucht [41]. In der Traumatologie wird die ultraschallassistierte Fragmentreposition zur Spinalkanaldekompression thorakolumbaler Berstungsfrakturen noch untersucht [42].

Die Sonografie lässt sich durch die verbesserte Visualisierung dank des technischen Fortschritts in immer mehr Bereichen der Medizin einsetzen. Moon et al. zeigten in einer Machbarkeitsstudie, dass die Beurteilung der supraspinalen und interspinalen Bänder mittels Ultraschalldiagnostik möglich ist [43]. Weitere klinische Studien untermauerten die potentielle klinische Anwendbarkeit der Diagnostik des PLC mittels Ultraschall [44, 45].

# I.7 Problem und Aufgabenstellung

Typ B-Distraktionsverletzungen stellen eine diagnostische Herausforderung dar. Besonders die dorsal überwiegend ligamentären Verletzungen (Typ B1) können mit der radiologischen Standarddiagnostik nicht immer erkannt werden. Doch in nur wenigen Studien wurde die tatsächliche Fehlinterpretationsrate dieses Verletzungstyps untersucht.

Diese Arbeit setzte sich aus einem retrospektiven und einem prospektiven Teil zusammen. Ziel des retrospektiven Teils der Studie war die Ermittlung der Rate der primär nicht erkannten Typ B-Verletzungen im klinischen Alltag einer großen chirurgischen Notfallambulanz. Zudem sollten diagnostische Hinweise für B1-Verletzungen erarbeitet werden.

Folgende Fragestellungen waren Inhalt der retrospektiven Studie:

- 1. Wie groß war der Anteil der B-Verletzungen an der Gesamtzahl der operativ versorgten thorakolumbalen Frakturen?
- 2. Wie groß war der Anteil von B1-Verletzungen an allen B-Verletzungen?
- 3. Wie häufig wurden B-Verletzungen primär nicht korrekt klassifiziert?
- 4. Wie wurden die primär nicht erkannten Verletzungen klassifiziert?
- 5. Welche klinischen und radiologischen Gemeinsamkeiten haben B1-Verletzungen, anhand derer sie besser erkannt werden können?

Ziel des prospektiven Teils der Studie war die Evaluation des Ultraschalls in der Diagnostik von Verletzungen des PLC bei thorakolumbalen Frakturen.

Folgende Fragestellungen waren Inhalt der prospektiven Studie:

- 1. Welche Strukturen des PLC sind durch Ultraschall erkennbar und welche Schnitte sind hierfür angebracht?
- 2. In welchem Bereich der Wirbelsäule eignet sich die Untersuchung?
- 3. Wie hoch sind die Sensitivität, Spezifität, der positive und negative Vorhersagewert der Ultraschalluntersuchung bei Patienten mit thorakolumbalen Frakturen?
- 4. Wie häufig lagen in der Röntgen- und CT-Bildgebung der B-Verletzungen keinerlei Hinweise auf B-Verletzungen vor?
- 5. Ist Ultraschall zur Diagnostik ligamentärer Verletzungen und damit zur Erkennung von Typ B1-Verletzungen geeignet?

#### II. MATERIAL UND METHODEN

# II.1 Retrospektive Analyse

#### II.1.1 Patienten

Die thorakolumbalen Wirbelkörperfrakturen aller Patienten der Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie der Charité Universitätsmedizin Berlin, die aufgrund einer traumatischen Verletzung eine operative Therapie erfuhren, wurden über einen Zeitraum von 68 Monaten (Februar 1999 bis Oktober 2004) ausgewertet. Pathologische Frakturen, also osteoporotische, osteomyelitische und tumorbedingte Frakturen ohne Einwirkung eines adäquaten Traumas, wurden ausgeschlossen.

#### II.1.2 Methodik

#### II.1.2.1 Algorithmus in der Notaufnahme

Das Notfallteam der Rettungsstelle des Trauma-Level-1 Zentrums, in dem pro Jahr etwa 40.000 Notfälle, davon 15.000 rein chirurgische Notfälle, behandelt werden (Stand 2005), bestand rund um die Uhr aus Assistenz- und Fachärzten der Chirurgie bzw. Unfallchirurgie oder Orthopädie, sowie Assistenz- und Fachärzten der Radiologie. Ein spezieller Wirbelsäulen-Dienst bestand nicht.

Nach dem Eintreffen der Patienten wurde bei Verdacht auf eine Wirbelsäulenverletzung eine konventionelle Röntgendiagnostik in zwei Ebenen angefertigt. Sofern sich der Verdacht bestätigte, wurde zur genauen Klassifikation und therapeutischen Planung eine Computertomographie des Areals der Wirbelsäulenverletzung durchgeführt. Zur Auswertung standen zudem in den meisten Fällen sagittale und coronare 2-D Rekonstruktionen zur Verfügung. Auf der Basis dieses Bildmaterials wurde von dem Notfallteam eine Primärdiagnose gestellt, die Verletzung klassifiziert und eine Therapie eingeleitet.

#### II.1.2.2 Operation

Die operative Therapie erfolgte bei allen eingeschlossenen Patienten zuerst von dorsal im Sinne einer Stabilisierung mittels Fixateur interne. Hierbei erfolgt die Reposition der Fraktur über transpedikulär eingebrachte Schanzsche Schrauben, welche über Backen mit Längsstäben verbunden werden (USS, Synthes, Schweiz). Aufgrund des dorsalen Vorgehens konnte aus den Operationsberichten der Zustand der dorsalen Strukturen, vor allem der des posterioren

Ligamentkomplexes (PLC), ermittelt werden. Zudem hatten die Operateure die Verletzungen anhand der intraoperativen Befunde erneut klassifiziert.

#### II.1.2.3 Datenerhebung

#### II.1.2.3.1 Procedere und Quellen

Für die Recherche wurden zunächst die Daten aller Patienten herangezogen, die im Beobachtungszeitraum Wirbelsäulenoperationen erfuhren. Zur Erhebung der Patientendaten dienten die Datenbanken der Abteilung für Dokumentation am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie. Im weiteren Vorgehen wurden jene Patienten selektiert, die eine traumatische Verletzung der thorakalen und lumbalen Wirbelsäule erlitten.

Für die Auswertung wurden zunächst die Diagnosen der Entlassungsberichte, sowie die Befunde und Diagnosen der Operationsberichte dieser Patienten im Hinblick auf B-Verletzungen dokumentiert. Sofern es sich bei den Frakturen um B-Verletzungen handelte, wurde die primär in der Rettungsstelle erhobene Klassifikation der Fraktur anhand des Formulars zur stationären Aufnahme ermittelt.

Diese initial in der Rettungsstelle von dem Notfallteam gestellten Diagnosen wurden anschließend mit den intraoperativen Befunden und Klassifikationen gemäß der Operationsberichte verglichen. Sofern sich Differenzen in der Klassifikation aufzeigten, wurden die radiologischen Bilder reevaluiert.

#### II.1.2.3.2 Demographische und klinische Daten

Im Rahmen der Recherche wurde in allen Fällen das Patientenalter und Geschlecht dokumentiert, im Falle von B-Verletzungen ferner das Vorliegen einer neurologischen Schädigung, eines Polytraumas und die Unfallursache. Sofern Stürze als Unfallursache vorlagen, wurde zwischen Stürzen aus geringer bis mittlerer Höhe (bis 4 Meter) und Stürzen aus großer Höhe (ab 4 Meter) unterschieden.

#### II.1.2.3.3 Wirbelkörperhöhe

Für die Frakturhöhe galt neben der Dokumentation des betroffenen Wirbelkörpers eine Aufteilung der Wirbelsäule in den thorakolumbalen Übergang (BWK 12 bis LWK 2) und in den übrigen Bereich (BWK 1 bis BWK 11 und LWK 3 bis LWK 5). Die Frakturhöhen der

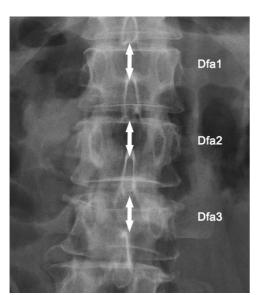
B-Verletzungen wurden zusätzlich mit einer fortlaufenden Nummerierung der Wirbelkörper versehen, folglich Höhe 12 für BWK12, Höhe 13 für LWK1, Höhe 14 für LWK 2, et cetera.

#### II.1.2.4 Kriterien der Reevaluation

Sofern sich eine Differenz zwischen der primären Klassifikation und dem intraoperativen Befund einer Verletzung ergeben hatte, wurde die radiologische Bildgebung erneut ausgewertet. Dabei galt das Hauptaugenmerk den B-Verletzungen. Die Reklassifikationen innerhalb der Gruppen der Typ A- und Typ C-Verletzungen, sowie von Typ B nach Typ C wurden radiologisch nicht reevaluiert.

Die Röntgen- und CT-Bilder der Patienten mit B-Verletzungen wurden erneut von zwei mit der AO-Klassifikation vertrauten Ärzten ausgewertet. Dabei wurden neben Achsfehlstellungen und knöchernen Verletzungen der vorderen und hinteren Säule folgende radiologischen Befunde als Hinweise für eine ligamentäre B-Verletzung gewertet:

## II.1.2.4.1 Vergrößerter Abstand der Dornfortsätze



Der Processus spinosus projiziert sich in der anterioposterioren Röntgenaufnahme als tropfenförmige Struktur mit röntgendichten Konturen. Die Messung erfolgte vom kaudalen Ende des Tropfens bis zum kranialen Ende des darunter liegenden Processus spinosus (Abb. 7). Als Hinweis für eine B-Verletzung galt ein Abstand von über 7 mm im Vergleich zu den intakten Anschlusssegmenten [18].

Abbildung 7: Messung der Abstände zwischen Dornfortsätzen in der ap-Röntgenaufnahme

Zur Quantifizierung wurde die Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes (VDfa) als relative Vergrößerung im Vergleich zu den intakten Anschlusssegmenten wie folgt berechnet:

$$VDfa = -\left[\frac{\left(\frac{Dfa1 + Dfa3}{2}\right) - Dfa2}{\frac{Dfa1 + Dfa3}{2}}\right] \times 100$$

Dabei stellt Dfa2 den Abstand der Dornfortsätze zwischen dem frakturierten Wirbelkörper und dem kranial intakten Wirbelkörper dar, Dfa1 bezieht sich auf den benachbarten kranialen Dornfortsatzabstand und Dfa3 auf den benachbarten kaudalen Dornfortsatzabstand (Abb. 7).

#### II.1.2.4.2 Segmentwinkel

Die Messung erfolgte monosegmental in der seitlichen Röntgenaufnahme von der Grundplatte des betroffenen Wirbelkörpers bis zur Grundplatte des kranial von der Fraktur gelegenen Wirbelkörpers (Abb. 8). Als Hinweis für eine B-Verletzung galt ein Segmentwinkel von über 15° [14].

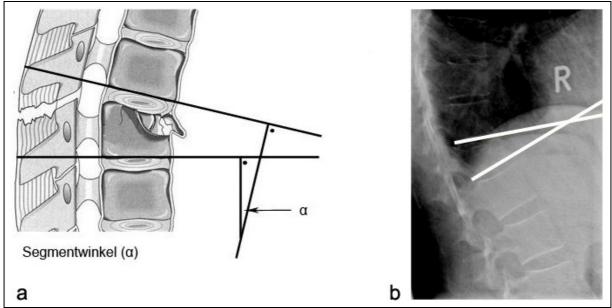
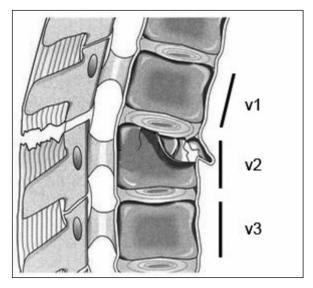


Abbildung 8: (a) Illustration zur Messung des Segmentwinkels, (b) Messung des Segmentwinkels in der seitlichen Röntgenaufnahme

#### II.1.2.4.3 Reduktion der Höhe der Wirbelkörpervorderkante

Die Wirbelkörperkompression (WkK in Prozent) gibt Auskunft über die relative Kompression im Vergleich zu den intakten Anschlusssegmenten und wurde wie folgt berechnet [20]:

$$WkK = \left[ \frac{\left(\frac{v1 + v3}{2}\right) - v2}{\frac{v1 + v3}{2}} \right] \times 100$$



Dabei stellt v2 die Vorderkantenhöhe des frakturierten Wirbelkörpers dar, v1 bezieht sich auf den benachbarten kranialen Wirbelkörper und v3 auf den benachbarten kaudalen Wirbelkörper (Abb. 9).

Abbildung 9: Illustration zur Messung der Vorderkantenhöhe

Bei pathologischer Veränderung mehrerer Vorderkanten durch multiple Frakturen wurde die Messung der Referenzhöhe am nächstgelegenen intakten Wirbelkörper vorgenommen. Als Hinweis für eine B-Verletzung galt eine Kompression des Wirbelkörpers um mehr als 50% [20].

#### II.1.2.4.4 Kompression der Wirbelkörperspongiosa

Als Hinweis für eine B-Verletzung galt eine erhebliche Kompression der Spongiosastruktur in der seitlichen Röntgenaufnahme, auch wenn die Wirbelkörpervorderkante um weniger als 50% reduziert war (Abb. 10).



Bei der Quantifizierung der Kompression der Wirbelkörperspongiosa galt die Formel zur Berechnung der Wirbelkörperkompression (Kap. II.1.2.4.3) und für v2 die Höhe, bis zu der eine physiologische Spongiosastruktur imponierte (Pfeil Abb. 10).

Abbildung 10: Kompression der Wirbelkörperspongiosa trotz erhaltener Wirbelkörpervorderkante über 50%

#### II.1.2.4.5 Verlängerte Wirbelkörperhinterkante (> 9%)

In der seitlichen Röntgenaufnahme kann die Hinterkante des betroffenen Wirbelkörpers verlängert sein [22]. Die Berechnung der Hinterkantenlänge im Vergleich zu den Anschlusssegmenten erfolgte analog zur Berechnung der Reduktion der Wirbelkörpervorderkante (Kap. II.1.2.4.3). Dabei erfolgte eine Änderung des Vorzeichens. Somit entsprach eine Verlängerung der Hinterkante einem positiven Wert und eine Kompression einem negativen Wert (modifiziert nach Willen et al. [20]):

$$VHk = -\left[\frac{\left(\frac{h1 + h3}{2}\right) - h2}{\frac{h1 + h3}{2}}\right] \times 100$$

Dabei stellt h2 die Hinterkantenhöhe des frakturierten Wirbelkörpers dar, h1 bezieht sich auf den benachbarten kranialen Wirbelkörper und h3 auf den benachbarten kaudalen Wirbelkörper.

#### II.1.2.4.6 Erweiterte Facettengelenke

Ein Facettengelenk (Articulatio intervertrebralis) stellt sich in axialen CT-Schichten durch den Processus articularis inferior des oberen Wirbelkörpers, den Processus articularis superior des unteren Wirbelkörpers und dem dazwischen gelegenen Gelenkspalt dar. Als positives Zeichen für eine B-Verletzung galt eine Fehlstellung oder ein Kontaktverlust der Gelenkflächen (Abb. 11) [13].

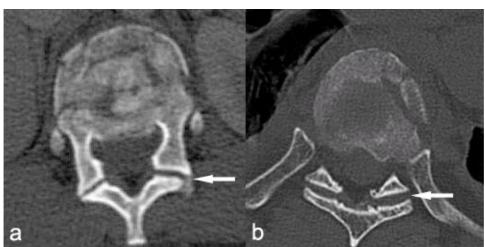


Abbildung 11: Facettengelenke in axialen CT-Schichten: (a) physiologisch, (b) pathologisch erweitert

# II.1.2.4.7 Nach kranial disloziertes Hinterkantenfragment (inverse cortical sign)

Im seitlichen Röntgenbild zeigt sich am kranialen Ende der Hinterkante ein nicht nur nach dorsal, sondern nach kranial verkipptes Bruchstück des Wirbelkörpers, das bis zu 90° um die transversale Achse verdreht sein kann, so dass der ursprüngliche hintere Deckplattenanteil als röntgendichte Linie dem Wirbelkörper gegenübersteht. Diese Erscheinung kann als "inverse cortical sign" bezeichnet werden [10].

#### II.1.3 Software

Zur Messung der Winkel und Strecken bei der Reevaluation der radiologischen Bilder diente die Software OSIRIS Version 4.19 (HUG, Genf, Schweiz).

## II.1.4 Statistische Auswertung

Statistisch untersucht wurde das Durchschnittsalter der Patienten mit Typ A-, B- und C-Verletzungen.

Zwischen den Gruppen der B1- und B2-Verletzungen wurden die Sturzhöhe, das Vorliegen einer neurologischen Schädigung und die Frakturhöhe bei fortlaufender Nummerierung, sowie im Hinblick auf den thorakolumbalen Übergang, verglichen.

Die Gruppe der Patienten mit primär fehlklassifizierten B-Verletzungen wurde mit der Patientengruppe mit primär erkannten B-Verletzungen hinsichtlich Alter, Frakturhöhe bei fortlaufender Nummerierung und neurologischer Defizite verglichen.

Im Falle von Stürzen als Unfallursache wurden die primär korrekt und primär nicht korrekt klassifizierten B- und B1-Verletzungen auf die Höhe der Stürze hin verglichen.

Die Mittelwerte der metrischen radiologischen Daten wurden in den Gruppen aller erkannten und initial nicht erkannten ligamentären B-Verletzungen verglichen.

In den Gruppen der erkannten und nicht erkannten B1-Verletzungen mit Existenz radiologischer Zeichen für ligamentäre B-Verletzungen wurde die Häufigkeit dieser Hinweise untersucht.

Sofern es sich um kategorielle Merkmale handelte und in der Zellenbesetzung bei weniger als 25% der Zellen die erwartete Häufigkeit kleiner als 5 betrug, wurde zur statistischen Auswertung der Chi-Quadrat Test nach Pearson gewählt. Da bei der Auswertung des "Vergrößerten Abstandes der Dornfortsätze" und der "Erweiterten Facettengelenke" in Bezug auf die Gruppen initial nicht korrekt und inital korrekt interpretierter B-Verletzungen die erwartete Häufigkeit kleiner als 5 war, wurde in diesen Fällen der exakte Test nach Fisher gewählt.

Sofern es sich um stetige Daten aus normalverteilten Grundgesamtheiten handelte, wurde der T-Test gewählt. Der Mann-Whitney-U-Test wurde gewählt, wenn keine Normalverteilung dieser Daten vorlag. Dies war der Fall bei der Auswertung des "Durchschnittsalters" des Frakturtyps C im Vergleich zu Typ A und B, der "Frakturhöhe" bei erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen sowie bei B1- und B2-Verletzungen. Dies traf ebenso zu auf die "Dornfortsatzabstandvergrößerung", "Wirbelkörperkompression", "Spongiosakompression" und "Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante" bei erkannten und nicht erkannten ligamentären B-Verletzungen.

Zur Berechung diente das Software Programm SPSS Version 14.0.1 (Chicago, USA). Ein Wert von p < 0.05 wurde als signifikant gewertet.

# II.2 Prospektive Studie

#### II.2.1 Einheit



In der radiologischen Abteilung der Klinik wurde die Untersuchung mit dem Ultraschallgerät LOGIQ® 7 (Abb. 12) der Firma General Electric Healthcare (Chalfont St Giles, UK) mit einer standardmäßigen Einstellung von 7 MHz mit einem Linearschallkopf und einer Eindringtiefe von drei bis vier Zentimetern durchgeführt. Über das Softwaresystem LOGIQ®7 wurde das Bildmaterial zunächst als DICOM-Datei gespeichert und anschließend in ein JPG-Format konvertiert.

Abbildung 12: Ultraschallgerät LOGIQ® 7 der Firma GE Healthcare

#### II.2.2 Patienten

In die Studie eingeschlossen wurden Patienten mit traumatischen operationspflichtigen Wirbelkörperfrakturen auf der Höhe von BWK 4 bis LWK 5 über einen Zeitraum von 24 Monaten. Klassifiziert wurden die Verletzungen nach der Röntgen- und CT-Diagnostik gemäß der AO-Klassifikation [10]. Eingeschlossen wurden Kneifzangenfrakturen (Typ A2.3), inkomplette (Typ A3.1) und komplette (Typ A3.3) Berstungsfrakturen, Berstungsspaltbrüche (Typ A3.2) und Flexions-Distraktions-Verletzungen (Typ B).

Nicht eingeschlossen wurden Kompressionsfrakturen vom Typ A1, sagittale und frontale Spaltbrüche (Typ A2.1 und A2.2), sowie Rotationsverletzungen (Typ C).

Weiterhin ausgeschlossen wurden pathologische Frakturen, also osteoporotische, osteomyelitische und tumorbedingte Frakturen durch Primärtumore oder osteolytische Metastasen ohne Einwirkung eines adäquaten Traumas.

#### II.2.3 Methodik

#### II.2.3.1 Voruntersuchungen

Zur Optimierung der Untersuchungstechnik und Standardisierung der Ultraschalleinstellungen wie der Ultraschallfrequenz und der Schallkopfwahl wurden im Vorfeld Explorationen an sieben gesunden Probanden vorgenommen.

Ziel war die Prüfung der prinzipiellen Möglichkeit zur Bildgebung des Ligamentum supraspinale, des Ligamentum interspinale, des Ligamentum flavum und der Facettengelenke im Longitudinal- und Transversalschnitt.

#### II.2.3.2 Untersuchungsablauf

Nach Eintreffen der Patienten in der Notaufnahme der Klinik erfolgte bei Frakturverdacht eine Röntgendiagnostik mit konventionellen Aufnahmen in zwei Ebenen und bei Verdachtsbestätigung eine Computertomographie des betroffenen Segments. Sofern nach der Primärklassifikation der Fraktur die Entscheidung zur operativen Therapie gefallen war, wurde die Ultraschalluntersuchung in der radiologischen Abteilung der Klinik von einem Unfallchirurgen, dem Autor und einem Radiologen durchgeführt. Diese hatten

Voruntersuchungen an gesunden Probanden durchgeführt und kannten die Lokalisation und Primärklassifikation der Fraktur des Studienpatienten.



Im Untersuchungszimmer erfolgte die Lagerung des Patienten unter achsengerechter Drehung in Seitenlage. Hierzu lag der Patient zunächst mit vor dem Thorax verschränkten Armen in Rückenlage am Rand des Bettes und wurde unter aufrechterhaltendem Eigenmuskeltonus um die Längsachse zur Bettmitte hin in Seitenlage gedreht (Abb. 13). Sofern der Patient eine Bauchlage tolerierte, wurde die Drehung bis zur Bauchlage fortgeführt.

Abbildung 13: Position des Patienten nach Drehung in Seitenlage



Abbildung 14: Höhenlokalisation des Processus spinosus auf der Verbindungslinie der Cristae iliacae in Bauchlage

Nach Inspektion des betroffenen Wirbelkörperareals wurde die Höhenlokalisation durch Palpation der Cristae iliacae bestimmt (Abb. 14). Eine horizontale Verbindungslinie zwischen den Cristae iliacae kreuzt die Wirbelsäule auf Höhe des Dornfortsatzes des vierten Lendenwirbelkörpers [46].

Zur Konkretisierung der Dornfortsatzhöhe dienten unterstützend die Röntgenaufnahmen der Patienten. Vom vierten Lendenwirbelkörper aus erfolgte anschließend das palpatorische Aufsuchen des bekannten frakturierten Wirbelkörpers (Abb. 15).



Dabei erfolgte die Palpation der Dornfortsätze durch den linken Daumen, während die rechten Fingerspitzen weiterhin der Crista iliaca dextra auflagen. Zur Orientierung diente zudem der Punkt des maximalen Druckschmerzes.

Abbildung 15: Palpation der Processus spinosi

Nun wurde der Linearschallkopf im Longitudinalschnitt zwischen dem Processus spinosus des frakturierten Wirbelkörpers und dem des darüber liegenden Wirbelkörpers angelegt (Abb. 16). Nach Einstellen der Eindringtiefe und Optimierung der Bildgebung wurden die angrenzenden intakten Segmente dem betroffenen Segment morphologisch gegenübergestellt.



Abbildung 16: Anlage des Linearschallkopfes über den Processus spinosi für den supraspinalen Längsschnitt

Eine Diskontinuität der echoreichen Linie über den Proccesus spinosi und eine Inhomogenität der Bänder im Vergleich zu den Anschlusssegmenten wurden als positiver Befund für eine

Verletzung des posterioren Ligamentkomplexes definiert. Den physiologischen Zustand des Ligamentum supraspinale zeigt Abbildung 17.

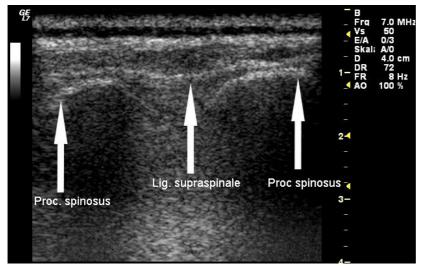


Abbildung 17: Intaktes Ligamentum supraspinale im supraspinalen Längsschnitt

Zur Beurteilung eines dynamischen Bildes mit etwaigem Aufspannen des Ligamentum supraspinale wurden die Patienten aufgefordert, sofern möglich, die Wirbelsäule dezent zu kyphosieren. Abschließend erfolgte die Messung der Dicke des subkutanen Fettgewebes auf Höhe der Verletzung (Abb. 18).

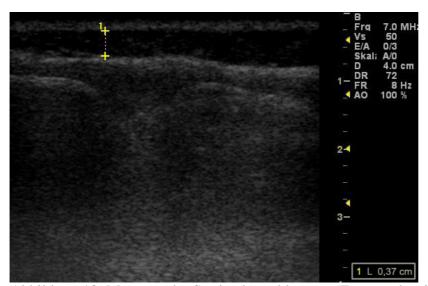


Abbildung 18: Messung der Stärke des subkutanen Fettgewebes im supraspinalen Längsschnitt

Intraoperativ wurde der Zustand des PLC durch den Operateur dokumentiert. Der durch die Ultraschalluntersucher erhobene Befund wurde mit dem intraoperativen Befund des posterioren Ligamentkomplexes verglichen.

#### II.2.3.3 Protokollierung

Folgende Daten der Patienten wurden für die Auswertung der Ultraschalluntersuchung erhoben:

- Name, Alter, Geschlecht, Größe, Gewicht, BMI (Body-Mass-Index [kg/m²])
- Untersuchungsdatum, Aufnahmedatum, Unfalldatum
- Wirbelkörperhöhe der Fraktur
- Verletzungsart (Monotrauma oder Polytrauma)
- Unfallursache
- Vorerkrankung oder Voroperationen der Wirbelsäule
- Neurologisches Defizit
  - Parästhesien
  - Motorikstörung
- Lokalbefund
  - Druckschmerz
  - fortgeleiteter Schmerz
  - Schwellung
  - Hämatom
  - sonstiger Tastbefund
- vorliegende Diagnostik
  - Röntgen
    - Segmentwinkel
    - erhebliche Spongiosakompression
    - Vorderkantenhöhe
    - Hinterkantenhöhe
    - Abstand der Dornfortsätze
    - Osteopenie
  - Computertomographie
    - Vergrößerung der Abstände der Dornfortsätze
    - Hämatom im Weichteilfenster
- Frakturklassifikation bei Aufnahme
- Ultraschall-Untersucher
- Eindringtiefe

- Ultraschall-Befund
  - Ligamentum supraspinale
    - rupturiert
    - nicht beurteilbar
    - intakt
  - Ligamentum interspinale
    - rupturiert
    - nicht beurteilbar
    - intakt
- Ultraschallmessung der Dicke des subkutanen Fettgewebes
- Operationsdatum, Operateur
- Intraoperativer Befund
  - Lig. supraspinale
    - rupturiert
    - intakt
  - Lig. interspinale
    - rupturiert
    - intakt
  - Hämatom
  - Befund der Facetten und Dornfortsätze
- Operative Besonderheiten
- Postoperative Frakturklassifikation
- Bemerkungen

# II.2.4 Auswertung

## II.2.4.1 Treffsicherheit des diagnostischen Verfahrens

Die Spezifität und die Sensitivität der Ultraschalluntersuchung wurden untersucht. Die Spezifität wurde als prozentualer Anteil der richtig-negativen Ergebnisse innerhalb der Gruppe der Patienten mit intaktem PLC berechnet. Die Sensitivität entsprach dem prozentualen Anteil der richtig-positiven Ergebnisse innerhalb der Gruppe der Patienten mit rupturiertem PLC (Tab. 3).

Tabelle 3: Schema zur Treffsicherheit des diagnostischen Verfahrens

Tuberie 3. Benefita zur Treitsteiterfielt des diagnostischen Vertainens							
	Ultraschallbefund positiv Ultraschallbefund neg						
		Ruptur des PLC	Integrität des PLC				
Tatsächlicher	PLC rupturiert	A	В				
Sachverhalt	PLC intakt	C	D				
		A+C	B+D				
Sensitivität (%)		$[A/(A+B)] \times 100$					
Spezifität (%)		$[D/(C+D)] \times 100$					
Positiver Vorhe	rsagewert (%)	$[A/(A+C)] \times 100$					
Negativer Vorh	ersagewert (%)	$[D/(B+D)] \times 100$					
Prävalenz (%)		$[A+B/(A+B+C+D)] \times 100$					

Der positive Vorhersagewert wurde als Quotient aus der Zahl der richtig-positiven Befunde und der Gesamtanzahl aller positiven Befunde ermittelt. Der positive Vorhersagewert gibt somit die Wahrscheinlichkeit an, mit der der PLC bei einem positiven Ultraschallbefund tatsächlich rupturiert ist. Der negative Vorhersagewert wurde als der Anteil der richtig-negativen Ultraschallbefunde an der Gesamtanzahl der negativen Testergebnisse errechnet und gibt somit die Wahrscheinlichkeit an, mit der der PLC bei einem negativen Testergebnis tatsächlich intakt ist.

#### II.2.4.2 Radiologische Evaluation

B-Verletzungen wurden auf das Vorliegen von radiologischen Kriterien für B-Verletzungen hin untersucht. Dies erfolgte in der in Kap. II.1.2.4 beschriebenen Methode. Zur Messung der Winkel und Strecken diente die Software OSIRIS Version 4.19 (HUG, Genf, Schweiz).

#### III. ERGEBNISSE

# III.1 Retrospektive Analyse

#### III.1.1 Patienten und Frakturen

Im Zeitraum vom 15. Februar 1999 bis 25. Oktober 2004 wurden Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie 270 Patienten mit 361 traumatischen Wirbelkörperfrakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule operativ therapiert. 196 (73%) Patienten hatten Monotraumata erlitten. Bei 74 (27%) Patienten lagen gleichzeitig Frakturen mehrerer Wirbel vor, davon 48 Fälle mit Beteiligung zweier Wirbel, 22 Patienten mit drei Wirbelkörperfrakturen und 4 Patienten mit gleichzeitig vier Wirbelkörperfrakturen.

## III.1.2 Demographische Daten

Bei 270 eingeschlossenen Patienten handelte es sich um 178 (66%) Männer und um 92 (34%) Frauen. Das Durchschnittsalter betrug 39 Jahre (14-79). Tabelle 4 zeigt die Alters- und Geschlechterverteilung der Verletzungen bezogen auf die Klassifikationstypen, während im Fall von Mehrfachverletzungen der jeweils schwerstverletzte Wirbelkörper berücksichtigt wurde.

Tabelle 4: Alter und Geschlechterverteilung aller Patienten

Frakturtyp	A	В	C	Gesamtkollektiv
Männer (%)	66	63	75	66
Frauen (%)	34	37	25	34
Mittelwert Alter	42,5 (15-78)	38,2 (14-79)	33,2 (15-71)	<b>39</b> (14-79)

Das Durchschnittsalter der Frakturtypen A und B war im T-Test signifikant verschieden (p = 0,04) (Tab. 5).

Tabelle 5: Alter versus Fraktur-Typ (A/B)

Tabolic	Tabelle 5. Alter versus i Taktur-Typ (A/D)									
	Test bei unabhängigen Stichproben									
Levene-Test der Varianzgleichheit			T-Test für die Mittelwertgleichheit							
						Sig. (2-	Mittlere	Standard- fehler der	95 Konfidenzi Diffe	ntervall der
		F	Signifikanz	Т	df	seitig)	Differenz	Differenz	Untere	Obere
	Varianzen sind gleich	1,655	0,200	2,064	206	0,040	4,306	2,086	0,193	8,419
Alter	Varianzen sind nicht gleich			2,099	193,217	0,037	4,306	2,052	0,259	8,352

Das Durchschnittsalter der Frakturtypen B und C war im Mann-Whitney-U-Test signifikant verschieden (p = 0.019) (Tab. 6).

Tabelle 6: Alter versus Fraktur-Typ (B/C)

Statistik für Test(a)					
	Alter				
Mann-Whitney-U	2.025,500				
Wilcoxon-W	3.916,500				
Z	-2,350				
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,019				

a. Gruppenvariable: Typ

Das Durchschnittsalter der Frakturtypen A und C war im Mann-Whitney-U-Test signifikant verschieden (p = 0,000) (Tab. 7).

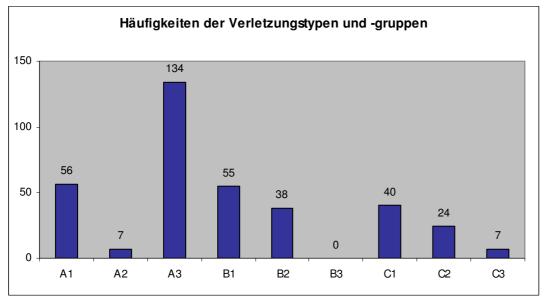
Tabelle 7: Alter versus Fraktur-Typ (A/C)

1 Jp (1 4 5)					
Statistik für Test(a)					
	Alter				
Mann-Whitney-U	2.371,000				
Wilcoxon-W	4.262,000				
Z	-3,998				
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,000				

a. Gruppenvariable: Typ

# III.1.3 Verletzungsklassifikation

Gemäß der AO-Klassifikation nach Magerl et al. [10] verteilten sich die 361 Frakturen wie folgt auf die verschiedenen Gruppen (Grafik 1). Die Reklassifikationen primär fehlgedeuteter Verletzungen sind dabei bereits berücksichtigt.



Grafik 1: Häufigkeiten der Verletzungstypen und -gruppen

Typ A-Frakturen repräsentierten dabei über die Hälfte aller Verletzungen, wobei allein Berstungsfrakturen vom Typ A3 über ein Drittel aller Verletzungen ausmachten (Tab. 8). Rotationsverletzungen (Typ C) trugen mit beinahe einem Fünftel den geringsten Anteil bei.

Tabelle 8: Häufigkeiten und prozentualer Anteil der Verletzungen nach Typ und Gruppe (n=361)

Frakturtyp	Fälle	Gesamtanteil	Anteil an Typ
Typ A	197	54,6 %	
A1	56	15,5 %	28,4 %
A2	7	2,0 %	3,6 %
A3	134	37,1 %	68,0 %
Typ B	93	25,8 %	
B1	55	15,3 %	59,1 %
B2	38	10,5 %	40,9 %
В3	0	0,0 %	0%
Тур С	71	19,6 %	
C1	40	11,1 %	56,3 %
C2	24	6,6 %	33,8 %
C3	7	1,9 %	9,9 %

Die genauere Unterteilung der B-Verletzungen in die Untergruppen ist der Tabelle 9 zu entnehmen. Den größten Anteil machten die B1.2.1-Verletzungen mit 50,5% aller B-Verletzungen aus. Am zweithäufigsten fand sich der Typ B 2.3.1 mit 19%. Hyperextensionsverletzungen (Typ B3) wurden im untersuchten Zeitraum nicht beobachtet.

Tabelle 9: Untergruppen und prozentualer Anteil der B-Verletzungen

Gruppe	Untergruppe	Spezifikation		Anzahl (n)	Anteil am Typ B (%)
B1				55	59
	B1.1		2		
	B1.2		5		
		B1.2.1	47		
		B1.2.3	1		
<b>B2</b>				38	41
	B2.1		2		
		B2.2.2	3		
	B2.3		5		
		B2.3.1	19		
		B2.3.2	9		
В3				0	0
Gesamt				93	100

# III.1.4 Klinische Daten der Patienten mit B-Verletzungen

91 Patienten erlitten insgesamt 93 B-Verletzungen. Polytraumata kamen bei 25 Patienten vor. In fünf Fällen lag gleichzeitig eine C-Verletzung und in zwei Fällen gleichzeitig eine weitere B-Verletzung der Wirbelsäule an anderer Lokalisation vor. Dabei handelte es sich um die Frakturtypen B1.2.1 und B2.3.1 in einem Fall und um zwei B2.3.1-Verletzungen in einem anderen Fall.

Bei 24 (26%) der 91 Patienten fand sich ein neurologisches Defizit. Bei den reinen Monotraumata lagen neurologische Ausfälle in 24% vor, 13mal (25%) in der Untergruppe B1 und 7mal (23%) in der Untergruppe B2 (Tab. 10).

Tabelle 10: Neurologisches Defizit monotraumatischer B-Verletzungen

Fraktur Typ	B1	B2	Gesamt
Anzahl (Monotrauma)	53	31	84
<b>Neurologisches Defizit</b>	13 (25 %)	7 (23 %)	20 (24 %)

Die Häufigkeit neurologischer Defizite der B1- und B2-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson nicht signifikant verschieden (p = 0.84) (Tab. 11).

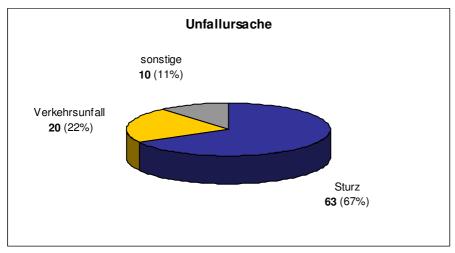
Tabelle 11: Neurologisches Defizit versus Fraktur-Typ (B1/B2) monotraumatischer B-Verletzungen

Chi-Quadrat-Tests							
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)		
Chi-Quadrat nach Pearson	,041(b)	1	0,840				
Kontinuitätskorrektur(a)	0,000	1	1,000				
Likelihood-Quotient	0,041	1	0,839				
Exakter Test nach Fisher				1,000	0,530		
Zusammenhang linear-mit-linear	0,040	1	0,841				
Anzahl der gültigen Fälle	84						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 7,38.

Ursachen der B-Verletzungen waren in 67% der Fälle Stürze, gefolgt von Verkehrsunfällen (VU) in 22% und sonstigen Gründen in 11% der Fälle (Grafik 2).



Grafik 2: Unfallursachen der B-Verletzungen (n=93)

In der Verteilung der drei Unfallursachen verhielten sich B1- und B2-Verletzungen annähernd gleich. Innerhalb der Ursache "Sturz" unterschieden sich B1- und B2-Verletzungen. Insgesamt lagen 28 Stürze aus geringer bis mittlerer Höhe und 33 Stürze aus großer Höhe vor. Hier zeigte sich, dass bei Stürzen aus geringer bis mittlerer Höhe 20mal (71%) eine B1-Verletzung resultierte. Bei Stürzen aus großer Höhe dagegen resultierte nur 17mal (51%) eine B1-Verletzung (Tab. 12).

Tabelle 12: Aufschlüsselung der Unfallursachen

Fraktur Typ	B1	B2	Gesamt
Anzahl	55	38	93
Ursachen			
Verkehrsunfall	11 (20 %)	9 (24 %)	20 (22 %)
Sturz	37 (67 %)	26 (68 %)	63 (67 %)
geringe - mittlere Höhe	20	8	28
große Höhe	17	18	35
sonstige	7 (13 %)	3 (8 %)	10 (11 %)

Der Unterschied der Sturzhöhe zwischen B1- und B2-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson nicht signifikant (p = 0,067) (Tab. 13).

Tabelle 13: Sturzhöhe (geringe-mittlere Höhe/große Höhe) versus Fraktur-Typ (B1/B2)

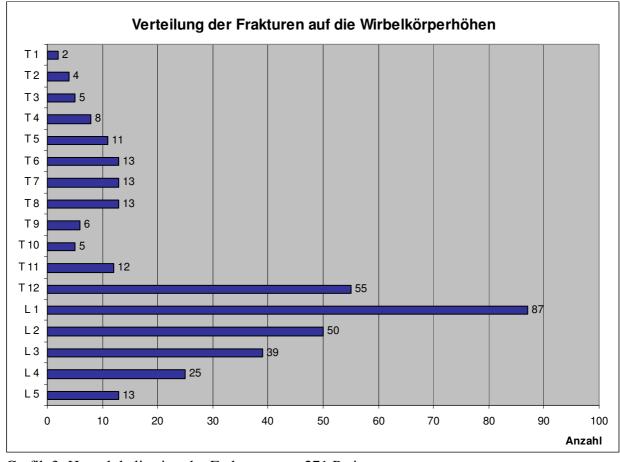
Chi-Quadrat-Tests							
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)		
Chi-Quadrat nach Pearson	3,353(b)	1	0,067				
Kontinuitätskorrektur(a)	2,476	1	0,116				
Likelihood-Quotient	3,411	1	0,065				
Exakter Test nach Fisher				0,078	0,057		
Zusammenhang linear-mit-linear	3,300	1	0,069				
Anzahl der gültigen Fälle	63						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

# III.1.5 Verteilung auf die Wirbelkörperhöhen

## III.1.5.1 Wirbelkörperhöhen aller Verletzungen

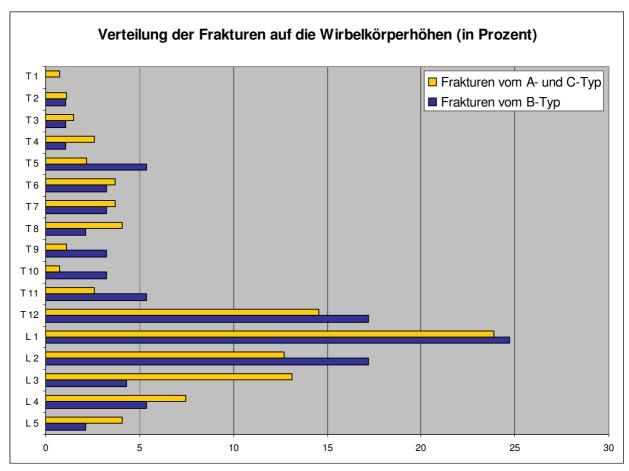
Die Verteilung der 361 Frakturen nahm eine zweigipflige Ausbreitung über die gesamte thorakolumbale Wirbelsäule an, wobei der Hauptanteil mit über 50% (192 Frakturen) im thorakolumbalen Übergang von BWK 12 bis LWK 2 lokalisiert war (Grafik 3).



Grafik 3: Hauptlokalisation der Frakturen von 271 Patienten

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 11,56.

Die Verteilung der B-Verletzungen im Vergleich zu den A- und C-Verletzungen auf die unterschiedlichen Wirbelkörperhöhen stellt Grafik 4 dar. B-Verletzungen fanden sich ausgenommen von BWK 1 an der gesamten thorakolumbalen Wirbelsäule und betrafen die Höhen BWK 12 bis LWK 2 insgesamt 55mal (59%).



Grafik 4: Verteilung der Frakturtypen A, B und C auf die Wirbelkörperhöhen (in Prozent)

Der Unterschied in der Verteilung bezüglich des thorakolumbalen Überganges zwischen B- und A/C-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson nicht signifikant (p = 0,182) (Tab. 14).

Tabelle 14: Thorakolumbaler Übergang versus Fraktur-Typ (B / A und C)

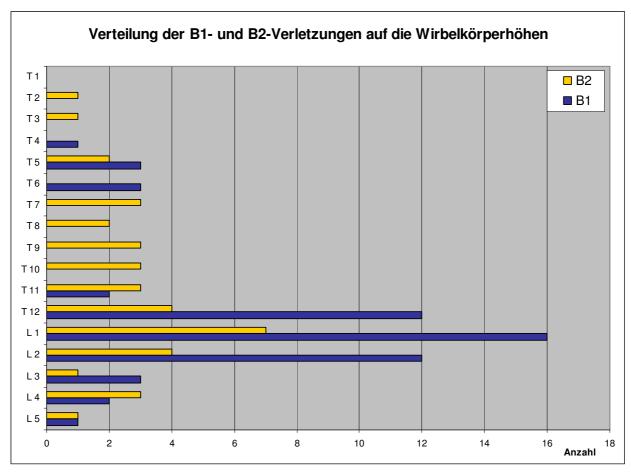
Chi-Quadrat-Tests							
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)		
Chi-Quadrat nach Pearson	1,784(b)	1	0,182				
Kontinuitätskorrektur(a)	1,476	1	0,224				
Likelihood-Quotient	1,793	1	0,181				
Exakter Test nach Fisher				0,187	0,112		
Zusammenhang linear-mit-linear	1,779	1	0,182				
Anzahl der gültigen Fälle	361						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 43,54.

## III.1.5.2 Wirbelkörperhöhen der B-Verletzungen

Die Verletzungen des Subtyps B1 fanden sich bei BWK 4 bis BWK 6 und BWK 11 bis LWK 5 (Grafik 5). Der thorakolumbale Übergang von BWK 12 bis LWK 2 war 40mal (73%) betroffen. B2-Verletzungen fanden sich ausgenommen von BWK 1, BWK 4 und BWK 6 auf allen Segmenten. Der thorakolumbale Übergang von BWK 12 bis LWK 2 war jedoch nur 15mal (39%) betroffen (Grafik 5).



Grafik 5: Verteilung der B1- und B2-Verletzungen auf die Wirbelkörperhöhen (absolute Zahlen)

Der Unterschied in der Verteilung bezüglich des thorakolumbalen Überganges zwischen B1- und

B2-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson signifikant (p = 0.001) (Tab. 15).

Tabelle 15: Thorakolumbaler Übergang versus Fraktur-Typ (B1/B2)

Chi-Quadrat-Tests							
Wert df Asymptotische Signifikanz (2-seitig) Exakte Signifikanz (1-seitig) Exakte Signifikanz (1-seitig)							
Chi-Quadrat nach Pearson	10,284(b)	1	0,001				
Kontinuitätskorrektur(a)	8,954	1	0,003				
Likelihood-Quotient	10,363	1	0,001				
Exakter Test nach Fisher				0,002	0,001		
Zusammenhang linear-mit-linear	10,173	1	0,001				
Anzahl der gültigen Fälle	93						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 15,53.

Die durchschnittliche Frakturhöhe der B-Verletzungen bei fortlaufender Nummerierung der Wirbelkörper betrug 11,6. Die Frakturhöhe der B1-Verletzungen betrug durchschnittlich 12,2, die der B2-Verletzungen dagegen 10,7.

Die durchschnittliche Frakturhöhe der B1- und B2-Verletzungen war im Mann-Whitney-U-Test signifikant verschieden (p = 0.023) (Tab. 16).

Tabelle 16: Frakturhöhe versus Gruppe (B1/B2)

Statistik für Test(a)					
	Lokalisation				
Mann-Whitney-U	757,500				
Wilcoxon-W	1.498,500				
Z	-2,277				
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,023				

a. Gruppenvariable: Gruppe

## III.1.6 Primäre Fehlklassifikationen

Von den 93 B-Verletzungen wurden im Rahmen der Primärdiagnostik 39 (41,9%) nicht als solche erkannt. B1-Verletzungen machten mit 71,8% den Hauptanteil der primär nicht korrekt klassifizierten B-Verletzungen aus. Tabelle 17 gibt Aufschluss über die genaue Verteilung der nicht korrekt klassifizierten B-Verletzungen. Von den 28 nicht erkannten B1-Verletzungen waren 27 (96%) B1.2- bzw. B1.2.1-Verletzungen. Bei den 11 nicht erkannten B2-Verletzungen handelte es sich ausschließlich um B2.3-Verletzungen.

Tabelle 17: Verteilung der nicht korrekt klassifizierten B-Verletzungen

Gruppe	Untergruppe	Spezifikation	Anzahl (n)	Anteil am Typ B (%)
<b>B1</b>			28	71,8
	B1.1		1	
	B1.2		2	
		B1.2.1	25	
B2			11	28,2
	B2.3		2	
		B2.3.1	8	
		B2.3.2	1	
Gesamt			39	100

Alle 39 primär nicht korrekt klassifizierten Verletzungen wurden für Kompressionsfrakturen (Typ A) gehalten. Davon wurden 59% als A3-Frakturen fehlinterpretiert. Bei 12 Frakturen lag keine weitere Unterteilung vor. Tabelle 18 zeigt die genaue Aufschlüsselung der primären Klassifikationen nicht korrekt klassifizierter B-Verletzungen.

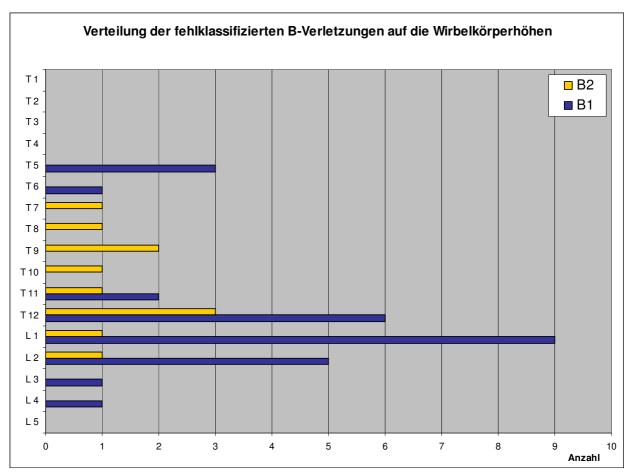
Tabelle 18: Aufschlüsselung der primären Fehlklassifikationen

Тур	Gruppe	Untergruppe	Spezifikation	Anzahl (1	n)	Anteil am Typ A (%)
A	Keine				12	31
	A1			1		
		A1.2		1		
			A1.2.3	1		
		A1.3		1		
					4	10
	A2				0	0
	A3			7		
		A3.1		6		
			A3.1.1	2		
		A3.2		1		
			A3.2.1	1		
			A3.2.2	1		
			A3.2.3	1		
		A3.3		2		
			A3.3.1	1		
			A3.3.3	1		
					23	59
Gesamt					<b>39</b>	100

## III.1.6.1 Vergleiche

# III.1.6.1.1 Wirbelkörperhöhen

Die Verteilung der nicht korrekt klassifizierten B1- und B2-Verletzungen auf die Wirbelkörperhöhen konzentrierte sich auf den thorakolumbalen Übergang und ist in Grafik 6 abgebildet.



Grafik 6: Verteilung nicht korrekt klassifizierter B-Verletzungen auf die Wirbelkörperhöhen

Der Unterschied in der Verteilung bezüglich des thorakolumbalen Überganges zwischen fehlklassifizierten B1- und B2-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson nicht signifikant (p = 0,128) (Tab. 19).

Tabelle 19: Thorakolumbaler Übergang versus Fraktur-Typ (B1/B2) fehlklassifizierter B-Verletzungen

Chi-Quadrat-Tests							
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)		
Chi-Quadrat nach Pearson	2,315(b)	1	0,128				
Kontinuitätskorrektur(a)	1,324	1	0,250				
Likelihood-Quotient	2,259	1	0,133				
Exakter Test nach Fisher				0,156	0,126		
Zusammenhang linear-mit-linear	2,256	1	0,133				
Anzahl der gültigen Fälle	39						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

b. 1 Zellen (25,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 3,95.

In der Gruppe der erkannten B-Verletzungen befanden sich 30 Frakturen (55,6%) im thorakolumbalen Übergang und in der Gruppe der nicht erkannten B-Verletzungen 35 Frakturen (64%).

Der Unterschied in der Verteilung bezüglich des thorakolumbalen Überganges zwischen erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson nicht signifikant (p = 0,408) (Tab. 20).

Tabelle 20: Thorakolumbaler Übergang versus initial erkannt/nicht erkannt

Chi-Quadrat-Tests							
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)		
Chi-Quadrat nach Pearson	,685(b)	1	0,408				
Kontinuitätskorrektur(a)	0,377	1	0,539				
Likelihood-Quotient	0,688	1	0,407				
Exakter Test nach Fisher				0,522	0,270		
Zusammenhang linear-mit-linear	0,677	1	0,411				
Anzahl der gültigen Fälle	93						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

Die Frakturhöhe der nicht erkannten B-Verletzungen betrug durchschnittlich 11,5 und die der erkannten B-Verletzungen 11,7.

Der Unterschied der durchschnittlichen Frakturhöhe zwischen erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Mann-Whitney-U-Test nicht signifikant (p = 0.346) (Tab. 21).

Tabelle 21: Frakturhöhe versus initial erkannt/nicht erkannt

Statistik für Test(a)	
	Lokalisation
Mann-Whitney-U	933,500
Wilcoxon-W	1.713,500
Z	-0,943
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,346

a. Gruppenvariable: erkannt ja-nein

#### III.1.6.1.2 Alter

Das Durchschnittsalter der Patienten mit nicht erkannten B-Verletzungen betrug 41 Jahre und das der Patienten mit erkannten B-Verletzungen 37 Jahre.

Der Unterschied des Durchschnittsalters zwischen erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im T-Test nicht signifikant (p = 0.458) (Tab. 22).

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 15,94.

Tabelle 22: Alter versus initial erkannt/nicht erkannt

	Test bei unabhängigen Stichproben												
Levene-Test der Varianzgleichheit				T-Test für die Mittelwertgleichheit									
						Sig. (2-	Mittlere	Standard- fehler der	95 Konfidenzii Diffe	ntervall der			
		F	Signifikanz	Т	df	seitig)	Differenz	Differenz	Untere	Obere			
	Varianzen sind gleich	0,557	0,458	1,587	91	0,116	4,682	2,950	-1,178	10,543			
Alter	Varianzen sind nicht gleich			1,614	86,495	0,110	4,682	2,902	-1,086	10,450			

## III.1.6.1.3 Neurologisches Defizit

Neurologische Ausfälle kamen in der Gruppe der übersehenen B-Verletzungen 9mal (24%) und in der Gruppe mit erkannten B-Verletzungen 11mal (23%) vor.

Die Häufigkeit neurologischer Defizite der erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson nicht signifikant verschieden (p = 0.922) (Tab. 23).

Tabelle 23: Neurologisches Defizit versus initial erkannt/nicht erkannt

Chi-Quadrat-Tests							
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)		
Chi-Quadrat nach Pearson	,010(b)	1	0,922				
Kontinuitätskorrektur(a)	0,000	1	1,000				
Likelihood-Quotient	0,010	1	0,922				
Exakter Test nach Fisher				1,000	0,561		
Zusammenhang linear-mit-linear	0,010	1	0,922				
Anzahl der gültigen Fälle	84						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

## III.1.6.1.4 Unfallursache Sturz

63 B-Verletzungen waren Folge eines Sturzes. 20 von 28 (71%) Typ B-Frakturen durch einen Sturz aus geringer bis mittlerer Höhe wurden primär nicht erkannt. Dagegen wurden nur 10 von 35 (29%) Frakturen durch einen Sturz aus großer Höhe primär nicht erkannt (Tab. 24).

Tabelle 24: B-Verletzungen mit Unfallursache Sturz

Stürze	Primär fehlklasifiziert	Primär korrekt klassifiziert	Gesamt
geringe - mittlere Höhe	20	8	28
große Höhe	10	25	35
Gesamt	30	33	63

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 8,81.

Die Sturzhöhe der erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson signifikant verschieden (p = 0.001) (Tab. 25).

Tabelle 25: Sturzhöhe (geringe-mittlere Höhe/große Höhe) versus initial erkannt/nicht erkannt (Typ B)

Chi-Quadrat-Tests							
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)		
Chi-Quadrat nach Pearson	11,455(b)	1	0,001				
Kontinuitätskorrektur(a)	9,801	1	0,002				
Likelihood-Quotient	11,812	1	0,001				
Exakter Test nach Fisher				0,001	0,001		
Zusammenhang linear-mit-linear	11,273	1	0,001				
Anzahl der gültigen Fälle	63						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

37 ligamentäre B-Verletzungen waren Folge eines Sturzes. Von 20 B1-Verletzungen durch einen Sturz aus geringer bis mittlerer Höhe wurden 13 (65%) primär nicht erkannt. Bei Stürzen aus großer Höhe (17mal B1) wurden lediglich fünf (29%) initial nicht erkannt (Tab. 26).

Tabelle 26: B1-Verletzungen mit Unfallursache Sturz

Stürze	Primär fehlklasifiziert	Primär korrekt klassifiziert	Gesamt
geringe - mittlere Höhe	7	13	20
große Höhe	12	5	17
Gesamt	19	18	37

Die Sturzhöhe der erkannten und nicht erkannten ligamentären B-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson signifikant verschieden (p = 0,031) (Tab. 27).

Tabelle 27: Sturzhöhe (geringe-mittlere Höhe/große Höhe) versus initial erkannt/nicht erkannt (Typ B1)

Chi-Quadrat-Tests							
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)		
Chi-Quadrat nach Pearson	4,659(b)	1	0,031				
Kontinuitätskorrektur(a)	3,343	1	0,067				
Likelihood-Quotient	4,771	1	0,029				
Exakter Test nach Fisher				0,049	0,033		
Zusammenhang linear-mit-linear	4,533	1	0,033				
Anzahl der gültigen Fälle	37						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 13,33.

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 8,27.

# III.1.7 Radiologische Reevaluation

55 B1-Verletzungen, sowie 11 primär fehlklassifizierte B2-Verletzungen, wurden erneut ausgewertet. Das Hauptaugenmerk galt den ligamentären B-Verletzungen.

## III.1.7.1 Mittelwerte der radiologischen Kriterien aller B1-Verletzungen

Die Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes betrug durchschnittlich 41% bei erkannten, jedoch 19% bei nicht erkannten B1-Verletzungen (Tab. 28). 11mal (20%) gestaltete sich die Messung an den Dornfortsätzen aufgrund einer schlechten Visualisierung im Röntgenbild schwierig. Der durchschnittliche Segmentwinkel der erkannten Verletzungen betrug 15° und derjenige der nicht erkannten Verletzungen 10°. Die Reduktion der Wirbelkörpervorderkante ergab nur tendenzielle Unterschiede. Die Spongiosakompressionsrate der nicht erkannten Verletzungen war größer als 50%. Die Wirbelkörperhinterkante war im Durchschnitt nicht verlängert, sondern komprimiert (Tab. 28).

Tabelle 28: Mittelwerte der radiologischen Kriterien aller ligamentären B-Verletzungen

Kriterium	Primär	Primär	B1-Verletzungen
(Spannweite in Klammern)	fehlklassifiziert	korrekt klassifiziert	n=55
Vergrößerung des			
Dornfortsatzabstandes um:	18,7%	40,5%	28,2%
(neg. Wert = Verminderung)	(-40,7-104,7)	(-19,0-184,2)	(-40,7-184,2)
Erschwerte Messung	6x	5x	11x
Segmentwinkel	10,1° (2 – 28)	14,8° (5 – 24)	12,1° (2 – 28)
Reduktion der Wirbelvorderkante um:	30,2% (9,2 – 69,7)	35,3% (1,6 – 66,2)	32,7% (1,6 – 69,7)
Spongiosakompressionsrate	44,4% (31,3 – 68,6)	53,5% (44,3 – 65,5)	48,7% (31,3 – 68,6)
Verlängerung der Wirbelhinterkante um: (neg. Wert = Kompression)	-4,2% (-37,7 – 4,3)	-5% (-25,1 – 7,1)	-4,6% (-37,7 – 7,1)

Der Unterschied der Dornfortsatzabstandvergrößerung zwischen erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Mann-Whitney-U-Test nicht signifikant (p = 0,223) (Tab. 29).

Tabelle 29: Dornfortsatzabstandvergrößerung versus initial erkannt/nicht erkannt

Statistik für Test(a)					
	DfaV				
Mann-Whitney-U	180,000				
Wilcoxon-W	456,000				
Z	-1,218				
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,223				

a. Gruppenvariable: erkannt ja-nein

Der Unterschied des Segmentwinkels zwischen erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im T-Test signifikant (p = 0.02) (Tab. 30).

Tabelle 30: Segmentwinkel versus initial erkannt/nicht erkannt

Tabelle	Tabelle 30: Segmentwinker versus initial erkanni/nicht erkanni									
	Test bei unabhängigen Stichproben									
Levene-Test der Varianzgleichheit					T-Test für die Mittelwertgleichheit					
					Sig. (2-	Mittlere	Standard- fehler der	95 Konfidenzii Diffe	ntervall der	
		F	Signifikanz	Т	df	seitig)	Differenz	Differenz	Untere	Obere
	Varianzen sind gleich	0,656	0,422	-2,423	44	0,020	-4,6346	1,9131	-8,4902	-0,7790
SgW	Varianzen sind nicht gleich			-2,480	43,650	0,017	-4,6346	1,8685	-8,4011	-0,8681

Der Unterschied der Reduktion der Wirbelkörpervorderkante zwischen erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Mann-Whitney-U-Test nicht signifikant (p = 0,361) (Tab. 31).

Tabelle 31: Wirbelkörperkompression versus initial erkannt/nicht erkannt

Statistik für Test(a)						
	WkK					
Mann-Whitney-U	276,500					
Wilcoxon-W	627,500					
Z	-0,914					
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,361					

a. Gruppenvariable: erkannt ja-nein

Der Unterschied der Spongiosakompressionsrate zwischen erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Mann-Whitney-U-Test nicht signifikant (p = 0,074) (Tab. 32).

Tabelle 32: Spongiosakompressionsrate versus initial erkannt/nicht erkannt

Statistik für Test(b)					
	SpK				
Mann-Whitney-U	17,000				
Wilcoxon-W	62,000				
Z	-1,828				
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,068				
Exakte Signifikanz [2*(1-seitig Sig.)]	,074(a)				

a. Nicht für Bindungen korrigiert.

Der Unterschied der Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante zwischen erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Mann-Whitney-U-Test nicht signifikant (p = 0,706) (Tab. 33).

Tabelle 33: Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante versus initial erkannt/nicht erkannt

Statistik für Test(a)						
	VHk					
Mann-Whitney-U	305,000					
Wilcoxon-W	630,000					
Z	-0,377					
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	0,706					

a. Gruppenvariable: erkannt ja-nein

# III.1.7.2 Häufigkeit der Kriterien bei B1-Verletzungen mit Existenz radiologischer Diagnosekriterien

Von insgesamt 55 B1-Verletzungen ließ sich in 16 Fällen (29%) kein radiologischer Hinweis auf einen diskoligamentären Schaden finden (Abb. 19 und Abb. 20).

Abbildung 19 zeigt eine LWK 2 B1.2.1-Verletzung, die initial als A3.2-Fraktur fehlklassifiziert wurde. In den konventionellen Röntgenaufnahmen war keine Vergrößerung der Dornfortsatzabstände, kein vergrößerter Segmentwinkel und keine Kompression der Vorderkante über 50% oder der Spongiosa vorhanden (Abb. 19a+b, Pfeile LWK 2). Deutlich wird die Berstungsspaltkomponente in der sagittalen CT-Rekonstruktion (Abb. 19c). Abbildung 19d zeigt die axiale CT-Schicht mit der ventralen Berstung des Wirbelkörpers (Pfeile) bei regelrechtem Gelenkspalt der Facetten (Pfeilspitzen).

b. Gruppenvariable: erkannt ja-nein

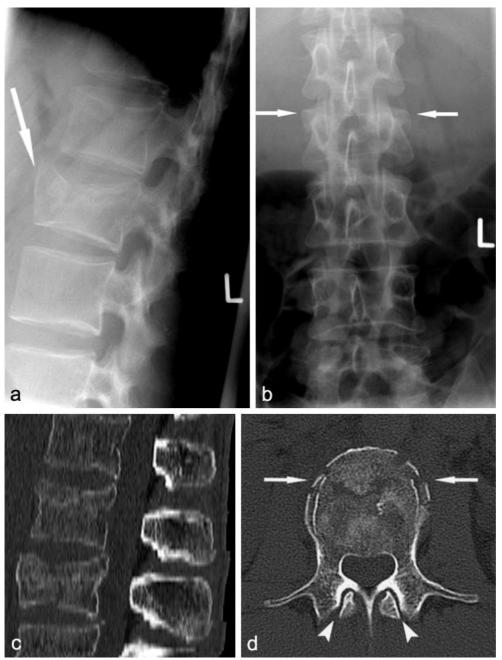


Abbildung 19a-d: Primär als A3.2 fehlklassifizierte LWK 2 B1.2.1-Verletzung ohne radiologische Hinweise auf eine B-Verletzung

Abbildung 20 zeigt eine LWK 4 B1.2.1-Verletzung ohne Zeichen einer B-Verletzung, die initial als A3.1-Fraktur fehlklassifiziert wurde. Neben den konventionellen Röntgenaufnahmen (Abb. 20a+b, Pfeile LWK 4) zeigt die sagittale CT-Rekonstruktion (Abb. 20c) eindrucksvoll die lediglich geringe Kompressionsrate der initial als inkompletten Berstungsfraktur fehlgedeuteten B-Verletzung.

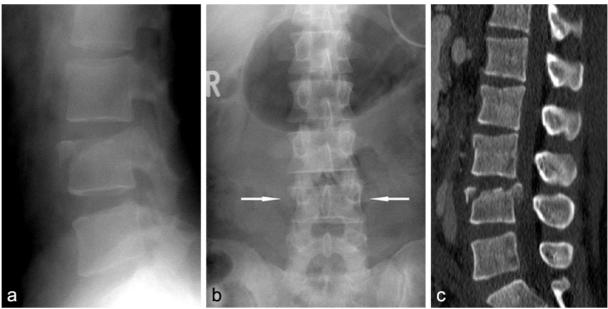


Abbildung 20a-c: Primär als A3.1 fehlklassifizierte LWK 4 B1.2.1-Verletzung ohne radiologische Hinweise auf eine B-Verletzung

Dagegen fanden sich bei den übrigen 39 Patienten mit B1-Verletzungen in 44% der Fälle ein Segmentwinkel von mehr als 15° und in 41% der Fälle eine erhebliche Kompression der Wirbelkörperspongiosa, obwohl die Wirbelkörpervorderkante um weniger als 50% reduziert war. Tabelle 34 enthält die genaue Auflistung aller gefundenen radiologischen Kriterien.

Tabelle 34: Anzahl der gefundenen radiologischen Diagnosekriterien der B1-Verletzungen

Tuestie 5 i. Timzam dei gerandene	Primär fehlklassifiziert	Primär korrekt	B1-Verletzungen mit radiologischen Zeichen
Kriterium	n=17	n=22	Gesamt n=39
Vergrößerter Dornfortsatzabstand >7mm	2	5	7 (18%)
Segmentwinkel >15°	7	10	17 (44%)
Reduktion der Wirbelvorderkante >50%	5	7	12 (31%)
Spongiosakompression	8	8	16 (41%)
Verlängerte Wirbelhinterkante >9%	0	0	0 (0%)
Erweiterte Facettengelenke	2	6	8 (21%)

Bei 17 fehlinterpretierten Frakturen fand sich als häufigstes radiologisches Zeichen eine erhebliche Kompression der Wirbelkörperspongiosa in acht Fällen (47%), auch wenn die Wirbelkörpervorderkante um weniger als 50% reduziert war, gefolgt von einem Segmentwinkel über 15° in sieben Fällen (41%) und einer Reduktion der Wirbelkörpervorderkante um mehr als 50% in fünf Fällen (29%) (Tab. 34).

Bei 22 erkannten B1-Verletzungen waren die häufigsten radiologischen Zeichen ein Segmentwinkel über 15° (45%), eine Kompression der Wirbelkörperspongiosa (36%) und eine Reduktion der Wirbelkörpervorderkante um mehr als 50% (31%).

Die folgenden Abbildungen stellen Beispiele beobachteter radiologischer Kriterien dar:

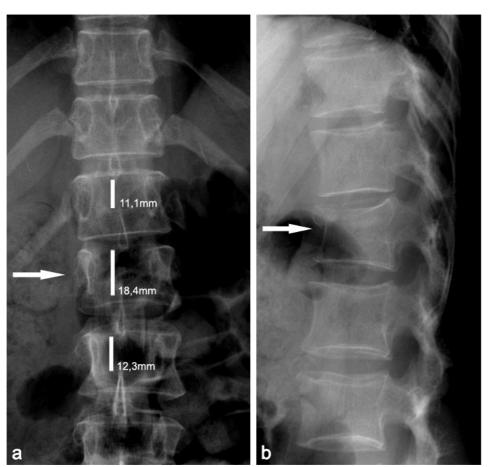


Abbildung 21a+b: Primär als A-Fraktur fehlklassifizierte LWK 1 B1.2.1-Verletzung (Pfeile) mit vergrößertem Dornfortsatzabstand (VDfa = 57,3%)

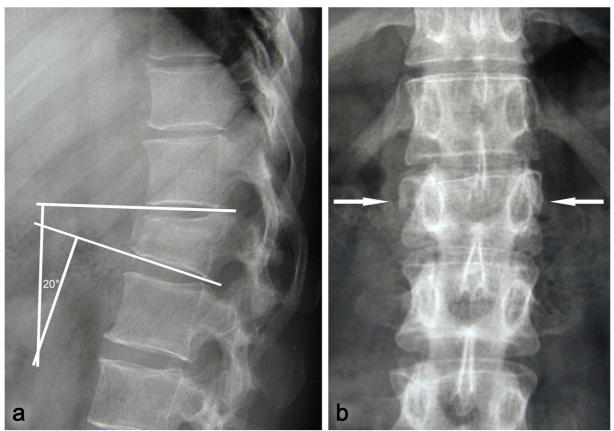


Abbildung 22a+b: Initial erkannte LWK 1 B1.2.1-Verletzung (Pfeile) mit vergrößertem Segmentwinkel ( $\alpha$  = 20°)

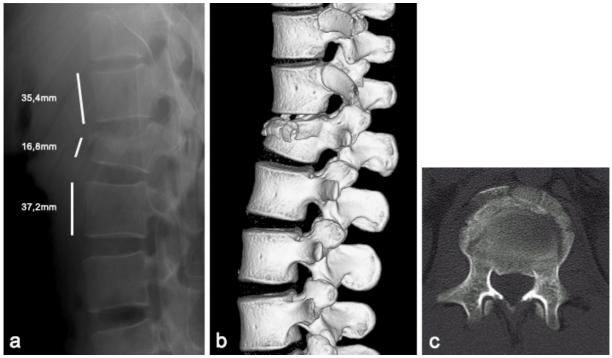


Abbildung 23a-c: Primär als A3.1.1-Fraktur fehlklassifizierte LWK 1 B1.2-Verletzung mit Reduktion der Wirbelkörpervorderkante (WkK = 54%)



Abbildung 24: Erweiterte Facettengelenke in einer axialen CT-Schicht einer primär als A3-Fraktur fehlklassifizierten BWK 5 B1.2.1-Verletzung

Die Häufigkeit einer Dornfortsatzabstandvergrößerung über 7 mm der erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im exakten Test nach Fisher nicht signifikant verschieden (p = 0,399) (Tab. 35).

Tabelle 35: Dornfortsatzabstandvergrößerung >7mm versus initial erkannt/nicht erkannt

Chi-Quadrat-Tests								
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)			
Chi-Quadrat nach Pearson	1,201(b)	1	0,273					
Kontinuitätskorrektur(a)	0,440	1	0,507					
Likelihood-Quotient	1,238	1	0,266					
Exakter Test nach Fisher				0,399	0,256			
Zusammenhang linear-mit-linear	1,161	1	0,281		_			
Anzahl der gültigen Fälle	30							

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

Die Häufigkeit einer Segmentwinkelvergrößerung über 15° der erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson nicht signifikant verschieden (p = 0,611) (Tab. 36)

Tabelle 36: Segmentwinkel >15° versus initial erkannt/nicht erkannt

Chi-Quadrat-Tests								
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)			
Chi-Quadrat nach Pearson	,259(b)	1	0,611					
Kontinuitätskorrektur(a)	0,025	1	0,874					
Likelihood-Quotient	0,259	1	0,611					
Exakter Test nach Fisher				0,732	0,437			
Zusammenhang linear-mit-linear	0,251	1	0,616					
Anzahl der gültigen Fälle	33							

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

b. 2 Zellen (50,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 3,27.

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 7,27.

Die Häufigkeit einer Reduktion der Wirbelkörpervorderkante über 50% der erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson nicht signifikant verschieden (p = 1,0) (Tab. 37).

Tabelle 37: Wirbelkörperkompression über 50% versus initial erkannt/nicht erkannt

Chi-Quadrat-Tests								
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)			
Chi-Quadrat nach Pearson	,000(b)	1	1,000					
Kontinuitätskorrektur(a)	0,000	1	1,000					
Likelihood-Quotient	0,000	1	1,000					
Exakter Test nach Fisher				1,000	0,637			
Zusammenhang linear-mit-linear	0,000	1	1,000					
Anzahl der gültigen Fälle	36							

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

Die Häufigkeit einer Spongiosakompression der erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im Chi-Quadrat Test nach Pearson nicht signifikant verschieden (p = 0,324) (Tab. 38).

Tabelle 38: Spongiosakompression bei WkK <50% versus initial erkannt/nicht erkannt

Chi-Quadrat-Tests							
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)		
Chi-Quadrat nach Pearson	,971(b)	1	0,324				
Kontinuitätskorrektur(a)	0,405	1	0,524				
Likelihood-Quotient	0,974	1	0,324				
Exakter Test nach Fisher				0,487	0,262		
Zusammenhang linear-mit-linear	0,943	1	0,332				
Anzahl der gültigen Fälle	34						

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

Der Unterschied der Facettengelenkerweiterung zwischen erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen war im exakten Test nach Fisher nicht signifikant (p = 0.416) (Tab. 39).

Tabelle 39: Facettengelenkerweiterung versus initial erkannt/nicht erkannt

Chi-Quadrat-Tests								
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (2-seitig)	Exakte Signifikanz (1-seitig)			
Chi-Quadrat nach Pearson	1,313(b)	1	0,252					
Kontinuitätskorrektur(a)	0,540	1	0,463					
Likelihood-Quotient	1,373	1	0,241					
Exakter Test nach Fisher				0,416	0,234			
Zusammenhang linear-mit-linear	1,273	1	0,259					
Anzahl der gültigen Fälle	33							

a. Wird nur für eine 2x2-Tabelle berechnet

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 5,00.

b. 0 Zellen (,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 6,59.

b. 2 Zellen (50,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 3,39.

# III.1.7.3 Fehlinterpretierte dorsal knöcherne B-Verletzungen

Bei der erneuten Beurteilung der 11 primär nicht erkannten B2-Verletzungen ließ sich in drei Fällen (27%) kein eindeutiges Zeichen einer knöchernen dorsalen Verletzung finden. Im zur Verfügung stehenden Bildmaterial ließ sich eine Beteiligung der hinteren Säule Fällen lediglich vermuten (Abb. 25).

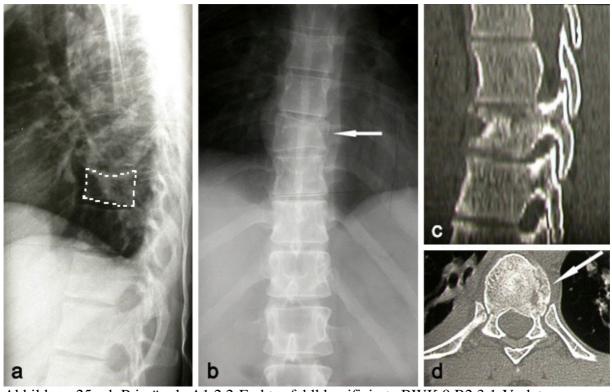


Abbildung 25a-d: Primär als A1.2.2-Fraktur fehlklassifizierte BWK 9 B2.3.1-Verletzung (punktierte Linie der Wirbelkörperkontur und Pfeile)

In zwei weiteren Fällen waren die Röntgenaufnahmen auf Höhe mittleren Brustwirbelsäule durch Überlagerung nicht beurteilbar.

Die Mittelwerte radiologischer Kriterien der 11 fehlinterpretierten B2-Verletzungen zeigt Tabelle 40. In fünf von 11 Fällen war die Messung der Dornfortsatzabstände erschwert, der durchschnittliche Segmentwinkel betrug 14° und die Reduktion der Wirbelkörpervorderkante 35,6%.

Tabelle 40: Mittelwerte der radiologischen Kriterien fehlinterpretierter B2-Verletzungen

	D: " 6 1 11 1 10 1
	Primär fehlklassifizierte
	B2-Verletzungen
Kriterium (Spannweite in Klammern)	n=11
Vergrößerung des	
Dornfortsatzabstandes um:	44,5%
(neg. Wert = Verminderung)	(-20 - 184)
Erschwerte Messung	5x
Segmentwinkel	14,1° (4 – 25°)
Reduktion der Wirbelvorderkante um:	35,6% (12 – 62,1)
Spongiosakompressionsrate	49,1% (49,1)
Verlängerung der Wirbelhinterkante um: (neg. Wert = Kompression)	-5,1% (-24,3 – 6,3)

# III.2 Prospektive Studie

# III.2.1 Voruntersuchungen

Ergebnis der Voruntersuchungen in Seitenlage war ein grundsätzliches Potential des Ultraschalls zur Visualisierung der Ligamenti supraspinale und interspinale. Im supraspinalen Längsschnitt erkennbar waren die dorsalen Anteile der Processus spinosi als deutliche echoreiche konvexe Strukturen, die sich in etwa ein Zentimeter Tiefe abzeichneten (Abb. 26 und Abb. 27).

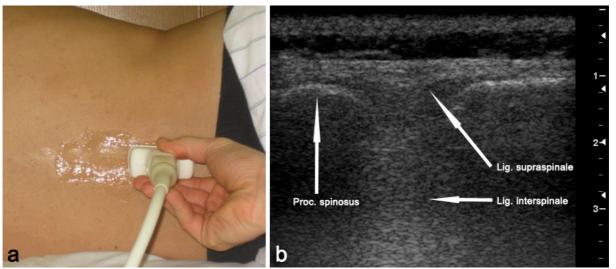


Abbildung 26a+b: (a) Schallkopflage und (b) entsprechender supraspinaler Längsschnitt bei intaktem Ligamentum supraspinale (Pfeil echoreiche Struktur - Proband, 3, 54 Jahre, 184 cm, 89 kg, BMI 26,3)

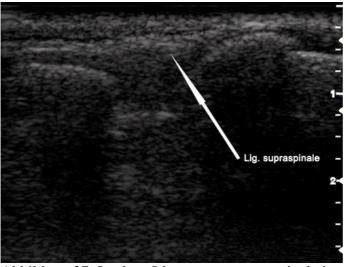


Abbildung 27: Intaktes Ligamentum supraspinale im supraspinalen Längsschnitt (Pfeil echoreiche Struktur - Proband, ♂, 22 Jahre, 190 cm, 82 kg, BMI 22,7)

Als echoreiche Struktur oberhalb der Processus spinosi konnte das Ligamentum supraspinale identifiziert werden, das sich insbesondere über dem Interspinalraum in diskreter Konkavität gut darstellen ließ (Abb. 26b). Unter Kyphosierung der Wirbelsäule nahmen die Abstände der Processus spinosi zu, während es durch Aufspannen des Ligamentum supraspinale zu einer Begradigung der konkaven echoreichen Linie kam (Abb. 27). Unmittelbar unter dem Ligamentum supraspinale zeichnete sich ein echoarmer Bereich ab, dagegen lag interspinal eine höhere Echogenität vor.

Im supraspinalen Transversalschnitt ließen sich die Strukturen der Facettengelenke lediglich erahnen (Abb. 28). Im paraspinalen Längsschnitt gelang die Darstellung der Gelenke, doch eine Aussage über deren Struktur oder die Gelenkkapsel war nicht möglich (Abb. 29). Die Ligamenta flava konnten nur in Einzelfällen im supraspinalen Längsschnitt abgegrenzt werden.

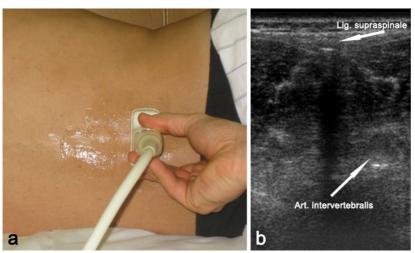


Abbildung 28a+b: (a) Schallkopflage und (b) Bildgebung im supraspinalen Transversalschnitt (gleicher Proband wie in Abb. 26)

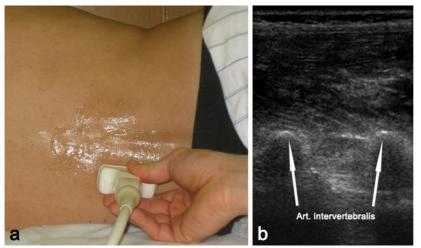


Abbildung 29a+b: (a) Schallkopflage und (b) Bildgebung im paraspinalen Längsschnitt (gleicher Proband wie in Abb. 26)

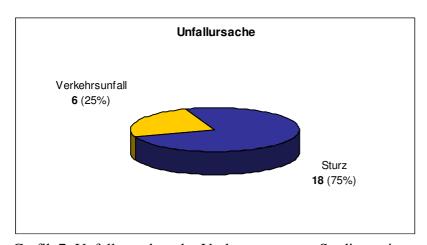
In den Vorversuchen zeigte sich, dass die Untersuchung aufgrund ungenügender Visualisierung der Strukturen des PLC, sowohl in den supra- und paraspinalen Transversalschnitten, als auch auf Höhe der Halswirbelsäule und oberen Brustwirbelsäule, nicht geeignet ist.

## III.2.2 Patienten und Frakturen

Im Zeitraum von 1. Mai 2005 bis 1. Mai 2007 konnten 24 Patienten mit 27 operationspflichtigen thorakolumbalen Frakturen in die Studie eingeschlossen werden. Das Durchschnittsalter der Patienten betrug 47,5 Jahre (26-70). 16 Patienten waren männlich und 8 weiblich.

#### III.2.3 Unfallursachen

Ursachen der Verletzungen waren in 75% der Fälle Stürze und in 25% Verkehrsunfälle (Grafik 7). Als Besonderheit kam ein epileptischer Anfall bei einem der Stürze vor, die anderen Stürze hingegen waren die Folge von Haushalts-, Arbeits- oder Sportunfällen. Zwei der Verkehrsunfallopfer wurden von fahrenden Pkw erfasst, während die anderen Fahrzeuginsassen waren. Polytraumata kamen nicht vor.



Grafik 7: Unfallursachen der Verletzungen von Studienpatienten (n=24)

# III.2.4 Wirbelkörperhöhe

27 Verletzungen befanden sich auf Höhe von BWK 4, BWK 6 und BWK 7, sowie von BWK 12 bis LWK 3 und LWK 5 (Grafik 8). Der überwiegende Anteil der Frakturen war im thorakolumbalen Übergang lokalisiert. 18 der 27 Frakturen (67%) befanden sich auf der Höhe von BWK 12 bis LWK 2. In drei Fällen lag gleichzeitig lag eine weitere Verletzung der thorakolumbalen Wirbelsäule an anderer Lokalisation vor.



Grafik 8: Hauptlokalisation der Frakturen von Studienpatienten (n=24)

# III.2.5 Verletzungsklassifikation

Bei den nach Gruppen aufgeschlüsselten Frakturklassifikationen in Tabelle 41 handelt es sich um die postoperative endgültige Einteilung. Berstungsfrakturen (Typ A3) machten mit 66% den größten Anteil aller Verletzungen aus. Inkomplette Berstungsfrakturen (Typ A3.1) machten mit 48% den größten Anteil aller Verletzungen hinsichtlich der Untergruppen aus. 15% der Frakturen waren ligamentäre B-Verletzungen (Typ B1).

Tabelle 41: Klassifikationen und prozentualer Anteil der untersuchten Verletzungen

Gruppe	Untergruppe	Spezifikation	Anzahl	Prozentualer Anteil
A3			18	66
	A3.1		8	
		A3.1.1	5	
	A3.2		1	
		A3.2.1	1	
	A3.3		2	
		A3.3.1	1	
<b>B</b> 1			4	15
	B1.2		2	
		B1.2.1	2	
B2			5	19
	B2.3		4	
		B2.3.1	1	
В3			0	0
Gesamt		_	27	100

# III.2.6 Untersuchungsergebnisse

Ein aussagekräftiger Ultraschallbefund konnte bei 22 der 24 Patienten erhoben werden. In zwei Fällen war die Beurteilung aufgrund ungenügender sonografischer Visualisierung nicht möglich. Einzelheiten zu den Untersuchungsdaten eingeschlossener Patienten sind in Tabelle 42 dargestellt.

Ein korrekter Ultraschallbefund wurde in 20 von 22 Fällen erhoben (91%). Dabei handelte es sich 15mal um einen intakten PLC und fünfmal um eine Läsion des PLC. In zwei Fällen (9%) war der Ultraschallbefund fehlerhaft, davon wurde einmal (Pat-Nr. 8) eine Ruptur des PLC sonografisch nicht erkannt und einmal (Pat-Nr. 21) wurde ein falsch positiver Befund erhoben.

15 von 24 Patienten (62,5%) gaben im Rahmen der Untersuchung einen Druckschmerz über dem betroffenen Wirbelsäulensegment an. Dabei handelte es sich um neun von 16 Patienten (56%) mit A-Verletzungen und um sechs von acht Patienten (75%) mit B-Verletzungen.

Bei drei von fünf Fällen mit einer beobachteten Schwellung im Verletzungsbereich lagen B-Verletzungen vor. In vier Fällen wurde im palpatorischen Befund eine tastbare interspinöse Delle beschrieben. Bei zwei dieser Fälle (Pat-Nr. 8 und 20) lag eine ligamentäre B-Verletzung vor. In den beiden übrigen Fällen (Pat-Nr. 11 und 16) handelte es sich um inkomplette kraniale Berstungsfrakturen, bei denen intraoperativ eine deutliche Elongation des Ligamentum supraspinale imponierte.

Bei einem Patienten (Pat-Nr. 15) lag inspektorisch ein subkutanes Hämatom vor. Dabei handelte es sich in um eine B-Verletzung, bei der intraoperativ eine Einblutung der dorsalen Strukturen vorlag. In den übrigen drei Fällen mit einem intraoperativ sichtbaren Hämatom (Pat-Nr. 4, 7, 8) war bei der klinischen Untersuchung keine Einblutung in die Haut erkennbar.

Sensomotorische Störungen wurden im klinischen Befund in keinem Fall erhoben. Es bestanden bei keinem Patienten wesentliche Vorerkrankungen der Wirbelsäule. Zwei Patienten berichteten über intermittierende Beschwerden in Form von Rückenschmerzen und ein Patient über vorbestehende intermittierende Lumboischialgien rechts.

Der durchschnittliche Body-Mass-Index betrug 23,86 kg/m $^2$  (18,73 – 37,18, Standardabweichung 4,0 kg/m $^2$ ). Die durchschnittliche Stärke des subkutanen Fettgewebes betrug 2,13 mm (0,8 – 5,0, Standardabweichung 1,17 mm).

Tabelle 42: Untersuchungsdaten (B-Verletzungen fettgedruckt)

Pat- Nr.	FG	DS	SCH	Delle	WK	US-Befund PLC	OP PLC	postOP- Klassif.	US-B
1	2,9	+	-	-	LWK 1	Nicht beurteilbar	Intakt	A3.2.1	
2	5,0	+	-	-	LWK 1	Intakt	Intakt	A3.1.1	Richtig
3	1,4	+	-	-	LWK 5	Intakt	Intakt	A3.3.1	Richtig
4	1,4	+	-	-	BWK 4	Ruptur	Ruptur	B2.3.1	Richtig
5	1,5	-	-	-	LWK 1 LWK 3	Intakt	Intakt	A3.1 A3.1	Richtig
6	2,2	+	-	-	LWK 1	Intakt	Intakt	A3.1	Richtig
7	2,4	-	+	-	BWK 6	Intakt	Intakt	B2.3	Richtig
8	1,9	+	-	+	BWK 12	Intakt	Ruptur	B1.2.1	Falsch
9	2,2	+	-	-	LWK 2	Ruptur	Ruptur	B1.2	Richtig
10	1,5	-	-	-	BWK 12	Intakt	Intakt	A3.2	Richtig
11	0,9	+	-	+	LWK 1	Intakt	Elongation	A3.1.1	Richtig
12	1,0	+	+	-	BWK 12	Ruptur	Ruptur	B2.3.1	Richtig
13	2,7	+	-	-	LWK 1	Intakt	Intakt	A3.1.1	Richtig
14	1,4	+	-	-	LWK 3	Intakt	Intakt	A3.3	Richtig
15	4,8	-	+	-	BWK 12 LWK 1	Nicht beurteilbar	Ruptur	B1.2 B2.3	
16	1,0	-	-	+	LWK 1	Intakt	Elongation	A3.1.1	Richtig
17	2,0	-	-	-	BWK 12	Intakt	Intakt	A3.1	Richtig
18	1,9	-	-	-	LWK 1	Intakt	Intakt	A3.1	Richtig
19	1,9	-	-	-	LWK 2	Intakt	Intakt	A3.1	Richtig
20	0,9	+	-	+	BWK 12	Ruptur	Ruptur	B2.3	Richtig
21	3,8	+	+	-	LWK 2	Ruptur	Intakt	A3.1	Falsch
22	0,8	-	-	-	LWK 3	Intakt	Intakt	A3.1.1	Richtig
23	2,1	+	-	-	LWK 3	Ruptur	Ruptur	B1.2	Richtig
24	1,6	+	+	-	BWK 6 BWK 7	Intakt	Intakt	A3.1 A3.3	Richtig

FG: Dicke subkutanes Fettgewebe (mm)
DS: Druckschmerz auf Frakturhöhe
SCH: Schwellung auf Frakturhöhe
Delle: Interspinöse Delle auf Frakturhöhe

WK: Wirbelkörperhöhe

US-Befund PLC: Ultraschallbefund Posterior Ligament Complex

OP PLC: intraoperativer Befund des PLC postOP-Klassif.: postoperative Klassifikation US-B: Ultraschallbefund Richtig/Falsch

## III.2.6.1 Patienten mit B-Verletzungen

Acht Patienten erlitten neun B-Verletzungen (Tab. 42). In einem Fall lag eine B1.2-Verletzung des BWK 12 bei gleichzeitiger Fraktur des LWK 1 vom Typ B2.3 vor.

#### III.2.6.1.1 Sonografische und intraoperative Befunde

Bei sieben der acht Patienten mit B-Verletzungen konnte ein Ultraschallbefund erhoben werden. In einem Fall (Pat-Nr. 15) war die Beurteilung des Bildmaterials nicht möglich. Der BMI war mit 37,2 kg/m² überdurchschnittlich hoch und die Dicke des subkutanen Fettgewebes betrug 4,8 mm.

Ein korrekter Ultraschallbefund wurde in sechs von sieben Fällen (86%) mit B-Verletzungen erhoben. Bei fünf Patienten wurde die Läsion des PLC erkannt und bei einem Patienten (Pat-Nr. 7) war der PLC bei einer B2.3-Fraktur als Besonderheit intakt geblieben und als solcher sonografisch identifiziert worden. In einem Fall (Pat-Nr. 8) wurde die Ruptur des PLC sonografisch nicht erkannt.

## III.2.6.1.2 Radiologische Bildgebung

Der Mittelwert der Dornfortsatzabstandvergrößerung betrug 38%, der Segmentwinkel betrug durchschnittlich 15° und die Wirbelkörpervorderkante war im Durchschnitt um 28% reduziert. Die Wirbelhinterkante war um 10% reduziert. Tabelle 43 enthält die Messwerte radiologischer Kriterien der B-Verletzungen.

Tabelle 43: Messergebnisse der radiologischen Diagnosekriterien der B-Verletzungen

Pat-Nr.	Fx-Typ	V-DFA (%)	SW (°)	R-VK (%)	SPK (%)	V-HK (%)
4	B2.3.1	-9	8	47	-	
7	B2.3	-10	30	45	-	-10
8	B1.2.1	54	28	28	-	-65
9	B1.2	26	13	34	66,5	-17
12	B2.3.1	63	10	25		3
15	B1.2		23	21	-	-4
15	B2.3		10	13	-	7
20	B2.3	136	13	22	-	-2
23	B1.2	18	4	17	-	5
	MW	38	15,4	28	66,5	-10
	(STABW)	(49,9)	(8,3)	(11,1)		(22,6)

Fx-Typ: Fraktur-Typ

V-DFA: Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes

SW: Segmentwinkel

R-VK: Reduktion der Wirbelkörpervorderkante SPK: Spongiosakompressionsrate, wenn R-VK < 50% V-HK: Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante

MW (STABW): Mittelwert (Standardabweichung)

Die Abstände der Dornfortsätze bei einem Patienten mit zwei Frakturen (Pat-Nr. 15) wurden angesichts mangelnder Aussagekraft der benachbarten Dornfortsatzabstände nicht berücksichtigt. In einem Fall lag eine Kompression der Wirbelkörperspongiosa vor (Pat-Nr. 9) und einmal war die Beurteilung aufgrund von Überlagerung des Zwerchfells nicht möglich (Pat-Nr. 12). Bei Pat-Nr. 4 war die Beurteilung der Hinterkante wegen pulmonaler Überlagerung nicht möglich.

Die radiologische Bildgebung der B-Verletzungen wurde auf das Vorliegen von radiologischen Diagnosekriterien für B-Verletzungen hin untersucht (Tab. 44). Bei neun B-Verletzungen fand sich einmal ein vergrößerter Dornfortsatzabstand, dreimal ein Segmentwinkel von mehr als 15° und einmal eine erhebliche Kompression der Wirbelkörperspongiosa, obwohl die Wirbelkörpervorderkante um weniger als 50% reduziert war. Eine Erweiterung der Facettengelenke, eine Verlängerung der Hinterkante über 9% und eine Reduktion der Wirbelvorderkante um mehr als 50% kam kein einziges Mal vor. In der Bildgebung der insgesamt vier B1-Verletzungen ließ sich zweimal (Pat-Nr. 9 und 23) kein radiologischer Hinweis auf eine diskoligamentäre Verletzung finden (Abb. 32).

Tabelle 44: Anzahl der gefundenen radiologischen Diagnosekriterien der B-Verletzungen

Kriterium	B-Verletzungen (n=9)
Vergrößerter Dornfortsatzabstand >7mm	1 (11%)
Segmentwinkel >15°	3 (14%)
Reduktion der Wirbelvorderkante >50%	0
Spongiosakompression	1 (11%)
Verlängerte Wirbelhinterkante >9%	0
Erweiterte Facettengelenke	0

# III.2.7 Fallbeispiele

Fall 1: Eine 55jährige Patientin (Pat-Nr. 19) wurde von einem Pkw erfasst und erlitt eine LWK 2-Fraktur, die bei ihrer Aufnahme als Typ A3.1 klassifiziert wurde (Abb. 30a-d). Sonografisch imponierte ein intaktes Ligamentum supraspinale (Abb. 30e echoreiche Struktur). Intraoperativ wurde die Primärklassifikation durch einen regelrechten Befund der dorsalen Bandstrukturen bestätigt. Abbildung 30f zeigt den LWK 1-Dornfortsatz (Pfeil) und das intakte Ligamentum supraspinale (Pfeilspitze) zwischen LWK 1 und LWK 2 am Operations-Situs.

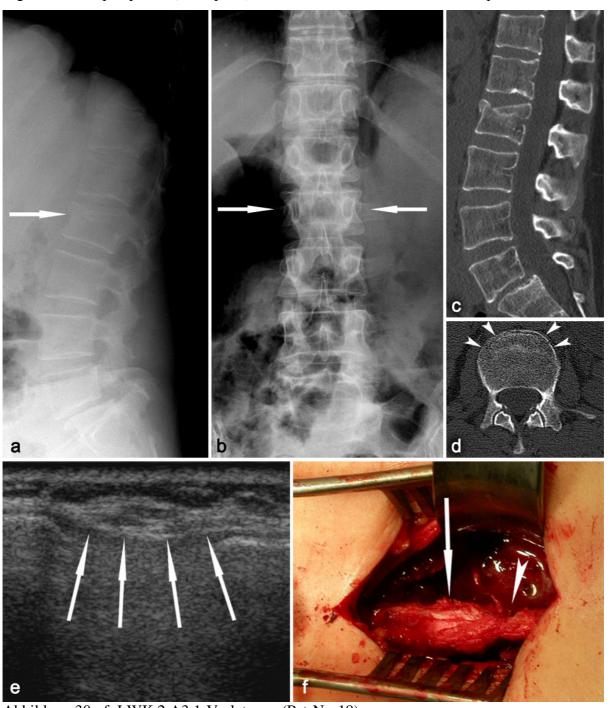


Abbildung 30a-f: LWK 2 A3.1-Verletzung (Pat-Nr. 19)

Fall 2: Eine 47jährige Patientin (Pat-Nr. 23) erlitt einen Verkehrsunfall als Beifahrerin. Die primär fehlerhafte Aufnahmeklassifikation lautete LWK 3 A3.3-Fraktur (Abb. 31a-d) bei Druckdolenz ohne eine tastbare interspinöse Delle. Der Pfeil in Abbildung 31e markiert die Diskontinuität des Ligamentum supraspinale im Ultraschallbild. Die intraoperativ entdeckte Ruptur in Abbildung 31f (Kreis) bestätigte den sonografischen Befund und führte zu einer notwendigen Reklassifikation von Typ A3.3 nach Typ B1.2.

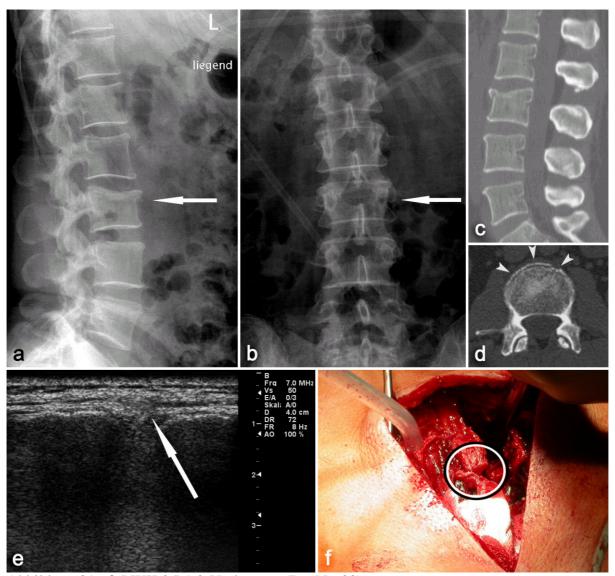


Abbildung 31a-f: LWK 3 B1.2-Verletzung (Pat-Nr. 23)

Fall 3: Ein 48jähriger Patient (Pat-Nr. 21) stürzte aus zwei Metern Höhe von einer Leiter und erlitt eine LWK 2 A3.1-Verletzung (Abb. 32a-d). Der intakte PLC wurde sonografisch als rupturiert fehlgedeutet. Das Ligamentum supraspinale war nur im kaudalen Anteil zu erkennen (Abb. 32e Pfeil), im kranialen Anteil dagegen imponierte eine diffuse echoreiche Struktur (Abb. 32e Pfeilspitzen). Intraoperativ stellten sich die dorsalen Strukturen jedoch als intakt heraus.

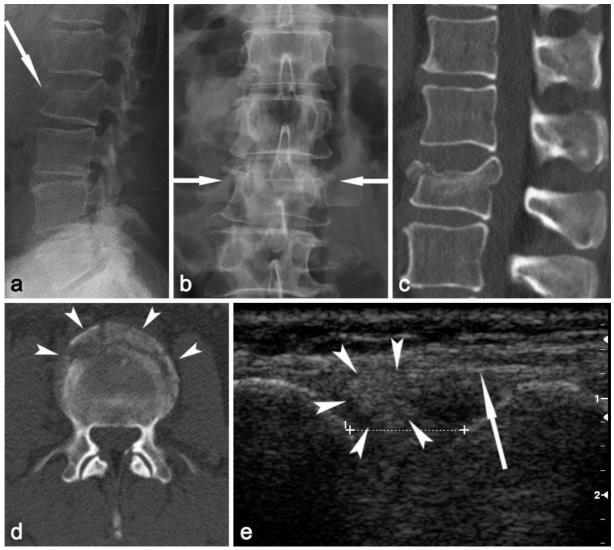


Abbildung 32a-e: LWK 2 A3.1-Verletzung (Pat-Nr. 21)

Fall 4: Eine 27jährige Patientin (Pat-Nr. 8) stürzte beim Schlittschuhlaufen und erlitt eine BWK 12-Fraktur, die bei ihrer Aufnahme als Typ A3.3 klassifiziert wurde (Abb. 33a+b). Auch sonografisch bestand kein Verdacht auf eine B-Verletzung (Abb. 33e Pfeil echoreiche Struktur). Das nach der Aufnahme angefertigte CT dagegen zeigte eine Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes zwischen BWK 11 und BWK 12 (Abb. 33c) und eine deutliche Hinterkantenbeteiligung (Abb. 33d Pfeilspitzen). Eine Druckdolenz und tastbare interspinöse Delle erhärteten den Verdacht auf eine B-Verletzung. Intraoperativ stellte sich heraus, dass das Ligamentum supraspinale nicht zwischen den Processus spinosi rupturiert war, sondern unmittelbar am Ansatz des Dornfortsatzes des BWK 12 und diesem plan anlag (Abb. 33f, Demonstration mit der Pinzette am OP-Situs). Es handelte sich somit um eine B1.2.1-Verletzung, bei der der rupturierte PLC sonografisch als intakt fehlgedeutet wurde.

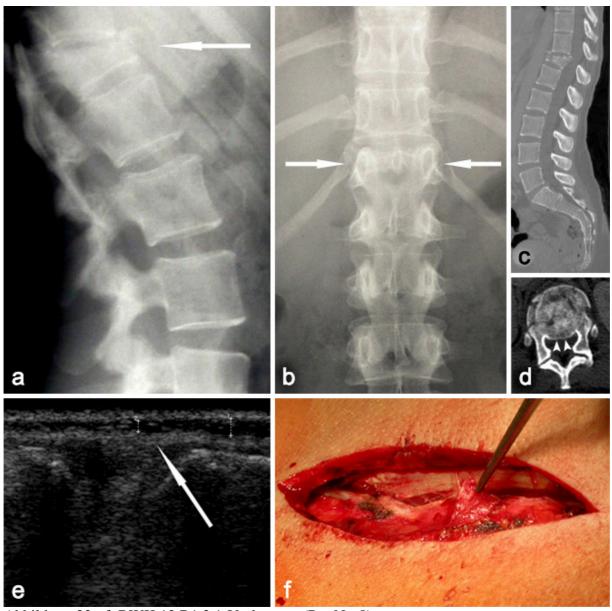


Abbildung 33a-f: BWK 12 B1.2.1-Verletzung (Pat-Nr. 8)

# III.2.8 Treffsicherheit des diagnostischen Verfahrens

Die Sensitivität der Ultraschalluntersuchung bei 22 Patienten betrug 83,3%, die Spezifität 93,8%, der positive Vorhersagewert 83,3% und der negative Vorhersagewert 93,8%. Die Prävalenz betrug 27,3% (Tab. 45).

Tabelle 45: Treffsicherheit der Ultraschalluntersuchung

	Ultraschallbefund positiv	Ultraschallbefund negativ
	Ruptur des PLC	Integrität des PLC
Tatsächlicher PLC rupturiert	5	1
Sachverhalt PLC intakt	1	15
	6	16
Sanaitivität (%)	92 22 07	
Sensitivität (%)	83,33 %	
Spezifität (%)	93,75 %	
Positiver Vorhersagewert (%)	83,33 %	
Negativer Vorhersagewert (%)	93,75 %	
Prävalenz (%)	27,27 %	

#### IV. DISKUSSION

## IV.1 Retrospektive Analyse

Thorakolumbale Distraktionsverletzungen vom Typ B (AO-Klassifikation [10]) stellen eine diagnostische Herausforderung dar. Vor allem die dorsal überwiegend ligamentären Verletzungen (Typ B1) können mit der radiologischen Standarddiagnostik mittels Röntgen und CT nicht immer erkannt werden [12, 22]. Einige Autoren sehen sogar keinerlei Korrelation zwischen dem radiologischen Bild der Wirbelfrakturen und dem Zustand des PLC [11]. Ziel der retrospektiven Studie war es, dieses diagnostische Problem zu konkretisieren und Hinweise für das Erkennen von B1-Verletzungen herauszuarbeiten.

Über einen Zeitraum von 68 Monaten wurden 361 Frakturen von 270 Patienten untersucht. B-Verletzungen machten fast 26% aller Verletzungen aus und 42% aller Flexions-Distraktions-Verletzungen wurden initial bei Aufnahme des Patienten als Kompressionsverletzungen fehldiagnostiziert. Anhand der operativen Befunde mussten diese primär fehlklassifizierten Frakturen aufgrund ihrer Instabilität zu B-Verletzungen reklassifiziert werden.

B1-Verletzungen machten einen Anteil von beinahe 60% aller B-Verletzungen und 72% aller nicht erkannten B-Verletzungen aus. Von 55 rein ligamentären B-Verletzungen wurden primär 51% fehlklassifiziert.

B1-Verletzungen kamen häufiger im thorakolumbalen Übergang vor als B2-Verletzungen (p = 0.001) und waren in der Wirbelsäule kaudaler lokalisiert als B2-Verletzungen (p = 0.023). Der Vergleich der klinischen Daten der B1- und B2-Verletzungen ergab keine Unterschiede. Eine Besonderheit kam der Unfallursache des Sturzes zu. In diesen Fällen wurden signifikant mehr B-Verletzungen durch Stürze aus geringer bis mittlerer Höhe als aus großer Höhe initial fehldiagnostiziert (p = 0.001). Dies traf ebenso auf ausschließlich ligamentäre B-Verletzungen zu (p = 0.031).

Bei 29% der B1-Verletzungen ließ sich kein radiologischer Hinweis auf eine diskoligamentäre Verletzung finden. Die häufigsten Zeichen der B1-Verletzungen mit radiologischen Zeichen waren ein Segmentwinkel von mehr als 15° und eine erhebliche Kompression der

Wirbelkörperspongiosa, obwohl die Wirbelkörpervorderkante um weniger als 50% reduziert war, gefolgt von einer Reduzierung der Wirbelkörpervorderkante um mehr als 50%.

## IV.1.1 Diskussion der Methoden – Kriterien der Reevaluation

Nachstehend folgt die Erläuterung der für die Reevaluation nach ausführlicher Literaturrecherche entwickelten radiologischen Kriterien ligamentärer B-Verletzungen. Zur Erkennung von diskoligamentären Verletzungen anhand von Röntgen- und CT-Bildern werden in der Literatur folgende Hinweise genannt.

## IV.1.1.1 Vergrößerter Abstand der Dornfortsätze

Erste Angaben zu der Aufweitung des Interspinalraumes stammen aus den siebziger Jahren [4, 47]. Naidich et al. gingen näher auf dieses Zeichen ein, indem sie als Zeichen für eine anteriore Dislokation in der Halswirbelsäule eine Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes um 150% im Vergleich zu den Anschlusssegmenten angaben [48].

Daffner et al. trafen eine zufällige Auswahl von 125 Patienten und untersuchten 138 Wirbelkörperfrakturen anhand von konventionellen Röntgenbildern und CT [13]. Die Autoren verwendeten einen Dornfortsatzabstand von über 2 mm im Vergleich zu den Anschlusssegmenten als Instabilitätskriterium. Die radiologischen Befunde wurden mit klinischen Befunden und der Entscheidung des Klinikers über Stabilität verglichen. Eine Validierung dieses Grenzwertes mittels intraoperativer Befunde wird allerdings nicht erwähnt.

Neumann et al. führten eine in-vitro-Studie zu Flexions-Distraktions-Verletzungen mittels einer Simulation von Beckengurtverletzungen durch [16]. Durch Auswertungen von Messungen an 20 Lendenwirbelsäulenpräparaten bestehend aus zwei benachbarten Wirbelkörpern gaben sie als Richtwerte für eine drohende Instabilität eine relative Zunahme des Dornfortsatzabstandes ab 20 mm im ap-Röntgenbild an. Eine totale Instabilität fanden sie ab einer Zunahme von 33 mm. Dabei handelt es sich allerdings um eine Vergrößerung des Abstandes um diese Werte vom Anfangsmaß und nicht um den absoluten Abstand zweier Dornfortsätze. Zum einen wurden die Versuche nach Entfernung der Rückenmuskulatur durchgeführt und zum anderen handelt es sich um Werte unter hoher Belastung. Möglicherweise sind dies die Gründe für die außerordentlich hohen Messergebnisse.

Die präziseste Arbeit zu dem Abstand zweier Dornfortsätze führten Neumann et al. Ende der neunziger Jahre durch [17]. Sie werteten konventionelle Röntgenbilder im Bereich von BWK 12 bis LWK 5 von 200 Patienten ohne Wirbelsäulenpathologie aus. Um zunächst die genaue Projektion der Landmarken eines Dornfortsatzes im ap-Röntgenbild zu lokalisieren, wurden verschiedene Metallmarkierungen an einem knöchernen Lendenwirbelsäulenpräparat vorgenommen. Daraufhin erfolgten 999 Abstandsmessungen anhand der Strecke zwischen den kranialen Zacken der Dornfortsätze an der inneren Konfluenz der röntgendichten Linien im ap-Bild. Ein Unterschied der Dornfortsatzabstände über 7 mm im Vergleich zu den Anschlusssegmenten wird nach dieser Messmethode als zu interpretierendes Zeichen einer PLC-Läsion empfohlen. Die Autoren halten die ap-Röntgenaufnahme für ein einfaches und praktikables Hilfsmittel zur Erkennung von PLC-Läsionen.

Die aktuellsten Angaben zu einer Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes wurden 2006 von Vaccaro et al. gemacht [18]. Nach einer eingehenden Literaturrecherche über Kriterien ligamentärer Verletzungen erfolgte die Befragung einer internationalen "Spine Trauma Study Group" zu 14 Kriterien, die eine Läsion des PLC nahe legen. Die Mitglieder ordneten diese vorgegebenen Kriterien nach aufsteigender Relevanz und führten ein neues Kriterium ein. Dabei handelte es sich um einen vergrößerten interspinösen Abstand von 7 mm im Vergleich zu einem der angrenzenden Segmente im ap-Röntgenbild. Es wurden jedoch keine Angaben zu den Messpunkten gemacht.

In der Literatur finden sich uneinheitliche Messempfehlungen zur Vergrößerung des Abstandes zwischen den Dornfortsätzen im betroffenen Segment. Nachteil sämtlicher Angaben in der Literatur sind die verwendeten absoluten Messwerte. Lee et al. dagegen schlugen in einer MRT-Studie einen vergrößerten Abstand um mindestens 20% im Vergleich zu den Anschlusssegmenten vor [24]. Blauth et al. empfahlen in ihrer Studie zur Klassifikation von thorakolumbalen Frakturen einen um mindestens 30% vergrößerten Abstand [23]. Relativen Werten kommt mehr Bedeutung zu, denn zum einen unterscheiden sich Dornfortsatzabstände intra- und interindividuell und zum anderen unterscheiden sich absolute Zahlen je nach Abstand des Patienten zu der Röntgenkassette [17]. Je weiter der Röntgenfilm von der Wirbelsäule entfernt ist, desto größer fallen Streckenmessungen aus. Aus diesen Gründen diente in dieser Studie zunächst ein relativer prozentualer Wert im Vergleich zu den oberen und unteren Anschlusssegmenten einer verbesserten Gegenüberstellung zwischen den Fällen. Allerdings sind die Messung und besonders die Berechnung im klinischen Alltag aufwändig und somit nicht

praktikabel. Es kann davon ausgegangen werden, dass Kliniker ohne spezielles Fachwissen über Wirbelsäulentraumatologie den Abstand zweier Dornfortsätze lediglich abschätzen. Ein Grenzwert als Kriterium für ligamentäre B-Verletzungen sollte dennoch definiert werden. Daffner et al. begründen die Festlegung eines Schwellenwertes von nur 2 mm nicht [13]. Somit erschien dies bei ohnehin teils erschwerter Visualisierung der Dornfortsatzstrukturen im Röntgenbild nicht als reliable Methode. Solch große Abstände hingegen, wie sie in der in-vitro-Studie von Neumann at al. [16] beschrieben wurden, finden sich nach Meinung erfahrener Wirbelsäulenchirurgen der eigenen Klinik bei instabilen Verletzungen nicht in Röntgenaufnahmen ohne Belastung und stellten sich somit als Grenzwert im klinischen Alltag als ebenso ungeeignet heraus. Basierend auf der jüngsten Studie von Vaccaro et al. galt in dieser Studie ein Unterschied von mindestens 7 mm zu einem der angrenzenden Segmente als eine Dornfortsatzabstandvergrößerung [18].

#### IV.1.1.2 Segmentwinkel

Zahlreiche Autoren haben sich mit dem Bewegungsausmaß und Winkeln der Wirbelsäulensegmente beschäftigt.

Nagel et al. führten eine biomechanische Studie an fünf Kadavern zum Bewegungsausmaß zwischen dem ersten und zweiten Lendenwirbelkörper durch [15]. Sie fanden ein durchschnittliches Bewegungsausmaß der Flexion/Extension von 8,4° bei intaktem PLC, von 9,4° bei Läsion des Ligamentum supraspinale und interspinale und von 12,5° bei zusätzlicher Läsion der Facettengelenke. Es zeigte sich trotz der geringen Fallzahl eine signifikante Zunahme des Bewegungsumfanges nach Durchtrennung der Facettengelenke. Die höchste Beweglichkeit bei intaktem PLC betrug 12° und geringste 7°. Die Autoren konnten zeigen, dass bei einer Flexion von mehr als 20° ohne Fraktur des Wirbelkörpers alle posterioren Bänder und sogar ein Anteil des Anulus fibrosus zerrissen sein müssen.

Auf der Basis umfangreicher in-vivo und in-vitro Studien entwickelten White und Panjabi repräsentative Werte zu den einzelnen Wirbelsäulensegmenten [7]. Für die obere Brustwirbelsäule gaben sie ein Bewegungsausmaß der Flexion/Extension von 4°, für die mittleren Segmente von 6° und für BWK 11 bis LWK 1 ein Bewegungsausmaß von 12° an. In der Lendenwirbelsäule findet sich eine kraniokaudale Zunahme der Beweglichkeit von LWK 1/2 bis LWK 5/SWK 1 von 12° bis 17°. Die Autoren unterschieden bei dem Verdacht auf Instabilität zwischen einem relativen Winkel im Vergleich zu den Anschlusssegmenten auf einer einzigen

Röntgenaufnahme in Ruhe und einem Segmentwinkel, der von dynamischen Aufnahmen in Flexion und Extension abgeleitet wird. In beiden Fällen erfolgte die Messung monosegmental von der Deckplatte des von der Fraktur kaudal gelegenen Wirbelkörpers bis zur Deckplatte des frakturierten Wirbelkörpers. Der relative Winkel ergibt sich aus der Differenz des Winkels des betroffenen Segments und dem der jeweils benachbarten Segmente. Er ist bei einer Winkelgröße von über 5° in der Brustwirbelsäule und von über 22° in der Lendenwirbelsäule hochgradig verdächtig auf eine klinische Instabilität [49]. Die dynamischen Aufnahmen hingegen ergeben die zweite Methode durch die Differenz aus den in Flexion und Extension vorgenommenen Messungen. Dabei werden Verletzungen mit einem Bewegungsausmaß von mehr als 15° von LWK 1 bis LWK 4, von mehr als 20° bei LWK 4/5 und 25° bei LWK 5/SWK 1 als potentiell instabil angesehen [7]. Dynamische Aufnahmen beinhalten einen großen Nachteil, da ausgeprägte Bewegungen bei fraglich instabilen Verletzungen zu vermeiden sind.

Farcy et al. führten eine prospektive Studie an 35 Patienten durch und definierten den "Sagittal Index (SI)" für den Bereich von BWK 12 bis LWK 2 zur Bewertung des Risikos einer fortschreitenden Progression kyphotischer Fehlstellungen [14]. Sie verwendeten einen standardisierten Korrekturwert für die jeweilige Wirbelkörperhöhe. Dynamische Aufnahmen sind dabei nicht notwendig. Bei dem Sagittal Index handelt es sich um einen durch die lokale physiologische Krümmung korrigierten segmentalen Kyphosewinkel. Dabei wird von dem gemessenen Kyphosewinkel ein "Basiswert" für die jeweilige Frakturhöhe subtrahiert. Die Autoren arbeiten mit einem Basiswert von 5° in den thorakalen Segmenten, 0° im thorakolumbalen Übergang, -10° in den lumbalen Segmenten und nach der Subtraktion mit einem Grenzwert des SI von 15° bei der Einteilung der Patienten in unterschiedliche Therapiegruppen. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass der Sagittal Index ein wertvolles und reproduzierbares Hilfsmittel zur Prognose einer im Verlauf fortschreitenden Progression der Fehlstellung ist. Da in der Gruppe der konservativ therapierten Frakturen mit praeoperativen SI-Werten kleiner als 15° aber in keinem Fall eine langfristige Fehlstellung resultierte, ermutigen die Autoren zur Erweiterung der Indikationsstellung zur konservativen Therapie auf einen SI-Grenzwert von 20° oder gar 25°. Nach Umkehr der Rechnung ergibt sich bei einem Sagittal Index von 25° ein Schwellenwert von 15° als Grenzwert für den segmentalen Kyphosewinkel in den lumbalen Segmenten und von 30° in den thorakalen Segmenten.

Es besteht eine Diskrepanz zwischen der schriftlichen Schilderung der Messmethoden und der abgebildeten Winkelmessung von Farcy et al. Sie geben an, den Winkel nach Cobb verwendet zu haben [14]. Ursprünglich zur Messung von Fehlstellungen in der coronaren Ebene beschrieben [50], wurde der Winkel nach Cobb zur Messung in der sagittalen Ebene adaptiert. Dabei handelt es sich um den Winkel zwischen der Grundplatte des kaudal von der Fraktur gelegenen Wirbelkörpers bis zur Deckplatte des kranial von der Fraktur gelegenen Wirbelkörpers und somit um einen bisegmentalen Winkel [51]. Doch in den Illustrationen in der Arbeit von Farcy et al. erfolgt die Messung monosegmental von der Grundplatte des betroffenen Wirbelkörpers bis zur Grundplatte des kranial gelegenen Wirbelkörpers. Auch Keynan et al. erkennen den Widerspruch in der Arbeit von Farcy et al. und interpretieren die Winkelmessung in der Abbildung sogar von der Grundplatte bis zur Deckplatte des frakturierten Wirbelkörpers [51].

Neumann et al. konnten in der in-vitro-Studie an 20 Bewegungssegmenten der Lendenwirbelsäule eine drohende Instabilität ab 12° und eine totale Instabilität ab 19° Kyphose des Segments nachweisen [16], vorausgesetzt es liegt keine Kompressionsfraktur der mittleren Säule nach dem Drei-Säulen-Modell von Denis vor [8]. Sie fanden in der Lendenwirbelsäule eine Beweglichkeit von 10° bei einer ursprünglichen Lordose von 3° bis zu einer maximalen Flexion ohne Verletzungsfolge von 7°. Die Abtragung der paravertebralen Muskulatur zur Versuchsdurchführung erklärt möglicherweise die diskret höhere Segmentbeweglichkeit im Vergleich zu der Arbeit von Nagel et al. [15].

Kuklo et al. untersuchten die Intraobserver- und Interobserverreliabilität fünf verschiedener Messtechniken an thorakalen und lumbalen Berstungsfrakturen nach dem Drei-Säulen-Modell von Denis [8, 52]. Drei Wirbelsäulenchirurgen nahmen die Messungen in zwei Sitzungen an fünfzig seitlichen Röntgenaufnahmen vor. Der bisegmentale Winkel nach Cobb [50] zeigte sowohl die höchsten Korrelationskoeffizienten als auch die höchste Wahrscheinlichkeit, bei wiederholter Messung innerhalb von 5° Abweichung im Vergleich zur ersten Messung zu liegen.

Es herrscht gegenwärtig kein Standard, auf welche Weise die Geraden bei der Winkelmessung im seitlichen Röntgenbild angelegt werden sollten. Eine Besonderheit beinhaltet die Wirbelkörperdeckplatte, die sich dorsalwärts zu einem Sporn erhebt, der die geradlinige Oberfläche des Wirbelkörpers und damit die Messmethode beeinträchtigen kann. Keynan et al. empfehlen die Anlage der Geraden parallel zu der geradlinigen Deckplattenoberfläche und die Vernachlässigung des Deckplattensporns [51].

Bei der Festlegung der Winkelmessung für die eigene Studie waren zwei Aspekte von Bedeutung. Zum einen sollte sie so wenig Wirbelkörper und Bandscheiben wie möglich einschließen. Denn je mehr Strukturen involviert sind, desto schlechter lässt sich zuordnen, in welchem Maße die Deformität durch die Verletzung selbst verursacht wird. Bei einer bisegmentalen Messung würde der Wert durch die physiologische Krümmung des benachbarten Segments beeinflusst. In ihrer Fürsprache für eine bisegmentale Messung behandeln Kuklo et al. lediglich die Realibilität der Messung und nicht die Winkelgröße instabiler B-Verletzungen [52]. Aus diesen Gründen fiel die Entscheidung für eine monosegmentale Messung. Zum anderen sollte eine Messung praktikabel sein. Die abzusehenden Schwierigkeiten einer genauen Linienplazierung an einer frakturierten Deckplatte einschließlich des dorsalen Sporns führten schlussendlich zu einer Winkelmessung von der Grundplatte des betroffenen Wirbelkörpers bis zur Grundplatte des kranial von der Fraktur gelegenen Wirbelkörpers.

Ziel war zudem die Festlegung eines einheitlichen Schwellenwertes des Segmentwinkels als Kriterium für ligamentäre B-Verletzungen ohne notwendige Rechnungen. Auf der Basis der Erkenntnisse von Farcy et al. mit der Empfehlung des SI-Grenzwertes und derer von Neumann et al. und Nagel et al. wurde ein Segmentwinkel von über 15° als Zeichen für eine ligamentäre B-Verletzung definiert [14, 15, 16].

#### IV.1.1.3 Reduktion der Höhe der Wirbelkörpervorderkante

In einer prospektiven Studie von McAfee et al. wiesen alle instabilen Berstungsbrüche mehr als 50% Verlust der Wirbelkörperhöhe im seitlichen Röntgenbild auf [19]. Die Autoren empfahlen dieses Zeichen als Indikationstellung zur operativen Therapie.

Willen et al. verwendeten in einer prospektiven Studie bei der Unterteilung von 54 konservativ behandelten Berstungsfrakturen auf der Höhe von BWK 12 und LWK 1 das Drei-Säulen-Modell von Denis [8, 20]. Sie sehen die Notwendigkeit einer Beschreibung des Kompressionsausmaßes der Wirbelkörpervorderkante von Berstungsfrakturen und geben für schwerwiegende Berstungsfrakturen eine Reduktion der Wirbelkörpervorderkante um mehr als 50% an.

Somit wurde auch in dieser Studie die Berechnung im Vergleich zu den Anschlusssegmenten nach Willen et al. vorgenommen und für die Reduktion der Wirbelkörpervorderkante ein Schwellenwert von 50% als Instabilitätskriterium verwendet [20].

#### IV.1.1.4 Kompression der Wirbelkörperspongiosa

Die Wirbelsäulenchirurgen am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie berichteten über eine beobachtete erhebliche Kompression der Spongiosastruktur des frakturierten Wirbelkörpers bei Patienten mit B-Verletzungen. In dem Moment der Verletzung wird der Wirbelkörper erheblich komprimiert und die Flexion erfolgt bis zu einer Ruptur der dorsalen Strukturen. Durch Rückenlage findet anschließend eine partielle spontane Reposition statt. In der Literatur finden sich keine Angaben zu einer solchen Besonderheit. Somit wurde als Kriterium aus eigener Erfahrung eine Spongiosakompression trotz erhaltener Höhe der Wirbelkörpervorderkante über 50% hinzugefügt.

## IV.1.1.5 Verlängerte Wirbelkörperhinterkante

Denis erwähnte in seiner Arbeit zum Drei-Säulen-Modell erstmalig eine Zunahme der hinteren Wirbelkörperhöhe oder eine Fraktur der Hinterkante als typische Zeichen der "Anschnallgurt-Verletzungen", die durch den Mechanismus einer Flexion-Distraktion entstehen [8].

In einer Arbeit aus dem Jahr 1987 beschäftigten sich Daffner et al. ausschließlich mit der Wirbelkörperhinterkante [53]. In der thorakolumbalen Region unterbricht das in den Wirbelkörper eintretende versorgende Gefäß die Hinterkantenlinie physiologisch. Die Autoren empfehlen jede andere Unterbrechung der Hinterkantenlinie als Zeichen einer Läsion der mittleren Säule zu werten. Das Zeichen prognostiziere eine Berstungsfraktur und sei dem Chirurg eine Hilfe bei der Einschätzung der Stabilität. Sie verwendeten jedoch eine eigene Einteilung der Frakturen. Sie geben an, dass alle Berstungsfrakturen von den meisten Chirurgen als instabil angesehen werden, da diese durch genügend dorsal knöcherne und ligamentäre Schäden verursacht werden. Eine Verlängerung der Hinterkante wird nicht erwähnt.

In einer Studie von Petersilge et al. zur Magnetresonanztomographie bei Berstungsfrakturen nach dem Drei-Säulen-Modell von Denis vermuten die Autoren eine normale oder verlängerte mittlere Säule bei Flexionsverletzungen und geben an, dass dieses radiologische Kriterium bei der Unterscheidung stabiler und instabiler Verletzungen helfen könnte [8, 11]. Die Höhe der Wirbelkörperhinterkante wurde jedoch nicht evaluiert.

Der Grund für die Aufnahme dieses Kriteriums war insbesondere eine Studie von Leferink et al. [22]. In der radiologischen Auswertung übersehener B-Verletzungen durch Längenmessungen war deren Wirbelkörperhinterkantenhöhe signifikant höher als diejenige der A-Verletzungen. In

der vorliegenden Studie sollten jedoch relative Werte einer besseren Vergleichbarkeit dienen. Zudem sollte die Evaluation des Kriteriums allein auf dem Röntgenbild des Patienten erfolgen und somit unabhängig von Bildmaterial der Patienten mit A-Verletzungen sein. Die rechnerische Ableitung aus der Arbeit von Leferink et al. ergab eine Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante um 9% im Vergleich zu A-Frakturen. Somit wurde ein Grenzwert von 9% im Vergleich zu den intakten Anschlusssegmenten für dieses Kriterium verwendet.

#### IV.1.1.6 Erweiterte Facettengelenke

O'Callaghan et al. stellten in einer Arbeit aus dem Jahr 1980 vier Fälle von Flexionsverletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule vor, anhand derer sie das Phänomen einer blanken Facette ("Naked Facet") beschrieben [54]. Dabei sind die oberen bzw. unteren Facetten des betroffenen Segments ohne den dazugehörigen Gelenkfortsatz in aufeinander folgenden 8 mm dicken CT-Schichten jeweils allein sichtbar.

Harris et al. untersuchten in zwei Studien das Zeichen NFS ("Naked Facet Sign") anhand eines computerbasierten Wirbelsäulenmodells für die Segmente BWK 11 bis LWK 2 und LWK 2 bis LWK 5 in 2 mm dicken CT-Schichten [55, 56]. Das Zeichen trat bei einem minimalen Winkel von 5° im thorakolumbalen Übergang und von 8° in der Lendenwirbelsäule auf und bei einem maximalen Winkel von 16,5° im thorakolumbalen Übergang und von 24,5° in der Lendenwirbelsäule auf. Nach Harris et al. legt das Phänomen der blanken Facetten den Verdacht auf eine Flexions-Distraktions-Verletzung in der lumbalen Wirbelsäule nahe. In den thorakolumbalen Segmenten dagegen weist das Zeichen nicht konsistent auf eine Instabilität der hinteren Säule hin.

Bei den beschriebenen blanken Facetten handelt es sich jedoch um die stärkste morphologische Ausprägung einer Entfernung beider Gelenkfortsätze voneinander durch Flexion-Distraktion. Gehweiler et al. untersuchten das Zeichen "erweiterte Facettengelenke" [21] und Daffner et al. "erweiterte Facettengelenke, Malalignment oder Kontaktverlust der Gelenkflächen" [13]. Somit sollte auch in dieser Studie das Kriterium der erweiterten Facettengelenke als Hinweis auf eine B-Verletzung gelten.

## IV.1.1.7 Inverse cortical sign

Magerl et al. beschrieben in ihrer Arbeit zum AO-Klassifikationssystem das Phänomen des "inverse cortical sign" bei B-Verletzungen, das durch eine Fortführung der Drehung des nach kranial verkippten Bruchstückes der Wirbelkörperhinterkante entsteht [10].

## IV.1.2 Diskussion der Ergebnisse

#### IV.1.2.1 Demografische Daten

Das Kollektiv von 270 Patienten setzte sich aus 66% Männern und 34% Frauen zusammen. Das Durchschnittsalter betrug 39 Jahre (14-79). Dies entspricht exakt den Angaben in der Literatur. Laut einer prospektiven multizentrischen Studie der Arbeitsgemeinschaft Wirbelsäule der deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie an 682 Patienten waren 64% der Patienten männlich, 36% weiblich und deren Durchschnittsalter betrug 39,5 Jahre (7-83) [57]. Zudem konnte in dieser Studie gezeigt werden, dass Patienten mit C-Verletzungen signifikant jünger waren als jene mit A- und B-Verletzungen (p = 0,019 und p = 0,0) und, dass Patienten mit B-Verletzungen signifikant jünger waren als jene mit A-Verletzungen (p = 0,04).

#### IV.1.2.2 Verletzungsklassifikation

Von den untersuchten 361 Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule machten Kompressionsfrakturen mit 55% den Hauptanteil aus. Magerl et al. untersuchten sowohl konservativ als auch operativ therapierte Frakturen und berichten über 66% A-Verletzungen [10]. Der Anteil der in der eigenen Studie vorhandenen Kompressionsfrakturen ist somit kleiner, jedoch wurden nur die operativ versorgten Frakturen berücksichtigt. Dies führt zum Ausbleiben eines erheblichen Anteils an Impaktionsbrüchen (Typ A1) und Spaltbrüchen (Typ A2) zur Beurteilung der Gesamtverteilung. Knop et al. hingegen werteten ebenso allein operativ versorgte Frakturen aus, fanden 65% A-Verletzungen und somit 10% mehr als in der vorliegenden Studie [57]. Die Autoren berücksichtigten jedoch nur Verletzungen auf der Höhe von BWK 12 bis LWK 2.

Anteilig am Typ A fanden Knop et al. 88% A3-Verletzungen, gefolgt von 6% A1-Verletzungen, entgegen 68% A3-Verletzungen und 28% A1-Verletzungen in dieser Studie. Ein Grund für die unterschiedliche Verteilung innerhalb der A-Verletzungen könnte in der alleinigen Berücksichtigung des schwerstverletzten und operierten Wirbelkörpers in der Studie von Knop et al. liegen. Dies erklärt möglicherweise den deutlich geringeren Anteil an A1-Verletzungen bei Knop et al. [57].

B-Verletzungen kamen 93mal (25,8%) vor. In der Literatur wird der Anteil von B-Verletzungen von Magerl et al. mit 14,5% angegeben [10]. Der Anteil der dieser Studie gefunden B-Verletzungen ist somit höher. Dies ist wiederum auf das Ausbleiben konservativ therapierter

Patienten mit vor allem A1- und A2-Verletzungen im eigenen Patientenkollektiv zurückzuführen. Knop et al. hingegen fanden mit 136 B-Verletzungen einen Anteil an Flexions-Distraktions-Verletzungen von 20% [57]. Sie werteten mit 682 operativ therapierten Frakturen deutlich mehr Fälle aus, jedoch ausschließlich auf der Höhe von BWK 12 bis LWK 2.

59% aller B-Verletzungen waren dorsal ligamentäre (Typ B1) und 41% dorsal knöcherne Verletzungen (Typ B2). Magerl et al. gaben hierfür einen Anteil von 60% bzw. 38% an [10]. Die prozentuale Verteilung der Gruppen innerhalb der B-Verletzungen entspricht damit nahezu den Daten von Magerl et al., die 1445 Frakturen auswerteten. Knop et al. fanden dagegen mit 48% deutlich weniger B1-Verletzungen und mit 47% geringfügig mehr B2-Verletzungen in einem Kollektiv mit 682 Patienten [57]. Den größten Anteil in der eigenen Studie machte der Typ B1.2.1 mit 50,5% aller B-Verletzungen aus. Am zweithäufigsten fand sich der Typ B 2.3.1 mit 19%. Magerl et al. und Knop et al. nahmen keine weitere Unterteilung der Gruppen vor. Im Gegensatz zu diesen Studien beinhaltete das eigene Patientenkollektiv keine B3-Verletzung. Magerl et al. fanden drei und Knop et al. sieben Hyperextensionsverletzungen [10, 57].

C-Verletzungen kommen nach Magerl et al. in 19% und nach Knop et al. in 15% der Fälle vor. Der Anteil der Rotationsfrakturen ist in dieser Studie mit 20% geringfügig höher. Die Verteilungsform auf die Gruppen innerhalb der C-Verletzungen (C1, C1 und C3) entspricht denen anderer Autoren [10, 57], wobei C1-Verletzungen am häufigsten vorkamen, gefolgt von C2- und schließlich C3-Verletzungen. Magerl et al. gaben 56% C1-Verletzungen und 39% C2-Verletzungen an, während Knop et al. 63% C1-Verletzungen und 30% C2-Verletzungen fanden. Die prozentualen Anteile innerhalb der C-Verletzungen dieser Studie (56% bzw. 34%) ergaben somit nur tendenzielle Unterschiede zu den Angaben in der Literatur [10, 57].

#### IV.1.2.3 Klinische Daten der Patienten mit B-Verletzungen

26% aller Patienten mit B-Verletzungen litten an einem neurologischen Defizit. In der Gruppe der B1-Verletzungen waren dies 25% und in der Gruppe der B2-Verletzungen 23%. Magerl et al. berichten bei der Auswertung von 1212 Patienten über in 32% aufgetretene neurologische Defizite bei Patienten mit B-Verletzungen. Auch in der Gruppe der B1- und B2-Verletzungen fanden sie häufiger neurologische Defizite (30% bzw. 33%) [10]. Knop et al. fanden mit 28% neurologischen Ausfällen bei Patienten mit B-Verletzungen der eigenen Studie annähernd gleiche Daten, jedoch unterschieden sie nicht weiter zwischen B1- und B2-Verletzungen [57].

Hauptursachen der B-Verletzungen waren in 67% der Fälle Stürze, gefolgt von Verkehrsunfällen in 22% der Fälle. Knop et al. unterschieden zwischen Stürzen aus der Höhe (50%), einfachen Stürzen (14%) und suizidalen Sprüngen (8%), machten jedoch keine genaueren Angaben zu B-Verletzungen. In dieser Studie führten Stürze der B-Verletzungen aus geringer bis mittlerer Höhe in 71% zu B1-Verletzungen, Stürze aus großer Höhe dagegen nur in 51% zu B1-Verletzungen. Der Unterschied war jedoch nicht signifikant (p = 0,067). Farcy et al. gaben in einem Patientenkollektiv von 35 reinen Berstungsfrakturen nach dem Drei-Säulen-Modell von Denis in 37% Stürze und in 29% Verkehrsunfälle an [8, 14].

#### IV.1.2.4 Verteilung der Frakturen auf die Wirbelkörperhöhen

In dieser Studie hatten 73% der Patienten Monotraumata und 27% Mehrfachverletzungen der Wirbelsäule erlitten. Magerl et al. fanden in einer Detailanalyse von 468 Fällen aus ihrer Studie einen Anteil von 23% an multisegmentalen Wirbelkörperfrakturen [10]. Knop et al. geben Mehrsegmentverletzungen mit 6% (über zwei aufeinander folgende, verletzte Segmente) und Mehretagenverletzungen mit 5% (unverletzte Segmente zwischen den betroffenen Segmenten) gegenüber mono- und bisegmentalen Verletzungen mit 89% an [57]. Somit stimmen die Daten der vorliegenden Studie mit denen der umfangreichen Arbeiten von Magerl et al. und Knop et al. weitestgehend überein.

#### IV.1.2.4.1 Wirbelkörperhöhen aller Verletzungen

In der gesamten thorakolumbalen Wirbelsäule war der erste Lendenwirbelkörper am häufigsten betroffen, gefolgt von BWK 12 und LWK 2, die gleich häufig betroffen waren. Eine übereinstimmende Verteilung geben Magerl et al. bei 1445 untersuchten Patienten an. Auch sie beobachteten zwei Gipfel von BWK 5 bis BWK 8 und von BWK 12 bis LWK 2 [10]. Das obere und untere Ende der thorakolumbalen Wirbelsäule, sowie BWK 10, sind am seltensten betroffen. Der thorakolumbale Übergang von BWK 12 bis LWK 2 ist in dieser Studie in 53% und laut Magerl et al. in 59% betroffen. Knop et al. werteten einzig Verletzungen von BWK 10 bis LWK 2 aus und fanden 49% der Frakturen auf Höhe von LWK 1, 25% auf Höhe von BWK 12 und 21% auf Höhe von LWK 2 [57]. Bei alleiniger Berücksichtigung der Wirbelkörperhöhen BWK 10 bis LWK 2 in der vorliegenden Studie resultieren 42% für LWK 1, 26% für BWK 12 und 24% für LWK 2. Die von Knop et al. beschriebene Verteilung wird somit durch die eigenen Daten bestätigt.

## IV.1.2.4.2 Wirbelkörperhöhen der B-Verletzungen

Laut Magerl et al. finden sich auch die Flexions-Distraktions-Verletzungen vermehrt im thorakolumbalen Übergang [10]. Während sich die Verteilung der B-Verletzungen in der eigenen Studie auf die verschiedenen Wirbelkörperhöhen nicht von denen der A- und C-Verletzungen unterschied, waren B1-Verletzungen im thorakolumbalen Übergang mit 73% signifikant häufiger (p = 0,001) zu finden als B2-Verletzungen mit lediglich 39%. Diese Beobachtung ist bisher noch nicht beschrieben worden. Ein Grund dafür könnte in der Segmentbeweglichkeit liegen. Die physiologische Beweglichkeit der Flexion/Extension ist im thorakolumbalen Übergang ab dem Bewegungssegment BWK 10/11 deutlich größer als in den darüber liegenden thorakalen Segmenten. Dies gilt dagegen nicht für die Seitbeugung und Rotation [7]. Kommt es zu einer Distraktions-Flexionsbewegung während des Traumas, so werden primär die Bänder gedehnt und nehmen einen Teil der einwirkenden Kraft auf, bevor sie in der maximalen Flexionsstellung reißen. Die geringere Beweglichkeit der mittleren und oberen Brustwirbelsäule in Kombination mit den sich überlappenden Dornfortsätzen könnte dagegen ein primär knöchernes Zerreißen begünstigen.

B-Verletzungen wurden in dieser Studie zudem mit einer fortlaufenden Nummerierung der Wirbelkörper versehen. Hier zeigte sich, dass die Frakturhöhen der B1-Verletzungen signifikant kaudaler (p = 0,023) lokalisiert waren als die der B2-Verletzungen. B1-Verletzungen lagen dabei mit einer durchschnittlichen Höhe von 12,2 mehr als eine Etage tiefer als B2-Verletzungen mit 10,7.

#### IV.1.2.5 Primäre Fehlklassifikationen

42% der insgesamt 93 B-Verletzungen wurden im Rahmen der Primärdiagnostik nicht als solche erkannt. Bezogen auf die Untergruppen bedeutet dies, dass 51% der B1-Verletzungen und 29% der B2-Verletzungen primär nicht korrekt klassifiziert wurden. Über diese Problematik berichten auch andere Autoren. So fanden Leferink et al. [22] in einem Kollektiv von 160 Patienten insgesamt 49 B-Verletzungen, von denen 35% primär nicht erkannt worden waren. Auch dort war die Erstdiagnose mittels Röntgen und CT gestellt worden. Die übersehenen Verletzungen wurden, wie auch in der vorliegenden Studie, typischerweise als A-Verletzungen fehlklassifiziert. 17 (13%) der 128 A-Verletzungen stellten sich intraoperativ aufgrund der Läsion des PLC als B-Verletzungen heraus. In der eigenen Studie ist dieser Anteil mit 16,5% geringfügig höher. Die Daten der eigenen Studie können jedoch als repräsentativer angesehen werden, da die Fallzahl mit initial 236 A-Verletzungen fast doppelt so hoch war.

In der Studie von Leferink et al. waren 70,5% der 17 initial nicht erkannten B-Verletzungen praeoperativ als A3-Frakturen klassifiziert worden [22]. Bei mehr als doppelt so vielen Fällen in der eigenen Studie war der Anteil der primär als A3-Frakturen fehlgedeuteten Verletzungen mit 59% zwar geringer, allerdings bleiben 12 Fälle (31%) aus, bei denen keine weitere Unterteilung der A-Verletzung vorlag. In diesen Fällen fehlt die Primärklassifikation in der Verteilung auf die Gruppen A1, A2 und A3.

Terk et al. führten eine Studie zur Diagnostik von posterioren ligamentären Verletzungen mittels MRT durch und fanden bei einem Kollektiv von 68 Patienten mit thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen bei 53% eine Verletzung des PLC [26]. Die Autoren verwendeten allerdings nicht die AO-Klassifikation [10], sondern diejenige nach Denis und teilten die Verletzungen in Kompressions-, Berstungs-, Flexions-Distraktions- und Dislokationsfrakturen ein [8]. Bei Subtraktion der Dislokationsfrakturen, die den C-Verletzungen nach Magerl entsprechen, verbleiben 32 Frakturen (47%), die den B-Verletzungen nach Magerl entsprechen. Von diesen waren 50% als Kompressions- und Berstungsfrakturen klassifiziert worden. Da diese beiden Verletzungstypen nach Denis jedoch in schweren Fällen mit einer PLC-Läsion einhergehen können, dürfen sie nicht mit den A-Verletzungen gleichgesetzt und somit nicht alle als fehlinterpretierte B-Verletzungen gewertet werden. Dennoch wurden von allen Verletzungen mit einer PLC-Läsion nur 19 (53%) eindeutig als Flexions-Distraktions- oder Dislokations-Verletzungen klassifiziert. Eine Validierung der MRT-Befunde anhand von intraoperativen Befunden war in nur sechs Fällen möglich. All diese Befunde stimmten jedoch durch Beobachtung von Läsionen des Ligamentum supraspinale, interspinale und Ligamentum flavum mit denen der MRT überein.

Schröder et al. führten eine Untersuchung zum Wert der praeoperativen 3-D-CT-Rekonstruktion bei thorakolumbalen Wirbelsäulenfrakturen durch [12]. Die ausschließliche Beurteilung der axialen CT-Bilder führte zu 35,4% nicht erkannten B-Verletzungen. Sofern nur die 2-D-Rekonstruktionen beurteilt wurden, lag die Rate nicht erkannter B-Verletzungen sogar bei 54,2%. Lediglich die 3-D-Rekonstruktion konnte den Anteil signifikant auf 12.5% senken. Als Goldstandard für den Vergleich galten die intraoperativen Befunde. In der vorliegenden Studie wurden im Rahmen der praeoperativen Diagnostik neben dem konventionellen Röntgenbild auch axiale CT-Schnittbilder und 2-D-Rekonstruktionen beurteilt, jedoch nicht standardmäßig 3-D-Rekonstruktionen. Die Rate primär nicht erkannter B-Verletzungen lag mit 42% geringfügig höher als bei Schröder et al. [12], erklärt sich aber möglicherweise durch die fast sechsmal so

hohe Anzahl eingeschlossener B-Verletzungen. Die Arbeit von Schröder et al. unterstreicht allerdings die Wertigkeit einer 3-D-Rekonstruktion zur Erkennung dieses Verletzungstyps.

Oner et al. führten eine MRT Studie anhand von 100 Frakturen durch [25]. Nach primärer Einteilung der Frakturen nach der AO-Klassifikation mit 74 A- und 23 B-Verletzungen mussten 15 Frakturen aufgrund der erhobenen MRT-Befunde des PLC als B-Verletzung reklassifiziert werden [10, 25]. Somit waren 20% der primären A-Verletzungen tatsächlich B-Verletzungen. In dieser Studie war der Anteil mit 16,5% bei mehr als dreimal so vielen A-Verletzungen geringer. Doch annähernd gleich zu dieser Studie wurden nach Oner et al. 39% der insgesamt 38 B-Verletzungen primär fehlklassifiziert [25]. In 96% der Fälle bestätigte sich der MRT-Befund in Form einer Läsion des PLC. Doch lediglich 38 der insgesamt 100 Verletzungen wurden von Oner et al. durch dorsales Vorgehen operativ therapiert. Die Autoren geben an, ihre Untersuchungen seien so nicht umfassend und empfehlen eine vollständige Verifizierung der MRT-Befunde durch intraoperative Befunde.

Petersilge et al. fanden bei 6 (29%) von 21 Patienten mit thorakolumbalen Berstungsfrakturen nach dem Drei-Säulen-Modell von Denis eine Ruptur des Ligamentum supraspinale in den MRT-Aufnahmen [8, 11]. Nur bei zwei (33%) dieser Patienten war die posteriore Verletzung im konventionellen Röntgen und CT erkannt worden. Somit wären bei reiner Beurteilung durch Röntgen und CT 67% der posterioren Bandverletzungen übersehen worden. Petersilge et al. gehen allerdings davon aus, dass Berstungsfrakturen in ihrer Studie wegen der engen Auswahlkriterien überrepräsentiert wurden. Zudem handelt es sich um eine sehr geringe Fallzahl an Frakturen mit PLC-Verletzungen.

Zwar beinhaltet die vorliegende Studie die höchste Fehlklassifikationsrate, sie wird jedoch als repräsentativer eingestuft, da sie die höchste Fallzahl an B-Verletzungen aufweist und ein realistisches Bild des klinischen Alltags widerspiegelt.

#### IV.1.2.5.1 Vergleiche

Leferink et al. unterteilten ihr Patientenkollektiv in A-Verletzungen, initial nicht erkannte B-Verletzungen und initial erkannte B-Verletzungen und analysierten sie hinsichtlich der Frakturhöhe, des Alters und des neurologischen Defizits [22].

#### IV.1.2.5.1.1 Wirbelkörperhöhen

Laut Leferink et al. lagen übersehene B-Verletzungen signifikant kaudaler als die primär erkannten B-Verletzungen. Die durchschnittliche Frakturhöhe der nicht erkannten B-Verletzungen betrug 13,5 und die der erkannten B-Verletzungen 12,8 [22]. In der vorliegenden Studie lagen die Werte mindestens eine Wirbelkörperhöhe kranialer, unterschieden sich jedoch nicht wesentlich voneinander (11,5 bzw. 11,7). Fehlklassifizierte B-Verletzungen fanden sich zwar öfter im thorakolumbalen Übergang (64%) als initial erkannte B-Verletzungen (55,6%), der Unterschied war jedoch nicht signifikant.

#### IV.1.2.5.1.2 Alter

Die Patienten von Leferink et al. mit erkannten bzw. nicht erkannten B-Verletzungen waren mit durchschnittlich 32 bzw. 33 Jahren nahezu gleich alt [22]. In dieser Studie waren die Patientengruppen zwar älter (37 bzw. 41 Jahre), unterschieden sich jedoch nicht signifikant voneinander.

#### IV.1.2.5.1.3 Neurologisches Defizit

Leferink et al. fanden weniger neurologische Defizite in der Gruppe der übersehenen B-Verletzungen (12%) als in der Gruppe der erkannten B-Verletzungen (50%), allerdings ohne einen signifikanten Unterschied [22]. In dieser Studie kamen neurologische Ausfälle annähernd gleich häufig in beiden Gruppen vor (24% bzw. 23%) und mit insgesamt 24% lagen geringfügig weniger neurologische Ausfälle bei monotraumatischen B-Verletzungen vor als bei Leferink et al. mit 30% [22].

#### IV.1.2.5.1.4 Unfallursache Sturz

In den Studien zur Problematik übersehener B-Verletzungen werden am häufigsten Verkehrsunfälle und Stürze genannt, jedoch ohne Evaluation der Unterschiede zwischen den Gruppen der erkannten und nicht erkannten B-Verletzungen. [11, 26]. In der Literatur finden sich keine Angaben zur Unfallursache der Stürze in Bezug auf fehlinterpretierte B-Verletzungen. In dieser Studie zeigte sich, dass Fehlklassifikationen bei Patienten mit Stürzen aus geringer bis mittlerer Höhe signifikant häufiger waren als bei Patienten mit Stürzen aus großer Höhe (p = 0,001). Dies wurde im Hinblick auf B1-Verletzungen genauer untersucht. Auch ligamentäre B-Verletzungen durch Stürze aus geringer bis mittlerer Höhe wurden signifikant häufiger fehlinterpretiert als jene aus großer Höhe (p = 0,031). Möglicherweise führt das Wissen um einen Sturz aus großer Höhe zu einer erhöhten Sensibilisierung für eine gravierendere

Verletzung in der klinischen Untersuchung oder gar in der Sorgfalt bei der Beurteilung der radiologischen Bildgebung.

## IV.1.2.6 Radiologische Reevaluation

## IV.1.2.6.1 Mittelwerte der radiologischen Kriterien aller B1-Verletzungen

Leferink et al. untersuchten den Kyphosewinkel, die vordere und die hintere Wirbelkörperhöhe in Millimetern und die prozentuale Kompression der Wirbelkörpervorderkante [22].

In der eigenen, sowie in der Arbeit von Leferink et al., war der Segmentwinkel der nicht erkannten B-Verletzungen geringer als derjenige der erkannten B-Verletzungen. In der Studie von Leferink et al. betrug der Segmentwinkel in der Gruppe der nicht erkannten B-Verletzungen im Durchschnitt 17,5° und in der Gruppe der primär erkannten B-Verletzungen 20° [22]. In der vorliegenden Studie fanden sich für diese Gruppen geringere Segmentwinkel mit 10° bzw. 15°. Dabei waren die Segmentwinkel beider Gruppen signifikant verschieden (p = 0,02). Die Ergebnisse dieser Studie stellen die radiologischen Merkmale der B1-Verletzungen heraus. Dagegen beinhaltet die Arbeit von Leferink et al. auch B2-Verletzungen. Wie viele B2-Verletzungen die Studie von Leferink et al. beinhaltet, bleibt jedoch unklar, da sie keine weitere Unterteilung der B-Verletzungen vornahmen.

Die vordere Wirbelköperhöhe der nicht erkannten B-Verletzungen war nach Leferink et al. etwa so hoch (25,6 mm) wie diejenige der erkannten B-Verletzungen (24,3 mm). Die Kompressionsrate des Wirbelkörpers beider Gruppen betrug 31% bzw. 30% [22]. In der eigenen Studie war die Reduktion der Wirbelkörpervorderkante der nicht erkannten B-Verletzungen mit 35% geringfügig größer als bei Leferink et al. Diejenige der erkannten B-Verletzungen war mit 30% gleich groß und ein signifikanter Unterschied beider Gruppen in der eigenen Studie lag nicht vor. Leferink et al. verwendeten eine andere Messmethode. Die Höhe der Wirbelkörperhinterkante diente den Autoren als Referenzwert für die Berechnung der Kompressionsrate. Dies ist jedoch bei möglicher Mitbeteiligung der Hinterkante nicht zweckmäßig. In der vorliegenden Studie wurden dagegen die intakten Anschlusssegmente als Referenzwerte verwendet.

In den Fällen mit einer Spongiosakompression, in denen die Reduktion der Wirbelkörpervorderkante 50% nicht überstieg, war die Spongiosa der nicht erkannten B-Verletzungen um 54% komprimiert. Die Spongiosa der initial erkannten B-Verletzungen war

nur um 45% komprimiert. Ein signifikanter Unterschied beider Gruppen lag jedoch nicht vor. Insgesamt ergab sich ein Durchschnittswert von 49%. Diese Auswertungen verdeutlichen, dass neben der Evaluation der Wirbelkörperkompression das neu eingebrachte Kriterium der Spongiosakompression möglicherweise eine entscheidende Rolle in der Diagnostik von B-Verletzungen spielen kann.

Die radiologische Auswertung der B-Verletzungen durch Leferink et al. ergab keinen Unterschied bezüglich der Hinterkantenhöhe des Wirbelkörpers zwischen den übersehenen und primär erkannten Verletzungen [22]. Allerdings war die Höhe der Wirbelkörperhinterkante der nicht erkannten B-Verletzungen um durchschnittlich 3,3 mm signifikant höher (40,2 mm) als die der A-Verletzungen (36,9 mm). Im Gegensatz zur eigenen Studie mit einem Vergleich zu den intakten Anschlusssegmenten handelt es sich bei Leferink et al. um Absolutwerte im Vergleich zu den Daten anderer Patienten. Trotz dieses Schwachpunktes schlussfolgerten die Autoren, dass eine verlängerte Wirbelkörperhinterkante bei unauffälligem Dornfortsatzabstand den Verdacht auf eine B-Verletzung nahe lege. Allerdings haben sie die Abstände der Dornfortsätze gar nicht untersucht. Die Daten entsprechen einer Verlängerung um 9% im Vergleich zu A-Verletzungen. In dieser Studie ergab der Durchschnitt der Messungen keine Verlängerung, sondern eine Kompression der Hinterkante um annähernd 5% im Vergleich zu den Anschlusssegmenten. Die Ergebnisse von Leferink et al. sind möglicherweise auf die B2-Verletzungen in deren Patientenkollektiv zurückzuführen. Eine horizontale Fraktur im dorsalen Anteil des Wirbelkörpers bei knöcherner Verletzung könnte die Hinterkante im Röntgenbild verlängert erscheinen lassen. Die Daten der vorliegenden Studie entsprechen somit nicht denen von Leferink et al. [22], sondern betreffen rein ligamentäre B-Verletzungen.

In der vorliegenden Studie war der Durchschnittswert der Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes der erkannten Verletzungen doppelt so groß (40,5%) wie derjenige der nicht erkannten B1-Verletzungen (19%). Diese Beobachtung ist bisher noch nicht beschrieben worden. Obwohl kein signifikanter Unterschied vorlag, zeigen die Daten, dass eine auffällige Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes trotz der bisher uneinheitlichen Messmethoden sehr wohl als Zeichen einer ligamentären Ruptur gewertet wird.

# IV.1.2.6.2 Häufigkeit der Kriterien bei B1-Verletzungen mit Existenz radiologischer Zeichen

Die Auswertung der Röntgen- und CT-Bilder der 55 Patienten mit B1-Verletzungen ergab bei 16 Patienten (29%) keinerlei Hinweis auf eines der definierten Kriterien. Diese diagnostische Lücke stellt im klinischen Alltag ein großes Problem dar. Die Gruppe setzte sich zusammen aus 11 Patienten, deren B-Verletzungen primär nicht erkannt wurden und fünf Patienten, deren B-Verletzungen sogar initial korrekt klassifiziert wurden. Weitere Faktoren, beispielsweise eine klinisch tastbare interspinöse Weichteildelle oder ein erheblicher Druckschmerz, könnten vorhanden gewesen sein, um selbst diese Frakturen als ligamentäre B-Verletzungen zu klassifizieren, wenngleich sie keine der momentan gängigen radiologischen Zeichen für diesen Verletzungstyp boten. Das Team der Rettungsstelle erkannte diese 5 B1-Verletzungen ohne radiologische Hinweise.

Insgesamt wurden 28 ligamentäre B-Verletzungen nicht erkannt. Dies bedeutet, dass 72% aller nicht erkannten B-Verletzungen ligamentäre B-Verletzungen waren und, dass 51% aller ligamentären B-Verletzungen fehldiagnostiziert wurden. In 11 dieser Fälle lagen keine radiologischen Zeichen vor. Nach welchen Kriterien das Notfallteam der Rettungsstelle (Assistenz- und Fachärzte der Chirurgie, Unfallchirurgie, Orthopädie, Radiologie) bei der Diagnosestellung vorging, bleibt unklar. Doch in 17 Fällen lag mindestens eines der für diese Studie retrospektiv definierten Kriterien einer B-Verletzung vor.

Bei diesen 17 Patienten fand sich als häufigstes radiologisches Zeichen eine erhebliche Kompression der Wirbelkörperspongiosa in 47% der Fälle, auch wenn die Wirbelkörpervorderkante um weniger als 50% reduziert war, gefolgt von einem Segmentwinkel über 15° in 41% und einer Reduktion der Wirbelkörpervorderkante um mehr als 50% in 29% der Fälle. Die Auswertung der 22 erkannten B1-Verletzungen mit radiologischen Zeichen ergab ein ähnliches Bild.

Zwei bestimmte Kriterien ergänzen sich und werden zur Hilfe bei der Diagnosestellung. Allein durch die beiden Zeichen "Reduktion der Wirbelkörpervorderkante über 50%" und "Spongiosakompression" hätten über 75% der fehlklassifizierten und über 70% aller B1-Verletzungen mit radiologischen Zeichen erkannt werden können. Auffällig war das vermehrte Vorkommen von erweiterten Facettengelenken in 27% der erkannten B-Verletzungen gegenüber 12% bei fehlklassifizierten B-Verletzungen. Vergrößerte Abstände der Dornfortsätze

lagen in diesen Gruppen in 23% bzw. 12% vor. Diese Zeichen scheinen somit hilfreiche diagnostische Hinweise zu sein, dennoch ergab der Vergleich der Häufigkeiten radiologischer Zeichen der primär erkannten und nicht erkannten B1-Verletzungen keine signifikanten Unterschiede. Die folgenden Unterkapitel schildern die Ergebnisse anderer Autoren zu den Häufigkeiten der einzelnen Kriterien.

#### IV.1.2.6.2.1 Vergrößerter Abstand der Dornfortsätze

Gehweiler et al. unterteilten 117 Frakturen in 42 (36%) stabile und 75 (64%) instabile Verletzungen, machen jedoch keinerlei Angabe dazu, nach welcher Klassifikation sie vorgingen [21]. Sie zitieren in ihrer Arbeit die seinerzeit aktuelle von Holdsworth vermittelte Zwei-Säulen-Theorie, bei der die Beteiligung der hinteren Säule zur Instabilität führt [4]. Die überproportional hohe Anzahl an instabilen Verletzungen wird auf den Schwerpunkt für Wirbelsäulenverletzungen der Klinik zurückgeführt. Sie finden einen erweiterten interspinösen Abstand in 51% aller instabilen Verletzungen. Das radiologische Kriterium wurde jedoch nicht quantifiziert.

Daffner et al. arbeiteten mit der Läsion der mittleren Säule als Instabilitätskriterium nach Denis, verwendeten allerdings nicht seine Einteilung in Kompressions-, Berstungs-, Flexions-Distraktions- und Dislokationsfrakturen [8, 13]. Sie unterteilten 116 Flexionsverletzungen in einfache Flexions- (31), in Flexions-Distraktions- (23), Flexions-Dislokations- (31) und Flexions-Berstungsfrakturen (31). Von 23 Flexions-Distraktions-Verletzungen zeigten 17 (74%) eine Erweiterung des Dornfortsatzabstandes über 2 mm im Vergleich zu den Anschlusssegmenten. Dies traf auch auf 17 der 31 Flexions-Berstungsfrakturen (55%) zu. Bei Subtraktion der Dislokationsfrakturen, die den C-Verletzungen nach Magerl entsprechen, verbleiben 85 Frakturen, die den B-Verletzungen nach Magerl entsprechen. Eine Erweiterung des Dornfortsatzabstandes kam somit bei 34 B-Verletzungen (40%) vor. Der Vergleich mit dem Wert der vorliegenden Studie (18%) wird durch drei Faktoren erschwert. Zum einen befanden sich 56 (41%) aller ausgewerteten Verletzungen in der Arbeit von Daffner et al. in der Halswirbelsäule, in der die Existenz des Nackenbandes (Ligamentum nuchae) für Interpretationsschwierigkeiten sorgt. Das Ligamentum nuchae ist eine dreieckige faserige Struktur mit entscheidendem Beitrag zur Steifigkeit und Anspannung bei Flexion der Halswirbelsäule [58]. Zum anderen erwähnen Daffner et al. keine Evaluation der Instabilität durch rupturierte Bandstrukturen mittels intraoperativer Befunde. Der größte Unterschied der

Studie von Daffner et al. zu der vorliegenden Studie ist allerdings der um 5 mm kleinere Grenzwert (2 mm) für eine Dornfortsatzabstandvergrößerung [13].

Lee et al. fanden in einer MRT-Studie einen vergrößerten Dornfortsatzabstand im konventionellen Röntgenbild bei 21 (75%) der 28 Verletzungen mit einer intraoperativ entdeckten Ruptur des Ligamentum supraspinale, definierten einen vergrößerten Abstand aber ab einem Grenzwert von 20% Vergrößerung im Vergleich zu den Anschlusssegmenten [24]. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen den radiologischen und intraoperativen Befunden ergab sich nicht.

Bei eingeschränkter Vergleichbarkeit fanden sich in der vorliegenden Studie im Patientenkollektiv reiner B1-Verletzungen mit Existenz radiologischer Zeichen mit 18% deutlich seltener Erweiterungen des Dornfortsatzabstandes. Aufgrund der bisher nicht einheitlich festgelegten Messmethode und den dadurch in der Literatur stark unterschiedlich angegeben Häufigkeiten, ist dieses Kriterium zum gegenwärtigen Zeitpunkt als nicht reliabel zu bewerten. Wäre in dieser Studie der Schwellenwert von 2 mm [13] verwendet worden, so hätte eine Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes in 67% statt 18% der untersuchten Fälle vorgelegen. Dies verdeutlicht die durch die unterschiedlichen Grenzwerte entstehenden starken Schwankungen. Es bleibt unklar, welcher Abstand eindeutig auf eine B-Verletzung hinweist. Weitere Studien, die sich explizit mit verschiedenen Messmethoden für dieses Kriterium befassen und diese den intraoperativen Befunden des PLC gegenüberstellen, sind zur Definition dieses Zeichens erforderlich. Für eine Verwendung eines relativen Abstandes im Vergleich zu den Anschlusssegmenten anstelle von Absolutwerten spricht die Möglichkeit einer Messung auch an alternativem Bildmaterial, z.B. an CT-Rekonstruktionen. Dies kann bei unmöglicher Messung durch schlechte Qualität der ap-Röntgenaufnahme notwendig sein. Eine erschwerte Messung im Röntgenbild wurde in dieser Studie sogar in 20% aller B1-Verletzungen protokolliert.

#### IV.1.2.6.2.2 Segmentwinkel

Gehweiler et al. behandelten dieses Kriterium nur oberflächlich, indem sie mit dem Zeichen "Skoliose und/oder Kyphose" arbeiteten [21]. Der Winkel wurde jedoch nicht quantifiziert. Bei 71% der stabilen und 72% der instabilen Verletzungen war dieses Zeichen vorhanden. Dass durch eine Fraktur des Wirbelkörpers sowohl bei instabilen als auch bei stabilen Verletzungen ein Kyphosewinkel entsteht, liegt in der Natur des Unfallmechanismus. Hierfür fallen sogar die

verhältnismäßig geringen Prozentzahlen auf. Dabei wird nicht deutlich, wie die Autoren dieses Zeichen auswerteten.

Farcy et al. verwendeten nicht die AO-Klassifikation, sondern das Drei-Säulen-Modell von Denis und den von ihnen konzipierten "Sagittal Index" (SI) bei der Untersuchung von 35 reinen Berstungsfrakturen [8, 10, 14]. Bei Rückrechnung der SI-Werte auf die Segmentwinkel ergibt sich, dass in der Gruppe konservativ therapierter Patienten 29% und in der Gruppe operativ therapierter Patienten 75% einen Segmentwinkel über 15° aufwiesen. Eine Überprüfung der Zustände des PLC durch intraoperative Befunde erfolgte jedoch nicht.

In der vorliegenden Studie lag bei 44% der B1-Verletzungen mit radiologischen Zeichen ein Segmentwinkel über 15° vor. Aufgrund der beträchtlichen methodischen Unterschiede lassen sich die Werte der Literatur mit denen dieser Studie jedoch nicht gegenüberstellen. Stagnara et al. untersuchten thorakale Kyphose- und lumbale Lordosewinkel an 137 gesunden Personen und fanden eine derartig weite Streubreite an Messwerten, dass sie vor der Arbeit mit Durchschnittwerten warnten [59]. Bernhardt et al. erklärten nach Messungen an 102 Röntgenaufnahmen mit Nachdruck, dass die Wirbelkörperhöhe und Methode der Messung für valide Vergleiche gut definiert sein sollten [60]. Diese enormen Unterschiede individueller physiologischer Winkel erschweren die Verwendung eines einheitlichen Schwellenwertes als Zeichen einer B-Verletzung. Inkonsistent ist auch die Position des Patienten bei seitlichen und anterioposterioren Röntgenaufnahmen. Im Stehen wird die Wirbelsäule belastet und der Kyphosewinkel vergrößert. Bei einem auf einem Gelkissen liegenden Patienten dagegen neigt die Fraktur sogar zur Reposition. Diese Faktoren müssen bei der Interpretation eines Röntgenbildes berücksichtigt werden.

Allerdings bleibt das Kriterium "Segmentwinkel >15°" mit 44% das häufigste unter allen beobachteten Zeichen. Somit ist dieser Schwellenwert bei einer monosegmentalen Messung als Zeichen einer ligamentären B-Verletzung bis zum Stand neuer Erkenntnisse zu empfehlen.

#### IV.1.2.6.2.3 Reduktion der Höhe der Wirbelkörpervorderkante

Im Verlauf der prospektiven Studie an 54 Berstungsfrakturen auf der Höhe von BWK 12 und LWK 1 von Willen et al. war aufgrund neurologischer Defizite, persistierender Schmerzen oder Instabilität unter Mobilisation eine operative Intervention in sechs Fällen notwendig [20]. In all diesen Fällen (11%) war die Wirbelkörpervorderkante initial um mehr als 50% reduziert.

McAfee et al. operierten 16 instabile Berstungsbrüche von BWK 10 bis LWK 2 mittels posterolateraler Dekompression und gaben für all diese Verletzungen einen Verlust der Wirbelkörperhöhe von mehr als 50% an [19]. In 11 Fällen fanden sich Frakturen der hinteren Elemente, die heutzutage den B2-Verletzungen nach Magerl entsprechen [10].

In dieser Studie lag der Schwerpunkt dagegen auf rein ligamentären Verletzungen und eine Reduktion der Wirbelkörpervorderkante über 50% kam in 31% aller B1-Verletzungen mit radiologischen Zeichen vor. Ein solch direkter Vergleich dieses Kriteriums mit intraoperativen Befunden des PLC unter Verwendung der AO-Klassifikation [10] wurde in der Literatur nicht gefunden. Da dieses Zeichen bei nahezu einem Drittel der Patienten dieser Studie und als dritthäufigstes Zeichen vorkommt, kann es als Kriterium für ligamentäre B-Verletzungen empfohlen werden.

#### IV.1.2.6.2.4 Kompression der Wirbelkörperspongiosa

Bisher wurde dieses Zeichen in der Literatur nicht beschrieben. In dieser Studie allerdings kommt es am zweithäufigsten vor. Eine Spongiosakompression trotz erhaltener Höhe der Wirbelkörpervorderkante über 50% wurde bei 41% der B1-Verletzungen mit radiologischen Zeichen beobachtet. Diese neue Erkenntnis sollte bei der Begutachtung von Röntgenbildern mit Verdacht auf eine B-Verletzung unbedingt berücksichtigt werden.

#### IV.1.2.6.2.5 Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante

Daffner et al. verwendeten eine eigene Einteilung der Frakturen und fanden bei allen 114 Berstungsfrakturen eine abnormale Hinterkante, meist jedoch im Sinne einer Verlagerung und nicht einer Verlängerung [53]. Dagegen fanden sie bei einfachen Frakturen (82), Flexions-Dislokations- (142), Extensions- (78), und sogar bei Flexions-Distraktions-Verletzungen (23) keine Veränderung der Hinterkante.

Leferink et al. fanden eine signifikant längere Hinterkante bei übersehenen B-Verletzungen im Vergleich zu A-Verletzungen [22]. Sie entspricht einer Verlängerung um 9%. Es bleibt unklar, wie häufig eine Verlängerung um 9% tatsächlich vorkommt. In dieser Studie kam eine Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante über 9% in keinem einzigen Fall vor. Dieses Zeichen wird als Kriterium für ligamentäre B-Verletzungen somit als nicht reliabel eingestuft.

#### IV.1.2.6.2.6 Erweiterte Facettengelenke

Gehweiler et al. fanden erweiterte Facettengelenke in 31% von 75 instabilen Verletzungen [21]. Das verwendete Klassifikationssystem bleibt unklar, doch bei den 42 stabilen Verletzungen kam dieses Zeichen kein einziges Mal vor.

Daffner et al. fanden 23 Flexions-Distraktions-Verletzungen (18,4%) bei 138 untersuchten Wirbelkörperfrakturen [13]. Von diesen zeigten 61% eine Facettengelenkerweiterung. Dies traf auch auf 58% der 31 Flexions-Berstungsfrakturen zu. Nach Ausschluss der Dislokationsfrakturen verbleiben 85 B-Verletzungen, von denen 32 (38%) eine Erweiterung der Facettengelenke zeigten.

Bei ausschließlicher Untersuchung rein ligamentärer Verletzungen in dieser Studie fanden sich erweiterte Facettengelenke mit 21% deutlich seltener. In der Arbeit von Daffner et al. befanden sich über 40% der Verletzungen in der Halswirbelsäule [13]. Die Stellung der zervikalen Gelenkflächen mit einem horizontalen Neigungswinkel von 45° unterscheidet sich von dem der thorakolumbalen Gelenkflächen mit beinahe vertikalen Gelenkflächen der lumbalen Wirbelkörper [7]. Möglicherweise ist diese anatomische Differenz mit einer leichteren Distanzierung der zervikalen Gelenkflächen voneinander ein Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse. Da der Kontakt der Gelenkflächen jedoch physiologisch gewährleistet ist, bleibt das Kriterium trotz der uneinheitlichen Angaben ein hilfreiches Zeichen für eine Distraktionskomponente.

#### IV.1.2.6.2.7 Inverse cortical sign

Dieses Zeichen wurde lediglich von Magerl et al. beschrieben [10]. Die Autoren geben dessen Häufigkeit jedoch nicht an. In dieser Studie konnte dieses Zeichen nicht beobachtet werden.

## IV.1.2.6.3 Fehlinterpretierte dorsal knöcherne B-Verletzungen

In der Literatur finden sich keine Angaben zu fehlinterpretierten B2-Verletzungen. Bei den 11 nicht erkannten B2-Verletzungen in dieser Studie handelte es sich ausschließlich um B2.3 Verletzungen, die eine Kompressionsfraktur Typ A des Wirbelkörpers beinhalteten. Teils ließ sich eine dorsal knöcherne Zerreißung nicht nachvollziehen. Die restlichen bei Aufnahme fehlklassifizierten Fälle zeigen, dass auch B2-Verletzungen nicht immer leicht zu erkennen sind.

Während der Dornfortsatzabstand der nicht erkannten ligamentären B-Verletzungen um durchschnittlich 19% vergrößert war, betrug diese Vergrößerung der nicht erkannten knöchernen B-Verletzungen 45%. In beinahe der Hälfte aller Fälle waren diese Messungen im Röntgenbild erschwert. Dabei war in der retrospektiven Auswertung des Bildmaterials dieser Studie sogar eine Veränderung von Helligkeit und Kontrast mittels Software zur verbesserten Visualisierung möglich. Dabei ist zu beachten, dass Röntgenbilder im klinischen Alltag lediglich an einem Röntgenschirm betrachtet werden.

## IV.2 Prospektive Studie

In einem Zeitraum von 24 Monaten wurden 24 Patienten mit 27 operationspflichtigen thorakolumbalen Frakturen in die Studie eingeschlossen. Hauptursache waren in 75% der Fälle Stürze, gefolgt von Unfällen im Straßenverkehr. Der überwiegende Anteil der Frakturen war im thorakolumbalen Übergang lokalisiert. Zwei Drittel aller Verletzungen waren Berstungsfrakturen (Typ A3) und ein Drittel verteilte sich gleichermaßen auf ligamentäre und knöcherne B-Verletzungen. Nur 63% aller Patienten und 75% der Patienten mit B-Verletzungen gaben einen Druckschmerz an. In vier Fällen wurde in der klinischen Untersuchung eine Weichteildelle palpiert und zwei davon waren B-Verletzungen. Ein aussagekräftiger Ultraschallbefund konnte bei 22 Patienten erhoben werden. Bei insgesamt 20 korrekten Befunden handelte es sich 15mal um einen intakten PLC und fünfmal um eine Läsion des PLC.

# IV.2.1 Schwierigkeiten der Untersuchung

Die Höhenlokalisation gestaltete sich besonders bei fehlendem Druckschmerz schwierig, da die horizontale Verbindungslinie zwischen den Cristae iliacae nicht immer eindeutig auf die Höhe des im ap-Röntgenbild ermittelten Lendenwirbelkörpers schließen ließ.

Eine verminderte Mitarbeit der Patienten durch verletzungsbedingte Schmerzen erschwerte die Untersuchungsbedingungen. Von der Compliance der Patienten hingen die achsengerechte Drehung, sowie die Visualisierung nach Erreichen der Seiten- oder Bauchlage ab. Der Untersucher ist bei der Beurteilung des dynamischen Bildes auf gelegentliche Kyphosierung und Lordosierung der Wirbelsäule durch die Patienten angewiesen.

Als problematisch erwiesen sich die im Bereich der oberen Brustwirbelsäule im steilen Winkel nach kaudal reichenden Processus spinosi. Sie ließen aufgrund ihrer Überlappung lediglich ein minimales Sichtfenster zu und erschwerten die Befunderhebung. Polytraumata konnten wegen der notwendigen notfallmäßigen Operationen aus Zeitgründen nicht in die Studie eingeschlossen werden.

In zwei Fällen war die Beurteilung der Ultraschallbilder nicht möglich (Pat-Nr. 1 und 15). Bei diesen Patienten betrug der BMI 24,8 bzw. 37,2 und die Dicke des subkutanen Fettgewebes 2,9 mm bzw. 4,8 mm. Bei einem Patienten handelte es sich um den ersten in der Studienreihe. Hier fehlte den Untersuchern möglicherweise noch die Erfahrung der Befunderhebung. Im anderen Fall waren die Werte überdurchschnittlich hoch. Die Untersuchung ist bei Patienten mit erheblicher Fettleibigkeit deutlich erschwert.

Im Fall des falsch positiven Befundes (Pat-Nr. 21) betrug der BMI 27,1 und die Dicke des subkutanen Fettgewebes 3,8 mm. Auch hier lagen die Werte über dem Durchschnitt. Im Fall des falsch negativen Befundes (Pat-Nr. 8) stellte sich intraoperativ heraus, dass das Ligamentum supraspinale nicht, wie gewöhnlich, zwischen den Processus spinosi rupturiert war, sondern dicht am Ansatz des Bandes. Es lag plan am Knochen an und wurde möglicherweise aus diesem Grund nicht als Ruptur erkannt.

Eine tastbare Delle ist nicht beweisend für eine B-Verletzung. In zwei von vier Fällen mit einer tastbaren interspinösen Delle lagen A-Verletzungen mit einer Elongation des Ligamentum supraspinale vor. In den anderen Fällen handelte es sich um eine B1- und eine B2-Verletzung. Somit war nur bei einer von vier B1-Verletzungen eine Delle palpabel. In drei von vier Fällen mit einem intraoperativ sichtbaren Hämatom war bei der klinischen Untersuchung keinerlei Einblutung in die Haut sichtbar. Klinische Zeichen von B-Verletzungen sind somit nicht konsistent. Die Palpation einer interspinösen Delle als Zeichen einer ligamentären Verletzung ist möglich, korreliert aber auch nach Lee et al. nicht mit den intraoperativen Ergebnissen [24]. In einer MRT-Studie konnten die Autoren nur bei der Hälfte der 28 Patienten mit einer Verletzung des Ligamentum supraspinale eine Delle zwischen den Dornfortsätzen tasten. Ein signifikanter Zusammenhang bestand nicht. Gallardo-Guzman et al. verifizierten vier palpierte Dellen mit interspinöser Spannungsminderung anhand von intraoperativen Befunden mit drei tatsächlichen Rupturen des Ligamentum supraspinale. Auch sie fanden keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Palpation und intraoperativen Befunden [44].

## IV.2.2 Ultraschalldiagnostik bei Wirbelkörperfrakturen

In der Literatur finden sich bisher nur 3 Studien zur Ultraschalldiagnostik bei Wirbelkörperfrakturen. Moon et al. konnten in einer Machbarkeitsstudie an fünf operativ therapierten Patienten zeigen, dass die Beurteilung der supraspinalen und interspinalen Bänder mittels Ultraschalldiagnostik möglich ist [43]. Zudem untersuchten sie sieben konservativ therapierte Patienten. Die Autoren verwendeten nicht die AO-Klassifikation [10], sondern nahmen eine postoperative Einteilung in Flexions-Distraktions-Verletzungen (4), stabile und instabile Berstungsfrakturen (6) und einfache Kompressionsfrakturen (2) vor. Neun Frakturen lagen auf Höhe von BWK 12 und LWK 1. Die Diagnostik aller Verletzungen erfolgte durch konventionelles Röntgen, MRT und zusätzlich durch fettgesättigte sagittale MRT-Sequenzen in T2-Wichtung. Nach interspinöser Palpation, Abtasten der Dornfortsätze und einer Druckschmerzprovokation zur Höhenlokalisation erfolgte die sonografische Untersuchung des Patienten in "lateraler Dekubitusposition" mit einem 5-10 MHz Linearschallkopf im Sagittalund Transversalschnitt. Die Autoren beschrieben das Ligamentum supraspinale als kontinuierliche echoarme Linie zwischen den Dornfortsätzen und das Ligamentum interspinale als breite echoarme Linie mit raschem Echogenitätsverlust bei Tiefenzunahme. Eine Unterbrechung der Linie, eine zystische Läsion, eine inhomogene Anordnung der Bänder und Muskelfasern und abgerissene Knochenfragmente galten als Zeichen einer PLC-Verletzung. Im Unterschied zu Moon et al. manifestierte sich das Ligamentum supraspinale in der eigenen Studie als echoreiche Linie im Vergleich zum umliegenden Gewebe. Für Moon et al. war die Visualisierung der Kapseln der Facettengelenke und des Ligamentum flavum unmöglich [43]. In der eigenen Studie war die Darstellung der Facetten möglich, doch über deren Struktur ließ sich ebenso keine Aussage treffen.

In fünf von sieben konservativ therapierten Fällen ergaben Ultraschall und MRT nach Moon et al. ähnliche Ergebnisse des PLC-Status [43]. In einem Fall einer Flexions-Distraktions-Verletzung wurde ein sonografisch falsch-negativer Befund erhoben und in einem Fall einer BWK 10 Kompressionsfraktur wurde ein falsch-positiver Befund erhoben. In der vorliegenden Studie wurden bei nahezu der doppelten Anzahl der Fälle auch nur zwei falsche Befunde erhoben und sogar durch direkte Verifizierung anhand des OP-Situs gesichert.

In der Arbeit von Moon et al. wurden drei der sechs Berstungsfrakturen und nur zwei der vier Flexions-Distraktions-Verletzungen operativ therapiert [43]. Bei den zwei Flexions-Distraktions-

Verletzungen und einer Berstungsfraktur war der PLC rupturiert und bei zwei weiteren Berstungsfrakturen intakt geblieben. In allen fünf operativ therapierten Fällen stimmten die Befunde des Ultraschalls, der MRT und der Operation überein. Die Autoren empfehlen Ultraschall als diagnostisches Hilfsmittel für PLC-Läsionen bei Frakturen im thorakolumbalen Übergang in Situationen, in denen eine MRT kontraindiziert ist.

Gallardo-Guzmán et al. führten eine prospektive Ultraschallstudie an 14 Patienten mit thorakolumbalen Frakturen durch [44]. 10 Frakturen befanden sich auf Höhe von LWK 1 und jeweils zwei Frakturen auf Höhe von BWK 12 und LWK 2. Das Durchschnittsalter der Patienten von 33,3 Jahren (20-70) war niedriger als in dieser Studie mit 47,5 Jahren (26-70). Das Verhältnis der männlichen zu weiblichen Patienten betrug in beiden Studien 2:1. Auch die Unfallursachen ähneln sich durch Stürze als häufigste Ursache, gefolgt von Verkehrsunfällen. Die Autoren verwendeten nicht die AO-Klassifikation [10], schlossen Rotationsverletzungen jedoch aus. Die genaue Anzahl an B1- und B2-Verletzungen bleibt somit unklar und stellt einen Schwachpunkt der Studie dar.

Auch sie begannen mit der interspinösen Palpation und fertigten konventionelle Röntgenbilder an. Die Ultraschalluntersuchung wurde von einem Radiologen durchgeführt, der nicht in das chirurgische Procedere involviert war und erfolgte mit einer Frequenz von 2 MHz in Seitenlage ohne Flexions- oder Extensionsbewegungen, während in dieser Studie ein 7 MHz-Schallkopf unter gelegentlicher Flexion verwendet wurde. Zudem erfolgte die Untersuchung in der Studie von Gallardo-Guzman et al. jedes Mal von BWK 10 bis LWK 3, ohne dass der Radiologe die betroffene Wirbelkörperhöhe kannte [44]. Anschließend erhielten alle Studienpatienten eine operative Therapie über einen dorsalen Zugang.

Sonografisch zeigte sich eine ligamentäre Verletzung in acht Fällen und Integrität der Bänder in sechs Fällen. Siebenmal bestätigte sich die Ruptur des Ultraschallbefundes und in allen sechs Fällen die Integrität des PLC. Von drei untersuchten diagnostischen Mitteln (Palpation, Dornfortsatzabstandsvergrößerung, Ultraschall) bestand ausschließlich für die Ultraschallbefunde ein signifikanter Zusammenhang zu den intraoperativen Befunden. In der vorliegenden Studie bestätigten sich dagegen fünf von sechs sonografisch als rupturiert beurteilte Befunde und 15 von 16 sonografisch als intakt beurteilte Befunde.

Gallardo-Guzman et al. schlussfolgerten, dass die Ultraschalluntersuchung als hochsensitive und spezifische Methode zur Erkennung interspinaler und supraspinaler Bandläsionen geeignet ist und sogar eine höhere Genauigkeit als die klinische und radiologische Beurteilung aufweist [44]. Allerdings beinhaltet die Arbeit bei genauerer Betrachtung zahlreiche Schwächen und Berechnungsfehler. Dabei traten auch Verwechslungen der statistischen Kennwerte auf. Die tatsächliche, nachberechnete Sensitivität war mit 100% höher als in dieser Studie (83%) und die Spezifität mit 85,7% niedriger als in dieser Studie (94%). Der positive Vorhersagewert war mit 87,5%, wie auch der negative Vorhersagewert mit 100%, höher als in der vorliegenden Studie (83% bzw. 94%). Zwar wurden 50% mehr Patienten in der eigenen Studie eingeschlossen, jedoch lagen in nur sechs Fällen Läsionen des PLC vor. Die Prävalenz betrug somit nur 27%. Sie betrug in der Studie von Gallardo-Guzman et al. bei sieben Rupturen 50% [44]. Ein weiteres Indiz für die unpräzise Arbeit der Autoren ist die Angabe von acht Rupturen an einer anderen Stelle im Artikel. Damit betrüge die Prävalenz sogar 57%.

Die bisher größte Studie zur Ultraschalldiagnostik führten Vordemvenne et al. an 18 Patienten mit thorakolumbalen Berstungsfrakturen durch [45]. Alle Patienten erhielten praeoperativ eine Ultraschalldiagnostik und 12 Patienten darüber hinaus eine MRT-Diagnostik. Bei der Ultraschalluntersuchung wurde auch das angrenzende kraniale und kaudale Segment beurteilt. Dabei galt die Ruptur des Ligamentum supraspinale oder interspinale als direktes Zeichen einer PLC-Läsion und ein Hämatom des Ligamentum supraspinale als indirektes Zeichen. Zudem wurden bei der Untersuchung klinische Symptome wie Schmerzen, lokaler Druckschmerz und eine tastbare interspinöse Delle dokumentiert. Wie auch in der eigenen Studie wurden Patienten mit alten und pathologischen Frakturen, sowie C-Verletzungen ausgeschlossen.

Das Durchschnittsalter der Patienten war mit 43,4 Jahren (16-70) geringfügig niedriger als in der eigenen Studie mit 47,5 Jahren (26-70). In beiden Studien überwog der Anteil männlicher Patienten, in der eigenen Studie mit 66,6% und in der Arbeit von Vordemvenne et al. sogar mit 77,7%. In der vorliegenden Studie waren Stürze in 75% die Unfallursache, während Vordemvenne et al. Stürze in lediglich etwa der Hälfte aller Unfallursachen angaben. Die Autoren werteten dabei jedoch nur "Stürze aus großer Höhe" [45]. Der Anteil der B-Verletzungen war in der eigenen Studie mit 34% etwas höher als in der Studie von Vordemvenne et al. mit 27,8%. Dabei kamen in der vorliegenden Arbeit fast gleichermaßen B1- und B2-Verletzungen vor, während es sich bei Vordemvenne et al. ausschließlich um ligamentäre B-Verletzungen handelte. Zudem waren beinahe ein Drittel der A-Verletzungen

Kneifzangenfrakturen (Typ A2.3), während dieser Verletzungstyp in der eigenen Studie nicht beobachtet wurde und es sich bei allen A-Verletzungen um Berstungsfrakturen (Typ A3) handelte.

Vordemvenne et al. gaben die Treffsicherheit der Ultraschalluntersuchung für drei Charakteristika jeweils getrennt an. Sie untersuchten das Ligamentum supraspinale, interspinale und ein Hämatom des Ligamentum supraspinale. Dabei betrug die Sensitivität für das Ligamentum supraspinale 99%, für das Ligamentum interspinale 91,6% und für ein Hämatom des Ligamentum supraspinale 62%. Die Gesamtsensitivität war mit 99% höher als die der eigenen Studie (83%) und die Spezifität mit 75% geringer als die der eigenen Studie (94%). Der positive Vorhersagewert war mit 61% deutlich niedriger als in der vorliegenden Studie (83%), während der negative Vorhersagewert mit 99,5% höher war (94%). Die Differenzen beruhen möglicherweise auf der Einbeziehung aller drei oben genannten Charakteristika. Aus diesem Grund sollte der Vergleich der Einzelstrukturen angestrebt werden. Vordemvenne et al. geben dabei für das Ligamentum supraspinale eine Sensitivität von 99% und eine Spezifität 89% an. Auch im Hinblick auf den positiven Vorhersagewert mit 78,5% und den negativen Vorhersagewert mit 99,6% besteht ein geringerer Unterschied zu den Ergebnissen der eigenen Studie. Da lediglich zwei Drittel aller Patienten sowohl eine Ultraschall- als auch MRT-Diagnostik erhielten, ist ein direkter aussagekräftiger Vergleich zwischen beiden Methoden nach Ansicht der Autoren nicht möglich [45]. Rupturen des PLC in der MRT korrelierten jedoch in allen Fällen mit den Ultraschallbefunden. In der vorliegenden Studie wurde keine MRT-Diagnostik durchgeführt. Trotz der bisher wenigen vergleichbaren Studien zur Verwendung von Ultraschall bei Wirbelkörperfrakturen existiert aber offensichtlich ein Potential zur klinischen Anwendbarkeit.

## IV.2.3 Existenz radiologischer Kriterien bei B-Verletzungen

Angesichts der geringen Anzahl an B-Verletzungen sind die Häufigkeiten der radiologischen Zeichen mit Zurückhaltung zu interpretieren. Dennoch kam ein Segmentwinkel über 15° am häufigsten vor und der Mittelwert aller Winkel lag bei 15°. Das in der retrospektiven Studie bei B1-Verletzungen am dritthäufigsten vorkommende Zeichen "Reduktion der Wirbelvorderkante über 50%" kam in der Ultraschallstudie mit fünf B2-Verletzungen kein einziges Mal vor. Möglicherweise ist dieses Kriterium vielmehr ein Hinweis auf eine ligamentäre Verletzung.

Eine Dornfortsatzabstandvergrößerung über 7 mm kam nur einmal vor. Gallardo-Guzmán et al. verwendeten eine Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes um 20% im Vergleich zu den Anschlusssegmenten als Zeichen einer Läsion des Ligamentum supraspinale oder interspinale und fanden dieses Zeichen in drei Fällen (38%) der Verletzungen mit PLC-Läsion [44]. Eine Vergrößerung über 20% kam in der eigenen Studie in vier Fällen (44%) der B-Verletzungen vor. Dabei handelte es sich in zwei Fällen um ligamentäre B-Verletzungen. Durchschnittlich war der Dornfortsatzabstand um 38% vergrößert, während Gallardo-Guzmán et al. dazu keine Angaben machten. Bemerkenswert ist auch, dass in der Studie von Gallardo-Guzmán et al. von insgesamt neun Fällen ohne eine Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes dennoch in fünf Fällen eine Ruptur der dorsalen Bänder vorlag [44]. Die Daten ergaben keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der radiologischen Dornfortsatzabstandsvergrößerung und den intraoperativen Befunden.

Eine Kompression der Spongiosastruktur kam lediglich bei einer B1-Verletzung (Pat-Nr. 9) vor. Hier war die Vorderkante um 34% reduziert und der Segmentwinkel betrug 13°. Auch der Dornfortsatzabstand war nicht über 7 mm vergrößert. Das einzige Zeichen für eine B-Komponente bei dieser initial als A-Fraktur fehlgedeuteten Verletzung war die Spongiosakompression, anhand derer die ligamentäre Verletzung hätte erkannt werden können.

In fünf Fällen war die Hinterkante im Vergleich zu den Anschlusssegmenten verkürzt. Nur in drei Fällen kam eine diskrete Verlängerung vor, nie jedoch über 9%. Eine Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante findet auch hier keine Bestätigung als Zeichen einer B-Verletzung.

Drei Patienten (33%) mit B-Verletzungen boten primär keine radiologischen Zeichen für diskoligamentäre Schäden. In einem Fall fiel durch die CT-Diagnostik eine Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes auf. In den übrigen beiden Fällen (22%) konnte die PLC-Läsion ausschließlich dank der Ultraschalluntersuchung diagnostiziert werden.

# IV.2.4 Alternative Diagnostik

Petersilge et al. untersuchten retrospektiv MRT-Aufnahmen von 21 Patienten mit 25 thorakolumbalen Berstungsfrakturen nach dem Drei-Säulen-Modell von Denis [8, 11]. Zuvor wurde der Status des PLC in der radiologischen und computertomographischen Bildgebung indirekt beurteilt. In T1- und T2-gewichteten sagittalen MRT-Schichten zeigten sich bei sechs

Patienten (28%) Rupturen des Ligamentum supraspinale. Radiologische Anzeichen für eine PLC-Ruptur waren jedoch nur bei zwei dieser Patienten (33%) vorhanden. Wäre keine MRT-Diagnostik durchgeführt worden, so hätten 19% aller Patienten keine operative Therapie erhalten, obwohl sie instabile Verletzungen erlitten hatten. Die Autoren sehen keine Korrelation radiologischer Merkmale von Berstungsfrakturen mit einer Ruptur des supraspinalen Bandes und empfehlen die MRT-Diagnostik bei allen Berstungsfrakturen.

In der prospektiven Studie mit 68 Patienten von Terk et al. wurden neben konventionellen T1- und T2-gewichteten MRT-Sequenzen auch fettgesättigte Sequenzen angewendet, da benachbartes Fettgewebe in der MRT in der Regel als Hyperintensität sichtbar wird und somit die Befunderhebung erschwert [26]. In den meisten Fällen rissen die Strukturen in Reihenfolge, zunächst das Ligamentum supraspinale, dann das Ligamentum interspinale und zuletzt das Ligamentum flavum. In allen Fällen einer operativen Therapie stimmten die intraoperativen Befunde des Ligamentum supraspinale, interspinale und Ligamentum flavum mit denen der MRT überein. Die Fettsättigung diente einer verbesserten Visualisierung bei allen Studienpatienten und war in zwei Fällen für die Diagnose unentbehrlich. Wie essentiell die MRT-Diagnostik sein kann, zeigt der Fall eines Patienten, der eine chirurgische Therapie ablehnte und über acht Monate eine kyphotische Fehlstellung von 32° entwickelte.

In einer MRT-Studie von Oner et al. an 100 thorakolumbalen Frakturen setzten die Autoren erstmals MRT-Parameter in Relation zur AO-Klassifikation [10, 25]. Doch nur bei 38 Frakturen konnte der Status des PLC anhand von intraoperativen Befunden evaluiert werden. In 96% der Fälle bestätigte sich intraoperativ eine Läsion des PLC, doch die Autoren raten zu weiteren Studien mit Verifizierung der MRT-Ergebnisse mittels intraoperativer Befunde. Sie konnten kein eindeutiges Konzept erarbeiten, dass die MRT-Befunde dem Klassifikationssystem nach Magerl zuordnet. Dennoch fordern Oner et al. die Integration von MRT-Befunden in Klassifikationssysteme [25].

Lee et al. führten eine prospektive MRT-Studie an 34 Patienten mit thorakolumbalen Frakturen durch und verglichen die Ergebnisse mit intraoperativen Befunden [24]. Zwei Kompressionsfrakturen und vier initial als stabil eingeschätzte Berstungsfrakturen mit PLC-Läsionen wären ohne die MRT-Diagnostik und der daraus resultierenden Operation einem hohen Risiko fortschreitender Fehlstellung, progressiven neurologischen Defizits oder

chronischer Rückenschmerzen ausgesetzt worden. Es bestand ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen den MRT-Befunden und denen der Operation.

In einer retrospektiven Studie von Haba et al. erhielten 35 Patienten mit thorakalen und lumbalen Frakturen eine MRT-Diagnostik [36]. Drei Radiologen bewerteten unabhängig voneinander sagittale MRT-Schichten in T1- und T2-Wichtungen. Die MRT-Befunde wurden mit denen der Operation verglichen. Eine Ruptur des Ligamentum supraspinale und interspinale kam bei 23 Patienten (66%) vor. Der MRT-Befund dieser beiden Strukturen war in 90,5% bzw. 94,3% korrekt. Die Autoren empfehlen die MRT zur Diagnostik des PLC-Status mit einer hohen Treffsicherheit und einer exzellenten Interobserverreliabilität.

Allerdings bleibt auch im Zeitalter der MRT die Beurteilung des PLC schwierig. So fanden Harrop et al. schließlich in einer Studie aus dem Jahr 2003 zur Reliabilität des TLISS (Thoracolumbar Injury Severity Scale) trotz Verwendung von Röntgen, CT und MRT bei der Beurteilung des PLC eine Übereinstimmung zwischen verschiedenen Untersuchern von nur 59% [61]. Zwischen gleichen Untersuchern im Abstand von drei Monaten betrug die Übereinstimmung 68%. Anders als in der Studie von Haba et al. [36], in der das T1-gewichtete Signal des Ligamentum supraspinale sensitiver war als das T2-gewichtete, stand bei Harrop et al. nur die T2-Wichtung zur Verfügung [61]. Beide Sequenzen sollten nach Ansicht der Autoren jedoch in zukünftige Klassifikationen einbezogen werden.

Vaccaro et al. zeigten 2009 in einer prospektiven Studie an 42 Patienten mit 62
Wirbelkörperfrakturen zur Genauigkeit der MRT-Diagnostik, dass die Sensitivität und Spezifität der MRT zur Diagnostik von Verletzungen des PLC niedriger sind, als bisher in der Literatur beschrieben [62]. Die Spezifität der einzelnen Komponenten reichte von 53% bis 65% und die Sensitivität von 79% bis 90%. Eine weitere Untersuchung ergab für alle Komponenten nicht mehr als ein lediglich moderates Maß an Übereinstimmung zwischen den MRT-Befunden und den intraoperativen Befunden. Zudem zeigte sich bei der Aufschlüsselung nach dem Ausmaß des neurologischen Defizits eine geringere Übereinstimmung der PLC-Befunde bei Patienten ohne oder mit geringem neurologischem Defizit als bei Patienten mit einer ausgeprägten neurologischen Schädigung. Die Autoren schlussfolgern, dass die Therapieentscheidung nicht alleinig auf der durch die MRT diagnostizierten Integrität des PLC beruhen sollte.

Absolute oder relative Kontraindikationen der MRT-Diagnostik stellen ferromagnetische Implantate dar. Wegen des Risikos der Verlagerung und Erwärmung der Implantate ist die MRT-Diagnostik nicht oder nur bedingt bei Patienten mit mechanischen Herzklappen, Herzschrittmachern, intrakraniellen Aneurysmaclips und endovaskulären Spiralen nach Aneurysma-Okklusion geeignet [63]. Weitere Probleme bereiten Cochleaimplantate (Hörprothesen), implantierte Insulinpumpen und große oder schleifenförmig angeordnete Tätowierungen im Untersuchungsgebiet. Auch schwangere Frauen im ersten Trimenon stellen wegen ihrer relativen Kontraindikation ein Problem in der MRT-Diagnostik dar. Bei Patienten mit Klaustrophobie ist die Untersuchung im engen lärmintensiven MRT-Gerät ohne Sedierung kaum möglich.

Die Durchführung einer MRT seitens der Kliniken ist nicht immer praktikabel. Da instabile Verletzungen der Wirbelsäule zügig versorgt werden sollten, stellt die Verfügbarkeit der MRT einen entscheidenden Faktor dar. Einerseits ist die Diagnostik nicht einfach und schnell durchführbar und auch nicht rund um die Uhr möglich, beispielsweise nachts. Andererseits verfügen viele Kliniken nicht über ein MRT-Gerät. Sofern möglich, scheint aber der Einsatz der MRT bei Verdacht auf eine diskoligamentäre Verletzung gerechtfertigt. Die zahlreichen Studien zur MRT-Diagnostik zeigen, dass das Verfahren zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine reliable Methode zur Diagnostik von B1-Verletzungen darstellt. Ist ein MRT-Gerät vor Ort nicht verfügbar, scheint eine Ultraschalluntersuchung aufgrund der bisherigen Ergebnisse eine sinnvolle Alternative zu sein. Der größere Zeitaufwand einer MRT-Diagnostik spricht bei Notfallpatienten ebenfalls für die schnellere Ultraschalluntersuchung.

Schließlich ist die MRT-Diagnostik kostenintensiv. Nach dem Einheitlichen Bewertungsmaßstab (EBM, 01/2009) kostet eine "MRT-Untersuchung von Teilen der Wirbelsäule" bei einem durchschnittlichen Punktwert von 3,72 Cent 127,60 Euro, eine "Sonographische Untersuchung von Gelenken und/oder umschriebenen Strukturen des Bewegungsapparates" jedoch nur 8,37 Euro [64]. Die Differenz bei privatärztlicher Abrechnung ist noch größer. Nach der Gebührenordnung für Ärzte (04/2008) kostet eine "MRT im Bereich der Wirbelsäule, in zwei Projektionen" bei einfachem Satz 244,81 Euro [65]. Eine "Ultraschalluntersuchung eines Organs" dagegen kostet lediglich 11,66 Euro. In Zeiten abnehmender ökonomischer Ressourcen kann die Ultraschalluntersuchung im Vorfeld einer MRT eine attraktive Ergänzung zur Diagnostik thorakolumbaler Frakturen sein.

## IV.2.5 Treffsicherheit des Ultraschalls gegenüber der MRT

Bei der relativ geringen Fallzahl in dieser Studie (22) sollten die Werte der Treffsicherheit mit Zurückhaltung interpretiert werden. Dennoch soll hier ein Vergleich zu den Werten der oben zitierten MRT-Studien mit 34, 35 und 42 Patienten [24, 36, 62] angeführt werden. Ein korrekter Befund des Ligamentum supraspinale mittels Ultraschall wurde in dieser Studie in 91% erhoben. Einen korrekten Befund mittels MRT geben Lee et al., Haba et al. und Vaccaro et al. in 91%, 90,5% und 74% an [24, 36, 62]. Damit gleicht der Wert der eigenen Ultraschallstudie trotz der geringen Fallzahl annähernd denen der großen MRT-Studien und übertrifft diese sogar im Falle der jüngsten und größten MRT-Studie [62]. Doch die Sensitivität des Ultraschalls lag mit 83% unter der Sensitivität der MRT von 93%, 89% und 86% nach Lee et al., Haba et al. und Vaccaro et al. [24, 36, 62]. Die Spezifität dagegen war mit 94% größer als in den Studien der drei Autoren (80%, 92% und 57%) [24, 36, 62]. Grund für diese Differenzen könnte der unterschiedliche Anteil der Fälle mit einer Ruptur des PLC sein. Dieser Anteil betrug in allen drei Studien über zwei Drittel der Patienten, jedoch in der eigenen Studie weniger als ein Drittel. Dennoch bedeutet die relativ niedrige Spezifität der MRT einen hohen Anteil an falsch-positiven Ergebnissen. Die Ultraschalluntersuchung mit einer höheren Spezifität könnte somit verhindern, dass Patienten operativ therapiert werden, die tatsächlich einen intakten PLC aufweisen.

Einige Autoren errechneten überdies die Vorhersagewerte. Der positive Vorhersagewert der MRT für das Ligamentum supraspinale beträgt nach Lee et al. und Vaccaro et al. 96% und 75% im Vergleich zum Ultraschall mit 83% in dieser Studie [24, 62]. Der negative Vorhersagewert war mit 94% in dieser Studie weitaus höher als derjenige der MRT mit 68% und 71% [24, 62]. Die Wahrscheinlichkeit, bei einem negativen Untersuchungsergebnis tatsächlich ein intaktes Ligamentum supraspinale zu diagnostizieren, kann durch den Ultraschall somit höher sein als durch die MRT. Die Vorhersagewerte hängen von der Sensitivität, Spezifität und entscheidend von der Prävalenz ab. Sie beträgt jedoch wegen der verhältnismäßig geringen Anzahl an Läsionen des PLC der Patienten der vorliegenden Studie nur 27%. In der Studie von Lee et al. dagegen war bei 82% und in der Studie von Vaccaro et al. bei 43% der Patienten das Ligamentum supraspinale verletzt [24, 62].

### IV.3 Klassifikationsprobleme und aktueller Stellenwert des PLC

Oner et al. analysierten anhand von Röntgen, CT und MRT die Übereinstimmung verschiedener Untersucher bei der Einteilung in A- und nicht-A-Verletzungen von 53 Patienten [37]. Die höchste Rate an nicht-A-Verletzungen fand sich bei der Klassifikation durch den Wirbelsäulenchirurgen und die geringste durch den Assistenten. Die Übereinstimmung der Unterscheidung "A-/nicht-A-Verletzungen" war zwar besser anhand von MRT-Bildern, erreichte dennoch nur mittelmäßige Werte. Die AO-Klassifikation setzt voraus, dass der PLC entweder verletzt ist oder nicht [10]. Die Unterscheidung ist mechanisch gründlich, doch Oner et al. beobachteten verschiedene Grade einer Beteiligung des PLC, von leichten Ödemen bis zu vollständigen Rupturen [37]. Die Autoren empfehlen den Ersatz des CT durch die MRT in der Unterscheidung von A- und nicht-A-Verletzungen thorakolumbaler Frakturen.

Die Integrität des PLC wird gegenwärtig als derart substanziell angesehen, dass neuere Klassifikationen diese als ein Hauptkriterium beinhalten. Durch die Mitarbeit von 40 Wirbelsäulenchirurgen aus 15 Trauma-Level-1 Zentren entwickelten Vaccaro et al. 2005 den "Thoracolumbar Injury Classification and Severity Score" (TLICS) [66]. Dabei handelt es sich um ein Punktesystem zur Einteilung in operative und konservative Therapie unter den Gesichtspunkten der Morphologie der Verletzung, Integrität des PLC und dem neurologischen Status des Patienten. Für die Morphologie werden von einfacher Kompression über Translation/Rotation bis zu Distraktion maximal vier Punkte vergeben und jeweils maximal drei Punkte für den Zustand des PLC und den neurologischen Status. Eine konservative Therapie sollte bei drei oder weniger Punkten, eine operative Therapie bei fünf oder mehr Punkten erfolgen. Bei vier Punkten können beide Optionen in Betracht gezogen werden. Der PLC kann dabei auf konventionellen Röntgenbildern, CT- oder MRT-Bildern als "intakt, verletzungsverdächtig/nicht beurteilbar oder verletzt" bewertet werden. Liegt keine MRT-Diagnostik vor, werden die Punkte für den PLC lediglich auf der Basis von Röntgenaufnahmen und CT vergeben. Dadurch liegt der Schwachpunkt in der Diagnostik ligamentärer Strukturen weiterhin vor. Zudem erhält eine Kompressionsfraktur mit Berstungskomponente und verletzungsverdächtigem PLC nach dem TLICS vier Punkte und bildet damit erneut die Grenzzone zwischen konservativer und operativer Therapie. Doch nach Ansicht der Autoren ist die AO-Klassifikation aufgrund ihrer Komplexität nicht alltagstauglich [66]. Der TLICS beschreibt nicht nur die Morphologie einer Verletzung, sondern klassifiziert

sogar den Grad der Instabilität. Allerdings sind weitere Untersuchungen zur Validität und Reliabilität zur Eignungsprüfung des TLICS für den klinischen Alltag notwendig.

Inzwischen haben sich 22 Wirbelsäulenchirurgen aus den USA, Kanada, Australien, Deutschland, Mexiko, Indien und den Niederlanden zu einer "Spine Trauma Study Group" (STSG) zusammengeschlossen. Die Autoren erstellten sechs Fallstudien-Szenarien, die als Leitfaden zur Entscheidung des operativen Vorgehens bei thorakolumbalen Verletzungen dienen können [33]. Dabei wurde der Integrität des PLC im Allgemeinen erheblich mehr Bedeutung beigemessen als der Integrität der knöchernen dorsalen Strukturen.

Vaccaro et al. führten eine Befragung der STSG ausdrücklich zur Beurteilung des PLC durch [18]. 14 Kriterien, die eine Läsion des PLC nahe legen, wurden durch die Befragten nach aufsteigender Relevanz geordnet. Der Translation des Wirbelkörpers als wichtigstes Merkmal folgten eine Vergrößerung des Abstandes der Dornfortsätze auf den konventionellen ap-Röntgenaufnahmen, ein Auseinanderstehen der Facettengelenke im CT, Rupturzeichen in der MRT, ein Ödem in der fettgesättigten Sequenz der MRT und eine lokale Kyphose ohne Wirbelkörperverletzung. Als weniger relevant wurden eine tastbare interspinöse Delle in der klinischen Untersuchung, der Abriss eines Dornfortsatzsegments, über 50% Kompression der Wirbelkörpervorderkante und ein lokaler Druckschmerz angesehen. Als neues Kriterium wurde ein interspinöser Abstand von 7 mm größer als derer der angrenzenden Segmente eingeführt. Die Merkmale, die aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit Hinweise für eine PLC-Verletzung sein können, werden in der Zusammenfassung genannt.

### V. ZUSAMMENFASSUNG

Inwiefern es im klinischen Alltag tatsächlich zu einer Fehlinterpretation von Typ B-Verletzungen aufgrund der primär angefertigten Röntgenbilder und Computertomographien kommt, und welche radiologischen Gemeinsamkeiten B1-Verletzungen haben, anhand derer sie besser diagnostiziert werden können, war Inhalt der retrospektiven Studie. Sie stellt diesbezüglich die bisher größte Untersuchung dar. In dem Gesamtkollektiv von 361 Frakturen bei 270 Patienten fanden sich 93 B-Verletzungen. Beinahe 42% aller B-Verletzungen wurden mit Hilfe der primären Röntgen- und CT-Diagnostik nicht als solche erkannt. All diese Frakturen wurden initial als A-Verletzungen unterklassifiziert. Die korrekte Diagnose konnte erst intraoperativ gestellt werden und erforderte eine Reklassifikation. Da auch andere Autoren über dieses Problem berichten, ist die Konkretisierung der radiologischen Zeichen erforderlich. Diese Studie zeigte, dass eine Vergrößerung des Dornfortsatzabstandes über 7 mm im Vergleich zu den Anschlusssegmenten kein reliables Zeichen ligamentärer B-Verletzungen ist. Dies trifft ebenso auf eine Verlängerung der Wirbelkörperhinterkante und das "inverse cortical sign" zu. Dagegen sind ein monosegmentaler Kyphosewinkel über 15° und eine Reduktion der Wirbelkörpervorderkante über 50% hilfreiche Zeichen für B1-Verletzungen. Zudem kann eine Kompression der Wirbelkörperspongiosa trotz erhaltener Höhe der Wirbelkörpervorderkante über 50% ein entscheidender Hinweis auf diesen Verletzungstyp sein. Ein erweiterter Spalt der Facettengelenke tritt nur gelegentlich auf, stellt jedoch ein relativ hartes Kriterium für eine Distraktionskomponente dar.

Die Kriterien treten nicht in einer Konstellation auf, die B-Verletzungen zuverlässig und definitiv vorhersagen können. Bei 29% der B1-Verletzungen ließen sich auch nach erneuter Auswertung keinerlei diagnostische Hinweise im Röntgen und CT auf diskoligamentäre Schäden finden.

Diese diagnostische Lücke bedeutet, dass andere diagnostische Hilfsmittel eingesetzt werden müssen. Bei fraglicher Instabilität ist eine weiterführende Diagnostik mittels MRT indiziert. Ob sich ein einfacheres Verfahren, wie die Ultraschalluntersuchung, zur Diagnostik ligamentärer Schäden eignet, war Inhalt der prospektiven Studie. Die Untersuchung ist bei Patienten mit Fettleibigkeit deutlich erschwert und auf Höhe der Halswirbelsäule und oberen Brustwirbelsäule nicht geeignet. Doch nach einer anfänglich flachen Lernkurve ist der Ultraschall zur Diagnostik

von Verletzungen der dorsalen Bandstrukturen (PLC) bei Frakturen im thorakolumbalen Übergang prinzipiell geeignet. Korrekte Ergebnisse können in 90% der Untersuchungen erwartet werden. Sensitivität, Spezifität und die Vorhersagewerte lagen zum Teil über und zum Teil unter den Angaben der Literatur zur Ultraschalldiagnostik thorakolumbaler Frakturen. Im Vergleich zur MRT-Diagnostik lag die Sensitivität mit 83% unter und die Spezifität mit 94% über den Angaben anderer Autoren. Der prognostisch wichtige negative Vorhersagewert lag mit 94% weit über dem der MRT-Diagnostik. Die Ultraschalldiagnostik ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine sinnvolle Ergänzung zur radiologischen Bildgebung bei Frakturen im thorakolumbalen Übergang zum Ausschluss dorsaler ligamentärer Verletzungen. Zukünftige Studien mit größeren Patientenzahlen, insbesondere Patienten mit B-Verletzungen, müssen zur Überprüfung, Konkretisierung und besseren Vergleichbarkeit der Werte mit denen der MRT-Diagnostik beitragen.

#### LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bühren, V. (2003): Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule, Unfallchirurg (Band 106), Nr. 1, Seite 55-68.
- [2] Putz, R. und Pabst, R. (2000): Sobotta, Atlas der Anatomie des Menschen, 21. Auflage, Urban&Fischer Verlag, München Jena, Seite 25.
- [3] Nicoll, E. A. (1949): Fractures of the dorso-lumbar spine, J Bone Joint Surg Am (Band 31B), Nr. 3, Seite 376-94.
- [4] Holdsworth, F. (1970): Fractures, dislocations, and fracture-dislocations of the spine, J Bone Joint Surg Am (Band 52), Nr. 8, Seite 1534-51.
- [5] Whitesides, T. E., Jr. (1977): Traumatic kyphosis of the thoracolumbar spine, Clin Orthop Relat Res, Nr. 128, Seite 78-92.
- [6] Louis, R. (1977): Unstable fractures of the spine. III.Instability. A. Theories concerning instability, Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot (Band 63), Nr. 5, Seite 423-5.
- [7] White, AA. und Panjabi, MM. (1990): Clinical Biomechanics of the spine, second edition, JB Lippincott, Philadelphia, Seite 35, 102-106, 354.
- [8] Denis, F. (1983): The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries, Spine (Band 8), Nr. 8, Seite 817-31.
- [9] McAfee, P. C.; Yuan, H. A.; Fredrickson, B. E. und Lubicky, J. P. (1983): The value of computed tomography in thoracolumbar fractures. An analysis of one hundred consecutive cases and a new classification, J Bone Joint Surg Am (Band 65), Nr. 4, Seite 461-73.
- [10] Magerl, F.; Aebi, M.; Gertzbein, S. D.; Harms, J. und Nazarian, S. (1994): A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries, Eur Spine J (Band 3), Nr. 4, Seite 184-201.
- [11] Petersilge, C. A.; Pathria, M. N.; Emery, S. E. und Masaryk, T. J. (1995): Thoracolumbar burst fractures: evaluation with MR imaging, Radiology (Band 194), Nr. 1, Seite 49-54.
- [12] Schroder, R. J.; Albus, M.; Kandziora, F.; Herzog, H.; Rottgen, R.; Maurer, J. und Felix, R. (2003): Wertigkeit der dreidimensionalen Rekonstruktion in der CT-Diagnostik traumatischer Wirbelsäulenfrakturen, Rofo (Band 175), Nr. 11, Seite 1500-7.
- [13] Daffner, R. H.; Deeb, Z. L.; Goldberg, A. L.; Kandabarow, A. und Rothfus, W. E. (1990): The radiologic assessment of post-traumatic vertebral stability, Skeletal Radiol (Band 19), Nr. 2, Seite 103-8.
- [14] Farcy, J. P.; Weidenbaum, M. und Glassman, S. D. (1990): Sagittal index in management of thoracolumbar burst fractures, Spine (Band 15), Nr. 9, Seite 958-65.

- [15] Nagel, D. A.; Koogle, T. A.; Piziali, R. L. und Perkash, I. (1981): Stability of the upper lumbar spine following progressive disruptions and the application of individual internal and external fixation devices, J Bone Joint Surg Am (Band 63), Nr. 1, Seite 62-70.
- [16] Neumann, P.; Nordwall, A. und Osvalder, A. L. (1995): Traumatic instability of the lumbar spine. A dynamic in vitro study of flexion-distraction injury, Spine (Band 20), Nr. 10. Seite 1111-21.
- [17] Neumann, P.; Wang, Y.; Karrholm, J.; Malchau, H. und Nordwall, A. (1999):

  Determination of inter-spinous process distance in the lumbar spine. Evaluation of reference population to facilitate detection of severe trauma, Eur Spine J (Band 8), Nr. 4, Seite 272-8.
- [18] Vaccaro, A. R.; Lee, J. Y.; Schweitzer, K. M., Jr.; Lim, M. R.; Baron, E. M.; Oner, F. C.; Hulbert, R. J.; Hedlund, R.; Fehlings, M. G.; Arnold, P.; Harrop, J.; Bono, C. M.; Anderson, P. A.; Anderson, D. G.; Harris, M. B. und Spine Trauma Study, Group (2006): Assessment of injury to the posterior ligamentous complex in thoracolumbar spine trauma, Spine J (Band 6), Nr. 5, Seite 524-8.
- [19] McAfee, P. C.; Yuan, H. A. und Lasda, N. A. (1982): The unstable burst fracture, Spine (Band 7), Nr. 4, Seite 365-73.
- [20] Willen, J.; Anderson, J.; Toomoka, K. und Singer, K. (1990): The natural history of burst fractures at the thoracolumbar junction, J Spinal Disord (Band 3), Nr. 1, Seite 39-46.
- [21] Gehweiler, J. A., Jr.; Daffner, R. H. und Osborne, R. L., Jr. (1981): Relevant signs of stable and unstable thoracolumbar vertebral column trauma, Skeletal Radiol (Band 7), Nr. 3, Seite 179-83.
- [22] Leferink, V. J.; Veldhuis, E. F.; Zimmerman, K. W.; ten Vergert, E. M. und ten Duis, H. J. (2002): Classificational problems in ligamentary distraction type vertebral fractures: 30% of all B-type fractures are initially unrecognised, Eur Spine J (Band 11), Nr. 3, Seite 246-50.
- [23] Blauth, M.; Bastian, L.; Knop, C.; Lange, U. und Tusch, G. (1999): Interobserverreliabilität bei der Klassifikation von thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen, Orthopäde (Band 28), Nr. 8, Seite 662-81.
- [24] Lee, H. M.; Kim, H. S.; Kim, D. J.; Suk, K. S.; Park, J. O. und Kim, N. H. (2000): Reliability of magnetic resonance imaging in detecting posterior ligament complex injury in thoracolumbar spinal fractures, Spine (Band 25), Nr. 16, Seite 2079-84.
- [25] Oner, F. C.; van Gils, A. P.; Dhert, W. J. und Verbout, A. J. (1999): MRI findings of thoracolumbar spine fractures: a categorisation based on MRI examinations of 100 fractures, Skeletal Radiol (Band 28), Nr. 8, Seite 433-43.

- [26] Terk, M. R.; Hume-Neal, M.; Fraipont, M.; Ahmadi, J. und Colletti, P. M. (1997): Injury of the posterior ligament complex in patients with acute spinal trauma: evaluation by MR imaging, AJR Am J Roentgenol (Band 168), Nr. 6, Seite 1481-6.
- [27] Reinhold, M.; Knop, C.; Beisse, R.; Audige, L.; Kandziora, F.; Pizanis, A.; Pranzl, R.; Gercek, E.; Schultheiss, M.; Weckbach, A.; Buhren, V. und Blauth, M. (2009): Operative Behandlung traumatischer Frakturen der Brust- und Lendenwirbelsäule. Teil II: Operation und röntgenologische Befunde, Unfallchirurg (Band 112), Nr. 3, Seite 294-316.
- [28] Böhler, L (1953): Die Technik der Knochenbruchbehandlung. 9.–11. Auflage. Aufl. Wilhelm Maudrich, Wien, Düsseldorf.
- [29] Dai, L. Y.; Jiang, S. D.; Wang, X. Y. und Jiang, L. S. (2007): A review of the management of thoracolumbar burst fractures, Surg Neurol (Band 67), Nr. 3, Seite 221-31; discussion 231.
- [30] Leibl, T.; Funke, M.; Dresing, K. und Grabbe, E. (1999): Instabiliät von Wirbelsäulenfrakturen Therapeutische Relevanz unterschiedlicher Klassifikationen, Rofo (Band 170), Nr. 2, Seite 174-80.
- [31] Haas, N.P.; Schnake, K.J. und Kandziora, F. (2004): Reposition frischer Wirbelkompressionsfrakturen in Lokalanästhesie, Chirurg (Band 6), Nr. 75, Seite 631-636.
- [32] Reinhold, M.; Knop, C.; Beisse, R.; Audige, L.; Kandziora, F.; Pizanis, A.; Pranzl, R.; Gercek, E.; Schultheiss, M.; Weckbach, A.; Buhren, V. und Blauth, M. (2009): Operative Behandlung traumatischer Frakturen der Brust- und Lendenwirbelsäule. Teil III: Nachuntersuchung, Unfallchirurg (Band 112), Nr. 2, Seite 149-67.
- [33] Vaccaro, A. R.; Lim, M. R.; Hurlbert, R. J.; Lehman, R. A., Jr.; Harrop, J.; Fisher, D. C.; Dvorak, M.; Anderson, D. G.; Zeiller, S. C.; Lee, J. Y.; Fehlings, M. G. und Oner, F. C. (2006): Surgical decision making for unstable thoracolumbar spine injuries: results of a consensus panel review by the Spine Trauma Study Group, J Spinal Disord Tech (Band 19), Nr. 1, Seite 1-10.
- [34] Knop, C.; Blauth, M.; Buhren, V.; Arand, M.; Egbers, H. J.; Hax, P. M.; Nothwang, J.; Oestern, H. J.; Pizanis, A.; Roth, R.; Weckbach, A. und Wentzensen, A. (2001): Operative Behandlung von Verletzungen des thorakolumbalen Übergangs Teil 3: Nachuntersuchung. Ergebnisse einer prospektiven multizentrischen Studie der Arbeitsgemeinschaft "Wirbelsäule" der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie, Unfallchirurg (Band 104), Nr. 7, Seite 583-600.
- [35] Verlaan, J. J.; Diekerhof, C. H.; Buskens, E.; van der Tweel, I.; Verbout, A. J.; Dhert, W. J. und Oner, F. C. (2004): Surgical treatment of traumatic fractures of the thoracic and

- lumbar spine: a systematic review of the literature on techniques, complications, and outcome, Spine (Band 29), Nr. 7, Seite 803-14.
- [36] Haba, H.; Taneichi, H.; Kotani, Y.; Terae, S.; Abe, S.; Yoshikawa, H.; Abumi, K.; Minami, A. und Kaneda, K. (2003): Diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging for detecting posterior ligamentous complex injury associated with thoracic and lumbar fractures, J Neurosurg (Band 99), Nr. 1 Suppl, Seite 20-6.
- [37] Oner, F. C.; Ramos, L. M.; Simmermacher, R. K.; Kingma, P. T.; Diekerhof, C. H.; Dhert, W. J. und Verbout, A. J. (2002): Classification of thoracic and lumbar spine fractures: problems of reproducibility. A study of 53 patients using CT and MRI, Eur Spine J (Band 11), Nr. 3, Seite 235-45.
- [38] Budorick, N. E.; Pretorius, D. H. und Nelson, T. R. (1995): Sonography of the fetal spine: technique, imaging findings, and clinical implications, AJR Am J Roentgenol (Band 164), Nr. 2, Seite 421-8.
- [39] Hagen, A. (1987): Die transabdominelle Ultraschalltomographie lumbaler Bandscheiben und des Lumbalkanals., Zentralbl Neurochir (Band 48), Nr. 4, Seite 273-9.
- [40] Tolly, E. (1984): Transabdominale Sonographie lumbaler Bandscheiben und intraspinaler Strukturen., Rofo (Band 141), Nr. 5, Seite 546-55.
- [41] Kolstad, F.; Rygh, O. M.; Selbekk, T.; Unsgaard, G. und Nygaard, O. P. (2006): Three-dimensional ultrasonography navigation in spinal cord tumor surgery. Technical note, J Neurosurg Spine (Band 5), Nr. 3, Seite 264-70.
- [42] Mueller, L. A.; Degreif, J.; Schmidt, R.; Pfander, D.; Forst, R.; Rommens, P. M.; Mueller, L. P. und Rudig, L. (2006): Ultrasound-guided spinal fracture repositioning, ligamentotaxis, and remodeling after thoracolumbar burst fractures, Spine (Band 31), Nr. 20, Seite E739-46; discussion E747.
- [43] Moon, S. H.; Park, M. S.; Suk, K. S.; Suh, J. S.; Lee, S. H.; Kim, N. H. und Lee, H. M. (2002): Feasibility of ultrasound examination in posterior ligament complex injury of thoracolumbar spine fracture, Spine (Band 27), Nr. 19, Seite 2154-8.
- [44] Gallardo-Guzman, M.; Rios-Tellez, R. und Anaya-Vallejo, S. (2007): Correlation between ultrasound and surgery in supraspinal and interspinal ligaments injuries, Rev Med Inst Mex Seguro Soc (Band 45), Nr. 1, Seite 75-81.
- [45] Vordemvenne, T.; Hartensuer, R.; Lohrer, L.; Vieth, V.; Fuchs, T. und Raschke, M. J. (2009): Is there a way to diagnose spinal instability in acute burst fractures by performing ultrasound? Eur Spine J (Band 18), Nr. 7, Seite 964-71.
- [46] Kim, J. T.; Jung, C. W.; Lee, J. R.; Min, S. W. und Bahk, J. H. (2003): Influence of lumbar flexion on the position of the intercrestal line, Reg Anesth Pain Med (Band 28), Nr. 6, Seite 509-11.

- [47] Salter, RB (1970): Textbook of disorders and injuries of the musculoskeletal system, Williams and Wilkins, Philadelphia, Seite 489.
- [48] Naidich, J. B.; Naidich, T. P.; Garfein, C.; Liebeskind, A. L. und Hyman, R. A. (1977): The widened interspinous distance: a useful sign of anterior cervical dislocation in the supine frontal projection, Radiology (Band 123), Nr. 1, Seite 113-6.
- [49] Panjabi, M. M.; Hausfeld, J. N. und White, A. A., 3rd (1981): A biomechanical study of the ligamentous stability of the thoracic spine in man, Acta Orthop Scand (Band 52), Nr. 3, Seite 315-26.
- [50] Cobb, J.R. (1948): Outline in the Study of Scoliosis, Instructional Course Lectures, The American Academy of Orthopaedic Surgeons (Band 5), Seite 261-275.
- [51] Keynan, O.; Fisher, C. G.; Vaccaro, A.; Fehlings, M. G.; Oner, F. C.; Dietz, J.; Kwon, B.; Rampersaud, R.; Bono, C.; France, J. und Dvorak, M. (2006): Radiographic measurement parameters in thoracolumbar fractures: a systematic review and consensus statement of the spine trauma study group, Spine (Band 31), Nr. 5, Seite E156-65.
- [52] Kuklo, T. R.; Polly, D. W.; Owens, B. D.; Zeidman, S. M.; Chang, A. S. und Klemme, W. R. (2001): Measurement of thoracic and lumbar fracture kyphosis: evaluation of intraobserver, interobserver, and technique variability, Spine (Band 26), Nr. 1, Seite 61-5; discussion 66.
- [53] Daffner, R. H.; Deeb, Z. L. und Rothfus, W. E. (1987): The posterior vertebral body line: importance in the detection of burst fractures, AJR Am J Roentgenol (Band 148), Nr. 1, Seite 93-6.
- [54] O'Callaghan, J. P.; Ullrich, C. G.; Yuan, H. A. und Kieffer, S. A. (1980): CT of facet distraction in flexion injuries of the thoracolumbar spine: the "naked" facet, AJR Am J Roentgenol (Band 134), Nr. 3, Seite 563-8.
- [55] Harris, M. B.; Stelly, M. V.; Villarraga, M. L.; Schroeder, A. C. und Thomas, K. A. (2001): Modeling of the naked facet sign in the thoracolumbar spine, J Spinal Disord (Band 14), Nr. 3, Seite 252-8.
- [56] Harris, M. B.; Chang, D. S.; Shilt, J. S.; Villarraga, M. L.; Thomas, K. A. und Stelly, M. V. (2002): Modeling of the naked facet sign in the lumbar spine, J Spinal Disord Tech (Band 15), Nr. 6, Seite 495-501.
- [57] Knop, C.; Blauth, M.; Buhren, V.; Hax, P. M.; Kinzl, L.; Mutschler, W.; Pommer, A.; Ulrich, C.; Wagner, S.; Weckbach, A.; Wentzensen, A. und Worsdorfer, O. (1999): Operative Behandlung von Verletzungen des thorakolumbalen Ubergangs. Teil 1: Epidemiologie., Unfallchirurg (Band 102), Nr. 12, Seite 924-35.

- [58] Takeshita, K.; Peterson, E. T.; Bylski-Austrow, D.; Crawford, A. H. und Nakamura, K. (2004): The nuchal ligament restrains cervical spine flexion, Spine (Band 29), Nr. 18, Seite E388-93.
- [59] Stagnara, P.; De Mauroy, J. C.; Dran, G.; Gonon, G. P.; Costanzo, G.; Dimnet, J. und Pasquet, A. (1982): Reciprocal angulation of vertebral bodies in a sagittal plane: approach to references for the evaluation of kyphosis and lordosis, Spine (Band 7), Nr. 4, Seite 335-42.
- [60] Bernhardt, M. und Bridwell, K. H. (1989): Segmental analysis of the sagittal plane alignment of the normal thoracic and lumbar spines and thoracolumbar junction, Spine (Band 14), Nr. 7, Seite 717-21.
- [61] Harrop, J. S.; Vaccaro, A. R.; Hurlbert, R. J.; Wilsey, J. T.; Baron, E. M.; Shaffrey, C. I.; Fisher, C. G.; Dvorak, M. F.; Oner, F. C.; Wood, K. B.; Anand, N.; Anderson, D. G.; Lim, M. R.; Lee, J. Y.; Bono, C. M.; Arnold, P. M.; Rampersaud, Y. R. und Fehlings, M. G. (2006): Intrarater and interrater reliability and validity in the assessment of the mechanism of injury and integrity of the posterior ligamentous complex: a novel injury severity scoring system for thoracolumbar injuries. Invited submission from the Joint Section Meeting On Disorders of the Spine and Peripheral Nerves, March 2005, J Neurosurg Spine (Band 4), Nr. 2, Seite 118-22.
- [62] Vaccaro, A. R.; Rihn, J. A.; Saravanja, D.; Anderson, D. G.; Hilibrand, A. S.; Albert, T. J.; Fehlings, M. G.; Morrison, W.; Flanders, A. E.; France, J. C.; Arnold, P.; Anderson, P. A.; Friel, B.; Malfair, D.; Street, J.; Kwon, B.; Paquette, S.; Boyd, M.; Dvorak, M. F. und Fisher, C. (2009): Injury of the posterior ligamentous complex of the thoracolumbar spine: a prospective evaluation of the diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging, Spine (Phila Pa 1976) (Band 34), Nr. 23, Seite E841-7.
- [63] Grunst, M. (2003): Empfehlungen zur Vermeidung gesundheitlicher Risiken bei Anwendung magnetischer Resonanzverfahren in der medizinischen Diagnostik, Berichte der Strahlenschutzkommission, Nr. 36.
- [64] Kassenärztliche Bundesvereinigung Berlin (2009): Einheitlicher Bewertungsmaßstab (EBM) ab 01.01.2009, erstellt am 15.01.2009 (V. 7.1).
- [65] Hess, R. (2008): Gebührenordnung für Ärzte (GOÄ), Stand 1.04.2008.
- [66] Vaccaro, A. R.; Lehman, R. A., Jr.; Hurlbert, R. J.; Anderson, P. A.; Harris, M.; Hedlund, R.; Harrop, J.; Dvorak, M.; Wood, K.; Fehlings, M. G.; Fisher, C.; Zeiller, S. C.; Anderson, D. G.; Bono, C. M.; Stock, G. H.; Brown, A. K.; Kuklo, T. und Oner, F. C. (2005): A new classification of thoracolumbar injuries: the importance of injury morphology, the integrity of the posterior ligamentous complex, and neurologic status, Spine (Band 30), Nr. 20, Seite 2325-33.

# **LEBENSLAUF**

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen	Gründen in der	r elektronischen	Version 1	neiner
Arbeit nicht veröffentlicht.				

#### **DANKSAGUNG**

Es ist mir ein besonderes Anliegen, mich bei Personen, die mir nahe stehen und die mich unterstützt haben, zu bedanken.

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Priv.-Doz. Dr. Frank Kandziora die Überlassung des interessanten und final brisanten Themas dieser Doktorarbeit und seine konstante Arbeit hinter den Kulissen. Durch die zahlreichen Gespräche zwischen ihm und meinem Betreuer Dr. Klaus J. Schnake leistete er entscheidende Hilfe und Unterstützung zur Entstehung dieser Dissertation.

Ganz besonders möchte ich mich bei Dr. Klaus J. Schnake für seine ausgezeichnete Betreuung und unablässige Motivation während der umfassenden Recherchen und der besonders zu Studienbeginn komplexen klinischen Abläufe bedanken. Sein außerordentliches Engagement, seine Ratschläge und die fruchtbaren Diskussionen in unseren regelmäßigen Konferenzen waren sowohl für die retrospektive als auch für die prospektive Studie eine unnachahmliche Hilfe. Seine strukturierte Arbeitsweise und sein Ehrgeiz unter den herausfordernden Bedingungen des klinischen Alltages haben mich nachhaltig beeindruckt. So lernte ich ihn als Persönlichkeit schätzen und freute mich nicht nur über fachspezifischen, sondern auch über privaten Austausch. Der anhaltend reibungslose Informationsfluss, seine zügige Bearbeitung meiner Anliegen und seine ständige Hilfsbereitschaft verkörperten diese herausragende, ja, exzellente, Betreuung.

Den Mitarbeitern am Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie danke ich für die Unterstützung bei der klinischen Studie, sowie bei der Recherche der klinischen Daten. Dabei gilt mein Dank insbesondere den Mitarbeitern der Rettungsstelle, die mir durch ihre Benachrichtigung die Untersuchung der Patienten ermöglichten. Zudem danke ich den Mitarbeitern der Ultraschallabteilung des Instituts für Radiologie und den Patienten, die sich mit einer frischen Wirbelsäulenverletzung untersuchen ließen. Für die retrospektive Studie war mir ganz besonders unsere Studienassistentin Birgit Koch durch ihren unentbehrlichen Einsatz eine große Hilfe. Die Arbeit mit Ihr bereitete mir stets große Freude.

Aus meinem privaten Umfeld möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern bedanken, die mich nicht nur während der Dissertation und des Studiums uneingeschränkt unterstützten, sondern auch in den für sie schwierigen Zeiten ein offenes Ohr für mich hatten. Meinem guten Freund und temporären Mitbewohner Andreas Maxeiner danke ich für unseren regen Austausch zwischen "Tür und Angel", aber auch für seine konstruktive Kritik und Hilfe in Detailfragen.

# **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass die von mir vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema *Röntgenologische und sonografische Diagnostik von Flexions-Distraktions-Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule* von mir selbst und ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst worden ist. Sie stellt auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dar und es sind keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt worden.

Datum	Unterschrift
-------	--------------