

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Klinik und Poliklinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie
- Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Michael J. Raschke -

**WERTIGKEIT DES ULTRASCHALLS IN DER DIAGNOSTIK
LIGAMENTÄR INSTABILER FRAKTUREN
DER THORAKOLUMBALEN WIRBELSÄULE**
-
EINE PROSPEKTIV VERGLEICHENDE STUDIE ZUM MRT

INAUGURAL – DISSERTATION

zur

Erlangung des doctor medicinae

der Medizinischen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster
vorgelegt von

HÜPPE, TOBIAS

aus Dorsten

2007

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Westfälischen
Wilhelms-Universität Münster

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Volker Arolt

1. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. med. Marc Schult

2. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. med. Christian Götze

Tag der mündlichen Prüfung: 07. März 2008

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Klinik und Poliklinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie
- Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Michael J. Raschke -
Referent: Priv.-Doz. Dr. med. Marc Schult
Koreferent: Priv.-Doz. Dr. med. Christian Götze

ZUSAMMENFASSUNG

WERTIGKEIT DES ULTRASCHALLS IN DER DIAGNOSTIK
LIGAMENTÄR INSTABILER FRAKTUREN
DER THORAKOLUMBALEN WIRBELSÄULE
-
EINE PROSPEKTIV VERGLEICHENDE STUDIE ZUM MRT

Hüppe, Tobias

In dieser prospektiven klinischen Studie konnten wir 25 Patienten mit Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule sonographisch untersuchen. Dabei sollte insbesondere der dorsale Bandapparat mit dem Lig. supraspinale und Lig. interspinale betrachtet werden. Auch Einblutungen in diesen Bandkomplex als indirekter Hinweis einer Läsion derselben wurden von uns bewertet.

Bei 15 Patienten konnten diese Strukturen ebenso in der MRT von einem unabhängigen Radiologen beurteilt werden. 19 Patienten wurden schließlich primär operativ versorgt, bei denen dann auch eine intraoperative Kontrolle des dorsalen Bandapparates möglich war. Die Ergebnisse der beiden bildgebenden Verfahren waren dem Operateur zuvor nicht bekannt.

Auf diese Weise war es möglich, die Ergebnisse der Sonographie mit den tatsächlichen Befunden der Operation – sowie bei den konservativ therapierten Patienten mit den Ergebnissen der MRT – zu vergleichen. Somit konnten wir Angaben zur Sensitivität und Spezifität des Ultraschalls in der Bewertung einer Verletzung des Lig. supraspinale bzw. Lig. interspinale sowie einer Einblutung in den dorsalen Bandapparat im Vergleich zu den intraoperativen Befunden bzw. der MRT machen.

Unsere Ergebnisse konnten zeigen, dass die Sonographie in der Darstellung von Verletzungen des posterioren Ligamentkomplexes eine der MRT vergleichbare Vorhersagesicherheit bietet. Insgesamt bestätigen unsere Daten, dass mit dem Ultraschall eine diagnostische Alternative zur MRT besteht, die gut durchführbar und leicht erlernbar ist, sowie neben einer guten Verfügbarkeit die Vorteile der Zeit- und Kosteneffizienz gegenüber der MRT bietet.

Eine sichere Differenzierung zwischen Typ-A- und Typ-B-Verletzungen scheint uns mittels Ultraschall möglich, die dann das operative Vorgehen zu beeinflussen vermag. Bei sicherer Identifizierung einer Typ-A-Verletzung durch die Sonographie könnte ein anteriores Vorgehen mit rein ventraler Spondylodese ausreichend sein. Damit könnte nicht zuletzt auch aufgrund der definitiven primären Versorgung die Prognose verbessert und die Morbidität reduziert werden.

Tag der mündlichen Prüfung: 07. März 2008

A. <u>Einleitung</u>	S. 1
1. Einführung	S. 1
2. Chirurgisch-anatomische Hinweise	S. 3
2.1 Bandverbindungen	S. 3
2.2 Morphometrische Maße	S. 6
2.3 Traumatologische Einteilung der Wirbelsäule	S. 7
3. Einteilungen	S. 8
3.1 Säulenmodelle	S. 8
3.2 Klassifikation nach Magerl	S. 9
3.2.1 Typ-A-Verletzungen	S. 10
3.2.2 Typ-B-Verletzungen	S. 14
3.2.3 Typ-C-Verletzungen	S. 18
4. Diagnose	S. 20
4.1 Klinische und röntgenologische Merkmale von Typ-A- und Typ-B-Verletzungen	S. 20
4.1.1 Typ-A-Verletzungen	S. 20
4.1.2 Typ-B-Verletzungen	S. 21
4.2 Praktische Anleitung zur Klassifikation von Typ-A- und Typ-B-Verletzungen	S. 22
4.3 Klinische Untersuchung	S. 24
4.4 Röntgenologische Untersuchungen	S. 24
4.4.1 Konventionelles Röntgen	S. 24
4.4.2 Computertomographie	S. 25
4.4.3 Magnetresonanztomographie	S. 26
4.4.4 Operation	S. 28
4.4.5 Sonographie	S. 28
5. Ziele der Studie	S. 29
 B. <u>Material und Methoden</u>	 S. 32
1. Untersuchungsprotokoll	S. 32
2. Klinische Untersuchung, konventionelles Röntgen	S. 38
3. Sonographie	S. 39
4. Magnetresonanztomographie	S. 42
5. Operation	S. 44
6. Berechnungen, statistische Methoden	S. 45
 C. <u>Ergebnisse</u>	 S. 49
1. Normalbefunde und Pathologien	S. 49

2. Untersuchungsprotokoll	S. 53
3. Sensitivität und Spezifität	S. 54
3.1 Ligamentum supraspinale	S. 54
3.2 Ligamentum interspinale	S. 55
3.3 Hämatom	S. 57
3.4 PLC	S. 60
4. Unterklassifizierung von Typ-A-Verletzungen	S. 61
5. Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule	S. 63
5.1 Patientenkollektiv	S. 63
5.2 Unfallmechanismus	S. 64
5.3 Klinik	S. 64
5.4 Häufigkeiten der Wirbelkörperfrakturen an der thorakolumbalen Wirbelsäule	S. 66
5.5 Häufigkeiten der Verletzungen, aufgeteilt nach der Wirbelsäulenebene	S. 67
5.6 Radiologische Befunde	S. 67
5.7 Häufigkeiten der Verletzungen	S. 68
5.8 Therapie	S. 69
6. Diagnostikprogramm	S. 71
D. <u>Diskussion</u>	S. 73
1. Normalbefunde und Pathologien	S. 73
2. Sensitivität und Spezifität	S. 78
3. Unterklassifizierung von Typ-A-Verletzungen	S. 80
4. Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule	S. 80
5. Diagnostikprogramm	S. 84
E. <u>Zusammenfassung</u>	S. 85
F. <u>Literaturverzeichnis</u>	S. 87
G. <u>Anhang</u>	S. I

A. Einleitung

1. Einführung

Die Wirbelsäule als bewegliches Achsenskelett des Körpers trägt die Last von Kopf, Extremitäten und Rumpf. Sie ist für die umfangreiche Beweglichkeit und den Halt des Körpers verantwortlich. Ihre Stabilität erreicht sie durch die funktionelle Einheit von Knochen in Form von Wirbelkörpern mit Wirbelfortsätzen, den Zwischenwirbelscheiben, dem muskulären Apparat und den Bändern.

Verletzungen einer oder mehrerer dieser Komponenten führen zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Instabilität der Wirbelsäule, die zu degenerativen Veränderungen, neurologischen Defiziten oder chronischen Schmerzen führen kann.

Unter den Verletzungen der Wirbelsäule sollen in dieser Studie insbesondere die Frakturen betrachtet werden. Dabei sollen Frakturen mit Verletzung des Bandapparates von solchen ohne Beteiligung ligamentärer Strukturen unterschieden werden. Beide Formen können zu einer Instabilität der Wirbelsäule führen, die dann einer operativen Behandlung bedürfen.

Die richtige Therapie und Prognose von Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule wird dabei seit langem kontrovers diskutiert [2, 3, 4, 14]. Die detaillierte Bildgebung hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass auch okkulte Verletzungen einer invasiven Therapie zugeführt werden konnten [41]. Eine geeignete Therapie setzt jedoch eine Klassifizierung der Verletzung voraus, da die Wahl der operativen Technik entscheidend von der Art der Verletzung mitbestimmt wird. Ein wichtiges Kriterium ist hierbei auch die Beteiligung ligamentärer Strukturen. Eine korrekte Bewertung sowohl der knöchernen als auch der ligamentären Komponente dieser Verletzungen scheint damit für das Outcome eine wesentliche Rolle zu spielen [6].

Die bildgebende Diagnostik bildet hierbei die Voraussetzung für die Klassifikation von Wirbelsäulenverletzungen. Zur Beurteilung der ossären Läsionen wird standardmäßig das konventionelle Röntgen sowie die

Computertomographie mit der Möglichkeit der multiplanaren Rekonstruktion eingesetzt. Die Einordnung einer ligamentären Kontinuitätsunterbrechung sowie die Bewertung der Instabilität der Wirbelsäule sind mit diesen diagnostischen Methoden jedoch nur über indirekte radiologische Zeichen wie Kyphosewinkel oder Weitung des interspinösen Raumes möglich. Dennoch kann auch bei einem Fehlen dieser Hinweise eine Instabilität vorliegen [23, 44, 48].

Die Stabilität der Wirbelsäule wird durch die Bandscheibe, die Gelenkkapsel, das Lig. longitudinale anterius et posterius, das Lig. flavum, das Lig. interspinale sowie durch das Lig. supraspinale gewährleistet. Dabei wird insbesondere dem dorsalen Bandkomplex (posterior ligament complex, PLC), bestehend aus Lig. flavum, Lig. interspinale und Lig. supraspinale, eine große Bedeutung beigemessen. Verletzungen in diesem Bereich gehen mit einem starken Verlust der Stabilität einher.

Die Magnetresonanztomographie nimmt in der Diagnostik von Bandläsionen den wohl höchsten Stellenwert ein. Mehrere Studien konnten zeigen, dass die MRT in der Beurteilung von Verletzungen des PLC eine hohe Sensitivität und Spezifität aufweist [31]. Dennoch scheint die Anwendbarkeit dieses bildgebenden Verfahrens stark eingeschränkt zu sein. Patienten mit ferromagnetischen Implantaten wie z. B. Herzschrittmachern sowie schwerer Klaustrophobie begrenzen dessen Einsatzbereich. Außerdem ist ein Magnetresonanztomograph in vielen Kliniken derzeit noch nicht verfügbar oder aufgrund fehlenden Bereitschaftsdienstes nicht ständig disponibel. Zudem verlangt der wirtschaftliche und finanzielle Aspekt dieser Diagnostik nach einer kostengünstigen Alternative, die jedoch eine ausreichend hohe Sensitivität und Spezifität bezüglich der Diagnostik gewährleistet. Die Sonographie könnte dabei ein einfaches, zeitsparendes und kostengünstiges bildgebendes Verfahren darstellen.

Ultraschall, mit seinen vielen Einsatzmöglichkeiten als bildgebendes Verfahren, könnte durch die leichte Verfügbarkeit, die schnelle Durchführbarkeit und die vielen finanziellen Vorteile eine interessante Alternative zu herkömmlichen Verfahren darstellen.

Anhand dieser Diagnostik lässt sich somit eine Einteilung der Verletzungen in Frakturen mit und ohne Bandbeteiligung vornehmen, was für die weitere Therapieplanung sowie die Wahl der Operationsmethode von großer Bedeutung ist.

In dieser prospektiven klinischen Studie soll die Anwendbarkeit von Ultraschall bezüglich der Diagnostik von Verletzungen des PLC untersucht werden. Thorakaler und lumbaler Wirbelsäulenbereich sollen insbesondere betrachtet werden.

Ziel dieser Studie ist es, ein Protokoll von Wirbelsäulenverletzungen anhand von 25 Patienten zu entwerfen. Es soll die Zuverlässigkeit einer Ultraschalluntersuchung im Bezug auf die Diagnostik von Verletzungen des dorsalen Bandapparates im thorakolumbalen Bereich der Wirbelsäule geprüft werden. Dabei wird nach der diagnostischen Übereinstimmung mit den tatsächlichen intraoperativen Befunden sowie - bei den konservativ therapierten Patienten - mit den Bewertungen der Magnetresonanztomographie gesucht und die Ergebnisse verglichen. Ferner sollen Angaben zur Sensitivität und Spezifität der Sonographie in der Bewertung einer Verletzung des Lig. supraspinale und Lig. interspinale sowie in der Beurteilung einer Einblutung in den dorsalen Bandapparat als indirektes Zeichen einer Läsion der dorsalen Bandhaft im Vergleich zu den intraoperativen Befunden bzw. der MRT gemacht werden.

2. Chirurgisch-anatomische Hinweise

2.1 Bandverbindungen

Mehrere Bänder entlang der Wirbelkörper und zwischen den Wirbelbögen stabilisieren die Wirbelsäule.

Das am weitesten ventral gelegene vordere Längsband, Lig. longitudinale anterius, verbindet die Wirbelkörper und überspannt die Zwischenwirbelscheiben, ohne sich mit diesen fest zu verbinden (Abb. 1).

Das Band wird durch den inneren Druck der Zwischenwirbelscheiben in Spannung gehalten. Es besteht aus längs verlaufenden Kollagenfasern, die in drei Schichten angeordnet sind. Die innerste Schicht ist an den

Rändern benachbarter Zwischenwirbelscheiben befestigt, die mittlere Schicht verbindet die Disci und die Wirbelkörper über drei Segmente. Die oberflächlichste Schicht erstreckt sich dagegen über vier bis fünf Segmente. Im Bereich der Konkavität der Wirbelsäule ist das Band am dicksten ausgeprägt, es strahlt in das Periost ein [16]. Die Funktion besteht in der Begrenzung der Hyperextension und Hyperdistraction. Die notwendige Kraft, um das Band zu zerreißen, ist etwa doppelt so groß wie beim Lig. longitudinale posterius.

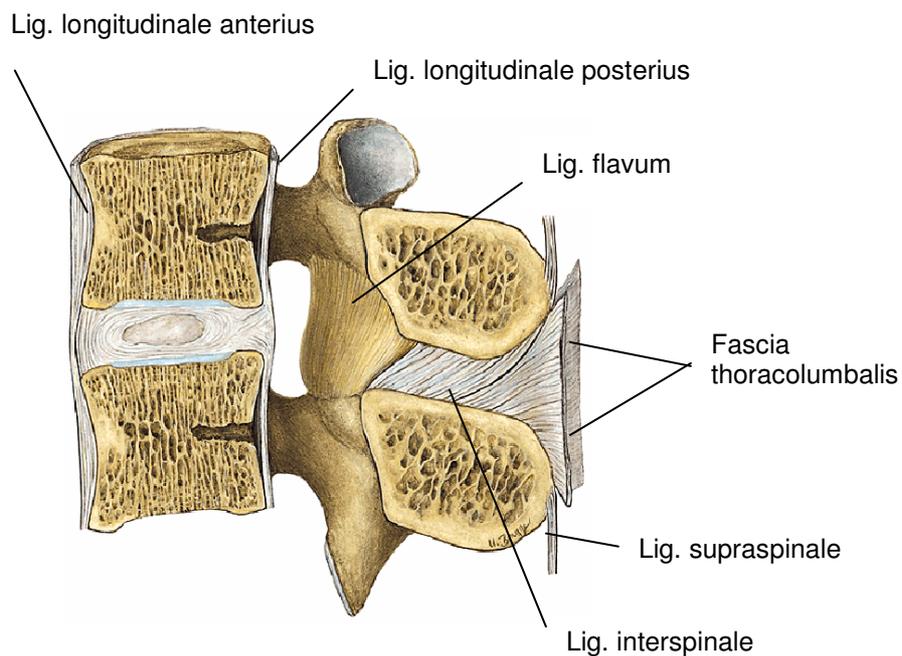


Abb. 1 Lumbales Bewegungssegment, Schema, Medianschnitt. Aus [45]

Das hintere Längsband, Lig. longitudinale posterius, haftet dagegen fest an den Zwischenwirbelscheiben (Abb. 1). Die Verwachsung mit der dorsalen Ober- und Unterkante der Wirbelkörper ist nur locker ausgeprägt. Ebenso wie das vordere Längsband ist das Lig. longitudinale posterius aus drei Schichten aufgebaut. Die innere Schicht verbindet benachbarte Wirbelkörper, die äußeren Schichten verlaufen dagegen über mehrere Segmente. Im Bereich der thorakalen Wirbelsäule ist das Band am dicksten ausgeprägt. Seine Funktion besteht in der Begrenzung der Hyperflexion. Die Reißkraft liegt bei 67-138 N [35].

Das Lig. flavum steht der „Wirbelkörper-Bandscheiben-Säule“ gegenüber (Abb. 1 und Abb. 2). Es stellt sich als paariges, breites Band dar und

verläuft von der ventralen Seite der unteren Lamina zum hinteren Rand der oberen Lamina. Verbindungen zur Gelenkkapsel sind ebenfalls ausgebildet (Abb. 2). Es besteht vorwiegend aus elastischen Fasern und ist deshalb von gelblicher Farbe. Das Lig. flavum steht unter einer starken Längsspannung (Vorspannung bei neutraler Stellung der Wirbelsäule 10-20 N) [5]. Das Gewicht des Rumpfes und die Rumpfmuskulatur wirken dieser Extensionskraft entgegen. Die Elastizität nimmt jedoch im Alter ab [40]. Bei der Rumpfbeugung erlaubt das Ligament ein Auseinanderweichen der Laminae, führt sie jedoch auf Grund seiner Eigenelastizität in Neutralstellung ebenso zurück.

Die Kapselbänder entsprechen den Gelenkkapseln. Ihre Fasern sind senkrecht zur Gelenkfläche angeordnet (Abb. 2). Sie verhindern ein Auseinanderweichen der Gelenkflächen.

Das Lig. intertransversarium kommt nur in der Brust- und oberen Lendenwirbelsäule vor. Es verläuft zwischen den Querfortsätzen (Abb. 2).

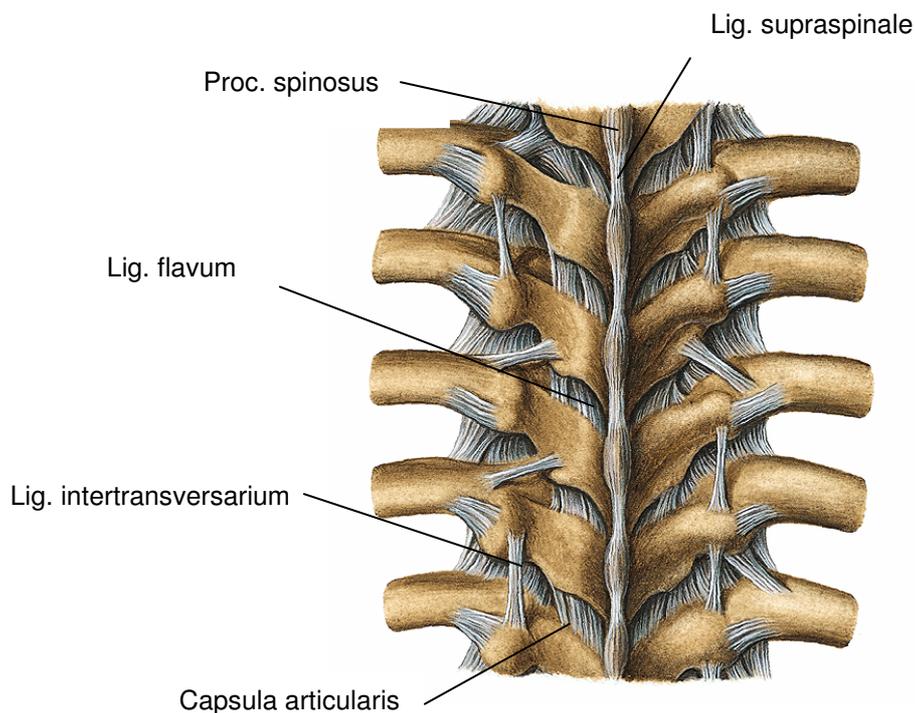


Abb. 2 Bänder der Wirbelbögen und der Rippenwirbelverbindungen, von dorsal. Aus [45]

Das Band beschränkt ebenso wie die Kapselbänder das Bewegungsausmaß der Wirbelgelenke, indem es sowohl bei Flexion und

Extension als auch bei der Lateralflexion langsam zunehmend gespannt wird und damit die begrenzende Gegenkraft aufbaut. Bei der Rotation der Wirbelsäule schränkt es die Dorsalverschiebung des jeweils homolateralen unteren Gelenkfortsatzes ein.

Bei der Flexion der Wirbelsäule werden mit den Wirbelbögen auch die Dornfortsätze voneinander entfernt. Letztere werden durch das Lig. supraspinale und das Lig. interspinale miteinander verbunden (Abb. 1). In diese Bänder strahlen ebenso Fasern der Fascia thoracolumbalis ein (Abb. 1). Das Lig. interspinale der Lendenwirbelsäule hat in den Interspinalräumen einen schräg nach dorsal ansteigenden Verlauf. Dadurch verhindert es einerseits eine Dorsalverschiebung des jeweils kranialen Wirbels eines Segments, andererseits begrenzt es die Ventralflexion. Das eigentliche Lig. supraspinale spannt sich nur in der thorakalen Wirbelsäule und nach kaudal bis zum zweiten Lendenwirbelkörper aus [5]. Sowohl das Lig. supraspinale als auch das Lig. interspinale sind am stärksten an der Lendenwirbelsäule ausgeprägt [51].

Das Lig. supraspinale, das Lig. interspinale sowie das Lig. flavum werden unter dem Begriff des dorsalen Bandkomplexes (posterior ligament complex, PLC) zusammengefasst. Terk et al. [50] konnten zeigen, dass Läsionen des PLC bei 53 % ihrer Patienten mit thorakolumbalen Traumata der Wirbelsäule vorzufinden waren. Am häufigsten stellten sie diese Läsionen bei Patienten mit Flexions-Distraktions-Verletzungen sowie Dislokationsfrakturen fest. Bei Berstungsfrakturen war eine Ruptur des PLC in 42 % der Fälle sichtbar, bei den Kompressionsfrakturen in 26 %.

2.2 Morphometrische Maße

Aus diagnostischer Sicht, insbesondere für die Sonographie, ist die Morphologie der Dornfortsätze an der thorakolumbalen Wirbelsäule interessant.

Scoles et al. [49] konnten die Ergebnisse von morphometrischen Messungen zahlreicher Wirbelkörper und deren Fortsätzen zusammentragen. Im Bereich der dorsalen Elemente wie dem Processus

spinosus war die Morphologie jedoch individuell so variabel, dass sich keine allgemein gültigen Werte angeben ließen.



Abb. 3 Wirbelsäule, von lateral. Aus [45]

Generell lässt sich jedoch sagen, dass der Processus spinosus im Bereich der cervicalen und thorakalen Wirbelsäule den Wirbelkanal nach dorsal deckt. Die Dornfortsätze der mittleren Brustwirbelsäule decken sich dachziegelartig, so dass die Spitze jeweils in Höhe des übernächsten kaudalen Querfortsatzes liegt [5]. Im Bereich der Lendenwirbelsäule sind die Dornfortsätze kräftiger entwickelt, seitlich abgeplattet und gerade nach dorsal gerichtet (Abb. 3).

2.3 Traumatologische Einteilung der Wirbelsäule

Die Brust- und Lendenwirbelsäule kann in drei Bereiche eingeteilt werden:

- den kyphotischen thorakalen Teil von T₁-T₁₀
- den thorakolumbalen Übergang mit horizontal gestellten Wirbeln von T₁₁-L₂ und
- die lordotische untere LWS von L₃-L₅

Diese Einteilung soll auch im Untersuchungsprotokoll beibehalten werden. Alle Verletzungen werden einem dieser drei Level zugeordnet. Der

thorakolumbale Übergang stellt die Hauptlokalisierung von Frakturen im Bereich gesamte Wirbelsäule dar. Etwa die Hälfte aller Verletzungen der gesamten Wirbelsäule fallen auf T₁₁-L₂ [9, 18, 28, 34, 36]. Dafür sind zum einen der Übergangsbereich zwischen Kyphose der Brustwirbelsäule und Lordose der Lendenwirbelsäule verantwortlich, zum anderen entfällt hier die stabilisierende Funktion des Thorax. Außerdem verändert sich die Lage der kleinen Wirbelgelenke. Im thorakalen Bereich sind die Gelenkflächen mehr frontal, im Bereich der Lendenwirbelsäule dagegen mehr sagittal ausgerichtet [28]. Damit besteht eine größere Gefahr einer Translationsbewegung zwischen den einzelnen Wirbelsegmenten.

Etwa 50 % der thorakolumbalen Frakturen sind im Bereich der Segmente T₁₁-L₂ zu finden, 40 % liegen im Bereich der Brustwirbelsäule und nur 10 % in der unteren Lendenwirbelsäule und im Sakrum [38].

3. Einteilungen

3.1 Säulenmodelle

Die einfachste Einteilung der Wirbelsäulenverletzungen beruht auf der Unterscheidung zwischen stabilen und instabilen Verletzungen. Whitesides [52] entwickelte als Erster eine Klassifikation auf der Grundlage eines *Zweisäulenkonzeptes*. Hierbei sollte die vordere, aus Wirbelkörpern bestehende Säule einer Druckbeanspruchung, die hintere, aus Pedikeln, Fortsätzen und dorsalem Bandapparat bestehende Säule Zugkräften ausgesetzt sein. Auch die Einteilung von Magerl et al. [33] basiert auf dieser Einteilung. Denis [10] dagegen formulierte ein *Dreisäulenkonzept*. Er hielt den hinteren Teil der vorderen Säule für eine ausschlaggebende Struktur der Flexionsstabilität und definierte ihn als „mittlere Säule“. Mechanische Instabilität entstehe demnach nur bei gleichzeitiger Verletzung von dorsalem Ligamentkomplex und „mittlerer Säule“. James et al. [25] stellten jedoch die Bedeutung der „mittleren Säule“ für die Stabilität der Wirbelsäule in Frage. Eine Zerstörung der „mittleren Säule“ führte demnach nicht zu einem signifikanten Zuwachs der Instabilität. Bei Berstungsfrakturen im vorderen Segment sowie bei

Verletzungen des dorsalen Bandapparates kam es jedoch zu einer vermehrten Translations- und Flexionsinstabilität im Bewegungssegment. Die Autoren schlugen daher vor, die „mittlere Säule“ bei der Klassifikation zu vernachlässigen. Sie teilten komplette Berstungsfrakturen in stabile (ohne Zerreißung des dorsalen Bandapparates) und instabile Brüche ein. Die *Sulenkonzepte* lassen es trotzdem nicht zu, die vielfältigen Verletzungen der Wirbelsäule zu erfassen. Die Klassifikation nach Magerl et al. [33] kommt der Forderung nach einfachem und eindeutigen Erkennen von Unterscheidungskriterien mit einfachen röntgenologischen und klinischen Mitteln am nächsten.

3.2 Klassifikation nach Magerl

Bei der Einteilung nach Magerl werden drei Verletzungstypen, A, B und C, unterschieden, die durch Kompressions-, Distraktions- und Rotationskräfte entstanden sind. Für die Einteilung in diese „Typen“ kann schon ein konventionelles Röntgenbild sowie die klinische Untersuchung ausreichen. Für eine weitere Einteilung in „Gruppen“ und „Untergruppen“ wird die Diagnostik der Computertomographie benötigt. Besonders Übergangsformen zwischen Typ-A- und Typ-B-Verletzungen können jedoch oftmals nicht ohne weiteres mit konventionellem Röntgen klassifiziert werden. Hierbei kann erst eine Magnetresonanztomographie-Untersuchung oder ein intraoperativer Befund eine endgültige Zuordnung der Verletzung erbringen. Das größte Problem stellt hierbei die Beurteilung des dorsalen Ligamentkomplexes dar, dessen Status für die Einteilung in „Typen“ und „Gruppen“ essenziell ist [51]. Eine Ruptur kann klinisch unauffällig sein. Konventionelles Röntgen sowie die Computertomographie können ebenso keine Klarheit verschaffen.

Auch die neurologische Komponente ist bei dieser Klassifikation berücksichtigt. Magerl et al. konnten einen Zusammenhang zwischen Zunahme neurologischer Defizite und zunehmender Verletzungsschwere sowohl von A nach C als auch innerhalb der einzelnen „Typen“ nachweisen [33].

3.2.1 Typ-A-Verletzungen

Typ-A-Verletzungen (Tab. 1) entstehen durch eine axiale Kompression, so dass die Höhe des Wirbelkörpers vermindert ist. Entscheidend hierbei ist die Verletzung der vorderen Säule, also des Wirbelkörpers, dorsale Strukturen sind dagegen nicht mit betroffen.

Impaktionsbrüche (A1) (Abb. 4) gehören zu den stabilen Verletzungen. Sie sind durch Kompression der Wirbelkörperspongiosa entstanden. Bei dieser Verletzungsgruppe werden Deckplattenimpression, Keilbrüche und Wirbelkörperimpaktion unterschieden.

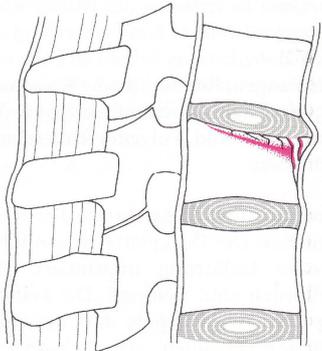


Abb. 4 Impaktionsbrüche (A1). Aus [51]

Die Deckplattenimpression (A1.1) ist die leichteste Form eines Wirbelkörperbruchs. Die kraniale Deckplatte ist entweder keilförmig oder sanduhrförmig imprimiert. Hierbei sind die Übergänge zum Keilbruch fließend. Der dorsale Ligamentkomplex ist nicht betroffen. Deckplattenimpressionen kommen häufig bei jungen Patienten und Serienverletzungen vor.

Beim Keilbruch (A1.2) ist die Deckplatte ebenfalls keilförmig deformiert, im Gegensatz zur Deckplattenimpression jedoch um mehr als 7°. Diese Verletzung ist auch stabil und kommt als Begleitfraktur sowie in Serie vor. Man unterscheidet zwischen kranialen, seitlichen und kaudalen Keilbrüchen.

Die Wirbelkörperimpaktionsbrüche (A1.3) sind eine typische Bruchform bei osteoporotischen Knochen. Sie zeichnen sich aus durch eine uhrglasförmige Eindellung der beiden Endplatten („Fischwirbelform“). Eine

A 1 Impaktionsbrüche	A 1.1 Deckplattenimpression A 1.2 Keilbruch 1 kranialer Keilbruch 2 seitlicher Keilbruch 3 kaudaler Keilbruch A 1.3 Wirbelkörperimpaktion
A 2 Spaltbrüche	A 2.1 Sagittaler Spaltbruch A 2.2 Frontaler Spaltbruch A 2.3 Kneifzangenbruch
A 3 Berstungsbrüche	A 3.1 Inkompletter Berstungsbruch 1 kranialer inkompletter Berstungsbruch 2 seitlicher inkompletter Berstungsbruch 3 kaudaler inkompletter Berstungsbruch A 3.2 Berstungsspaltbruch 1 kranialer Berstungsspaltbruch 2 seitlicher Berstungsspaltbruch 3 kaudaler Berstungsspaltbruch A 3.3 Kompletter Berstungsbruch 1 Kneifzangenberstungsbruch 2 kompletter Flexionsberstungsbruch 3 kompletter axialer Berstungsbruch

Tab. 1 Einteilung der Typ-A-Verletzungen nach Magerl et al. [33]

Vorwölbung der Wirbelkörperhinterwand nach dorsal liegt jedoch in der Regel nicht vor. Die Wirbelkörperhöhe ist vermindert, wobei sich die Spongiosa zentral verdichtet.

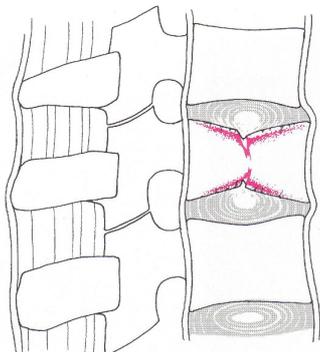


Abb. 5 Spaltbrüche (A2). Aus [51]

Spaltbrüche (A2) (Abb. 5) sind durch eine Spaltung des Wirbelkörpers charakterisiert. Neurologische Komplikationen treten bei dieser Gruppe jedoch sehr selten auf.

Die Fragmente können unterschiedlich disloziert sein, so dass die Verletzungen dann oft zur Pseudarthrosenbildung neigen, wenn die Fragmente nicht mehr nahe genug beieinander liegen. Abnorme Beweglichkeiten sowie Belastungsschmerzen können dann die Folge sein.

Sagittale Spaltbrüche (A2.1) kommen im Bereich der Brust- und Lendenwirbelsäule selten vor. Meist sind sie im cervicalen Bereich anzutreffen.

Frontale Spaltbrüche (A2.2) können als stabile Frakturen angesehen werden und sind durch eine Spaltung des Wirbelkörpers in koronarer Ebene charakterisiert. Die Hinterwand des Wirbelkörpers sowie die dorsale Säule sind unverletzt. Die Deckplatten können imprimiert sein.

Bei der Kneifzangenfraktur (A2.3) findet man eine Zertrümmerung des zentralen Spongiosateils des Wirbelkörpers. Das angrenzende Gewebe der Bandscheibe kann sich dann in diese Zone verschieben. Kneifzangenfrakturen sind allerdings gegen eine axiale Kompression sowie gegen eine Flexionskompression als instabil anzusehen. Sie sind häufig im Bereich der unteren Lendenwirbelsäule zu finden, verursachen jedoch nur sehr selten neurologische Komplikationen.

Bei den Berstungsbrüchen (A3) (Abb. 6) ist der Wirbelkörper teilweise oder vollständig zertrümmert. Fragmente sind dabei disloziert oder ausgesprengt. Neurologische Komplikationen entstehen dabei häufig durch eine Einengung des Spinalkanals durch ein Hinterkantenfragment. Sie nehmen dabei von Untergruppe zu Untergruppe sprunghaft zu.

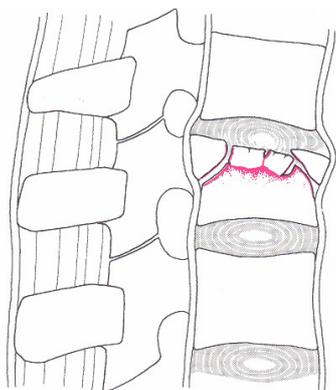


Abb. 6 Berstungsbruch (A3). Aus [51]

Berstungsbrüche (A3) sind durch folgende Merkmale charakterisiert:

- ein **Hinterkantenfragment** ist von der dorsalen, kranialen Ecke des Wirbelkörpers ausgesprengt und nach dorsal in Richtung Spinalkanal verlagert
- **Spaltung der Lamina oder des Dornfortsatzes in Längsrichtung**
- **Bandscheibenverletzung**
- **intakter dorsaler Bandapparat**

Beim inkompletten Berstungsbruch (A3.1) kann der obere oder der untere Anteil des Wirbelkörpers mit der angrenzenden Bandscheibe verletzt sein. Weiterhin unterscheidet man zwischen kranialen, seitlichen und kaudalen inkompletten Berstungsbrüchen. Magerl u. Engelhardt beschreiben die inkompletten Berstungsbrüche in Bezug auf eine axiale Druckbeanspruchung mit und ohne Flexion als instabil, da sich bei dieser Verletzung ein Hinterkantenfragment nach dorsal in den Spinalkanal vorschieben könnte [34].

Inkomplette Berstungsspaltbrüche (A3.2) sind am häufigsten bei Frakturen des thorakolumbalen Übergangs anzutreffen. Wie bei den A3.1-Verletzungen werden kraniale, seitliche und kaudale Berstungsspaltbrüche unterschieden. Im Bereich der dorsalen knöchernen Elemente findet man eine längs verlaufende Fraktur, die meist unverschoben ist. Eine Verletzung der Bandscheibe liegt ebenfalls vor. Lindahl et al. [32] beschrieb diese Frakturform als „crush cleavage fracture“.

Komplette Berstungsbrüche (A3.3) werden in Kneifzangenberstungsbruch, kompletten Flexionsberstungsbruch und kompletten axialen Berstungsbruch unterschieden. Kneifzangenberstungsfrakturen haben zusätzlich zur normalen Kneifzangenfraktur ein ausgesprengtes Hinterkantenfragment. Komplette Flexionsberstungsbrüche weisen eine starke kyphotische Abknickung auf. Im Gegensatz hierzu sind axiale Berstungsbrüche symmetrisch imprimiert.

Ansichten über die Stabilität oder Instabilität von kompletten Berstungsfrakturen (A3.3) werden kontrovers diskutiert. Magerl u. Engelhardt [34] sowie Tscherne et al. [51] sind der Meinung, dass A3-Verletzungen grundsätzlich als instabil gegen axiale Druckbeanspruchung und Flexionskompression anzusehen sind.

3.2.2 Typ-B-Verletzungen

B-Verletzungen (Tab. 2) werden unter dem Begriff der Distraktionsverletzungen zusammengefasst. Hierbei zerreißt die vordere und/oder hintere Säule quer. Bei den Flexions-Distraktions-Verletzungen (Typ B1 und Typ B2) können die Wirbelkörper oder die Bandscheiben zerreißen oder wie bei den Typ-A-Verletzungen komprimiert sein. Neurologische Defizite im Sinne einer Schädigung von Rückenmark oder Nervenwurzeln können durch ausgesprengte Fragmente oder durch sagittale Translation bedingt sein. Gegen eine Flexionsbeanspruchung sind Flexions-Distraktions-Verletzungen immer als instabil einzustufen.

<p>B 1 Dorsale, überwiegend ligamentäre Zerreißung (Flexionsdistraktion)</p>	<p>B 1.1 Mit querer Zerreißung der Bandscheibe</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Flexionssubluxation 2 vordere Luxation 3 Flexionssubluxation oder vordere Luxation mit Fraktur der Gelenkfortsätze <p>B 1.2 Mit Fraktur des Wirbelkörpers vom Typ A</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Flexionssubluxation mit Typ-A-Fraktur 2 vordere Luxation mit Typ-A-Fraktur 3 Flexionssubluxation oder vordere Luxation mit Fraktur der Gelenkfortsätze und Typ-A-Fraktur
<p>B 2 Dorsale, überwiegend ossäre Zerreißung (Flexionsdistraktion)</p>	<p>B 2.1 Horizontale Zerreißung des Wirbels („quere Zweisäulenverletzung“)</p> <p>B 2.2 Mit querer Zerreißung der Bandscheibe</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Zerreißung durch Pedikel und Bandscheibe 2 Zerreißung durch die Pars interarticularis und die Bandscheibe (Flexionsspondylolyse) <p>B 2.3 Mit Typ-A-Wirbelkörperfraktur</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Fraktur durch die Pedikel + Typ-A-Fraktur 2 Fraktur durch die Pars interarticularis + Typ-A-Fraktur (Flexionsspondylolyse)
<p>B 3 ventrale Zerreißung durch die Bandscheibe (Hyperextensionsscherverletzung)</p>	<p>B 3.1 Hyperextensionssubluxation</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 ohne Verletzung der hinteren Säule 2 mit Verletzung der hinteren Säule <p>B 3.2 Hyperextensionsspondylolyse</p> <p>B 3.3 Hintere Luxation</p>

Tab. 2 Einteilung der Typ-B-Verletzungen nach Magerl et al. [33]

Zusätzlich kann eine Instabilität gegenüber axialer Kompression auftreten. Dies ist bei einer entsprechenden Zerstörung des Wirbelkörpers der Fall.

Ligamentäre Flexions-Distraktions-Verletzungen (B1) (Abb. 7) entstehen durch eine Ruptur des dorsalen Bandapparates mit folgender Diastase der Dornfortsätze. Ebenfalls kann es zu symmetrischen Frakturen der Gelenkfortsätze kommen. Die Gelenke können dann subluxiert, luxiert oder im Sinne einer Luxationsfraktur verletzt sein. Die vordere Säule kann im Bereich des Discus aufreißen (B1.1-Verletzung) oder wie bei einer Typ-A-Fraktur (B1.2-Verletzung) brechen.

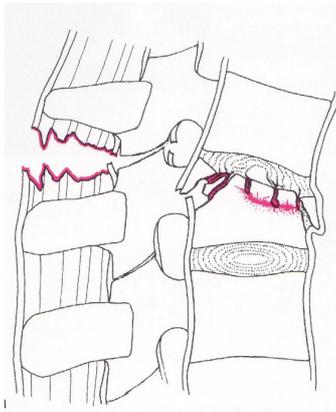


Abb. 7 Ligamentäre Flexions-Distraktions-Verletzung (B1). Aus [51]

Flexionssubluxationen (B1.1.1) stellen sich als reine diskoligamentäre Verletzungen dar. Der dorsale Ligamentkomplex sowie der hintere Anteil der Bandscheibe sind zerrissen. Gegenüber Flexionsbeanspruchung ist die Verletzung als instabil einzustufen.

Bei der vorderen Luxation (B1.1.2) sind die Gelenke reitend oder verhakt luxiert. Das Ligamentum longitudinale anterius kann dabei vom Wirbelkörper gelöst sein. Diese Verletzung ist gegen eine Abscherung instabil.

Flexionssubluxationen oder vordere Luxationen mit Fraktur der Gelenkfortsätze (B1.1.3) sind zusätzlich in sagittaler und seitlicher Richtung instabil.

Bei Flexionssubluxationen mit Typ-A-Fraktur (B1.2.1) findet man neben den Impaktions-, Spalt- oder Berstungsbrüchen eine zusätzliche Zerreißung des dorsalen Bandapparates. Hierbei muss die Art der

Wirbelkörperfraktur getrennt angegeben werden. Die ligamentäre „B-Komponente“ einer Typ-A-Fraktur kann bei der Diagnostik leicht übersehen werden. Sie ist jedoch für die Prognose sowie die Therapie des Patienten entscheidend. Die Instabilität gegenüber einer Flexion ist bei diesem Verletzungstyp wesentlich größer als bei einer rein ossären Verletzung.

Vordere Luxationen mit einer Typ-A-Fraktur (B1.2.2) sind sehr selten. Meist ist der Wirbelkörper hierbei keilförmig imprimiert.

Flexionssubluxationen mit einem Abbruch der Gelenkfortsätze und zusätzlicher Typ-A-Fraktur (B1.2.3) treten meist im Zusammenhang mit einem Berstungsbruch der Wirbelkörper auf [33]. Diese Verletzung ist als sehr instabil zu betrachten und oft mit neurologischen Defiziten kombiniert.

Bei den ossären Distraktionsverletzungen (B2) (Abb. 8) ist die hintere Säule durch den Wirbelbogen zerrissen. Diese Verletzungen entstehen häufig bei Verkehrsunfällen von Personenkraftwagen mit Beckengurt. Die Patienten klappen dabei um den Gurt als Drehachse wie ein Taschenmesser nach vorne, so dass die Wirbelsäule dorsal aufreißt und der Wirbelbogen gespalten wird [7].

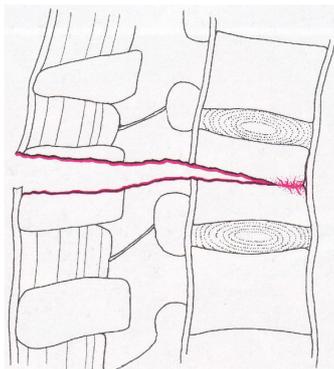


Abb. 8 Knöcherner Distraktionsverletzung (B2). Aus [51]

Bei einer horizontalen Zerreißung des Wirbels (B2.1) findet man eine Fraktur quer durch die Pedikel und die Lamina, die bis in den Wirbelkörper hineinzieht. Vor dem Drehpunkt kann es dabei zu einer keilförmigen Deformierung des Wirbelkörpers kommen. Dorsal der Flexions-/

Extensionsachse wirken dagegen Zugkräfte. Bei der „queren Zweisäulenverletzung“ (B2.1) liegt die Drehachse auf der Wirbelkörpervorderkante, so dass es zu einem vollständigen Aufklappen des Wirbelkörpers kommt.

Bei ossären Distraktionsverletzungen mit Zerreißung der Bandscheibe (B2.2) sind oft Vorderkantenfragmente des kranialen Wirbelkörpers mit ausgerissen. Bei einer Flexionsbeanspruchung gilt diese Verletzung als sehr instabil.

Wie die ligamentären Flexions-Distraktions-Verletzungen (B1) können auch die knöchernen Distraktionsverletzungen mit einer Typ-A-Fraktur einhergehen (B2.3).

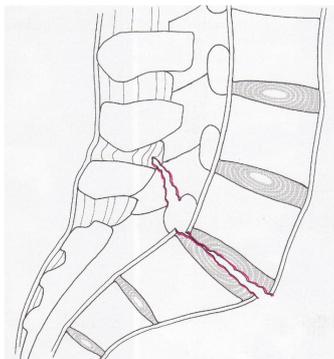


Abb. 9 Hyperextensionsscherverletzung (B3). Aus [51]

Bei den Hyperextensionsscherverletzungen (B3) (Abb. 9) findet man einen umgekehrten Unfallmechanismus, bei dem die Bandscheibe von ventral nach dorsal zerreißt. Auch die hintere Säule kann bei dieser Art der Verletzung betroffen sein. Hier finden sich dann Abrisse der Gelenkfortsätze oder Frakturen der Pedikel. Diese Verletzungen sind nach dorsal gegen Extension und Abscherung instabil.

Hyperextensionssubluxationen (B3.1) können mit Gelenkfortsatzfrakturen oder Frakturen der Bogenwurzel kombiniert sein. Die Bandscheibe sowie das Ligamentum longitudinale anterius et posterius können zerrissen sein. Der dorsale Ligamentkomplex ist aber in jedem Fall intakt. Hyperextensionssubluxationen betreffen im Gegensatz zu den anderen Hyperextensionsscherverletzungen nur die vordere Säule.

Die Hyperextensionsspondylolyse (B3.2) tritt nur sehr selten, meistens an der unteren LWS auf [33].

Die hintere Luxation (B3.3) ist mit einer Abscherung des Myelons und der Spinalwurzeln verbunden und geht deshalb meistens mit einer kompletten Paraplegie einher. Sowohl die vordere als auch die hintere Säule sind ligamentär komplett rupturiert.

3.2.3 Typ-C-Verletzungen

Obwohl Rotationsverletzungen in dieser Studie keine Rolle spielen, soll der Vollständigkeit halber kurz auf sie eingegangen werden.

C 1 Typ-A-Verletzungen mit Rotation	C 1.1 Rotationskeilbruch C 1.2 Rotationsspaltbruch 1 sagittaler Rotationsspaltbruch 2 frontaler Rotationsspaltbruch 3 Rotationskneifzangenbruch 4 Wirbelkörperseparation C 1.3 Rotationsberstungsbruch 1 inkompletter Rotationsberstungsbruch 2 Rotationsberstungsspaltbruch 3 kompletter Rotationsberstungsbruch
C 2 Typ-B-Verletzungen mit Rotation	C 2.1 Typ B1 mit Rotation 1 Rotationsflexionssubluxation 2 Rotationsflexionssubluxation mit einseitigem Gelenkfortsatzbruch 3 einseitige Luxation 4 vordere Rotationsluxation ohne/mit Gelenkfortsatzbruch 5 vordere Rotationssubluxation ohne/mit einseitigem Gelenkfortsatzbruch mit Typ-A-Wirbelkörperbruch 6 einseitige Luxation mit Typ-A-Wirbelkörperbruch 7 vordere Rotationsluxation ohne/mit Gelenkfortsatzbruch mit Typ-A-Wirbelkörperbruch C 2.2 Typ B2 mit Rotation 1 horizontale Zerreißung des Wirbelkörpers mit Rotation 2 einseitige Rotationsflexionsspondylolyse mit Zerreißung der Bandscheibe 3 einseitige Rotationsflexionsspondylolyse mit Typ-A-Wirbelkörperbruch C 2.3 Typ B3 mit Rotation 1 Hyperextensionssubluxation ohne/mit Fraktur hinterer Wirbelelemente 2 einseitige Hyperextensionsspondylolyse 3 hintere Rotationsluxation
C 3 Rotationsscherbrche	C 3.1 Slicefraktur (Holdsworth) C 3.2 Rotationsschrgbruch

Tab. 3 Einteilung der Typ-C-Verletzungen nach Magerl et al. [33]

Typ-C-Verletzungen (Tab. 3) zählen zu den instabilsten Läsionen der Brust- und Lendenwirbelsäule mit dem höchsten Anteil an neurologischen Defiziten und Komplikationen. Die Läsionen, dessen ätiologisches

Merkmal der Rotationsmechanismus ist, zeigen sich in der Zerreißung aller längsverlaufenden Bänder, oft auch der Bandscheibe, Abbrüchen von Querfortsätzen, Luxationen sowie Abscherungen von Kanten des Wirbelkörpers. Es sind immer beide Säulen der Wirbelsäule verletzt.

Typ-A-Verletzungen mit Rotation (C1) sind durch eine Kompression des Wirbelkörpers in Kombination mit einer Rotationskomponente charakterisiert (Abb. 10). Es finden sich Abbrüche von Gelenkfortsätzen, jedoch keine Spaltung der Lamina in Längsrichtung. Des Weiteren lassen sich diese Verletzungen in Rotationskeilbruch (C1.1), Rotationsspaltbruch (C1.2) und Rotationsberstungsbruch (C1.3) unterteilen.

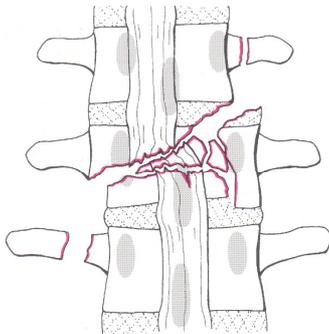


Abb. 10 Typ-A-Verletzung mit Rotation (C1). Aus [51]

Die Aufteilung der Typ-B-Verletzungen mit Rotation (C2) folgt analog zu den Distraktionsverletzungen in Typ B1 mit Rotation, Typ B2 mit Rotation und Typ B3 mit Rotation (Abb. 11).

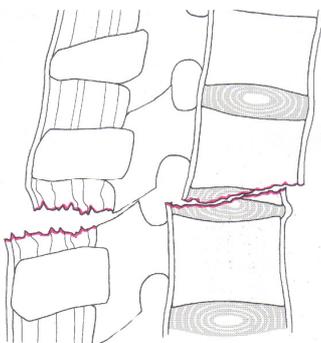


Abb. 11 Typ-B-Verletzung mit Rotation (C2). Aus [51]

Rotationsscherbrüche (C3) sind die wohl instabilsten Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule überhaupt (Abb. 12). Sie werden unterteilt in die von Holdsworth beschriebene Slice-Fraktur (C3.1) und den Rotationsschrägbruch (C3.2). Das Myelon wird dabei häufig durch Translation abgesichert. Auch hier sind die typischen Merkmale einer Rotationsverletzung sichtbar. Unter sämtlichen Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule weisen sie den wohl höchsten Anteil an neurologischen Komplikationen und Defiziten auf.

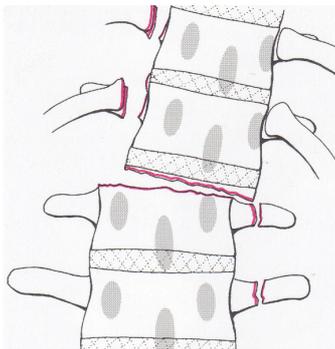


Abb. 12 Rotationsscherbruch (C3). Aus [51]

4. Diagnose

4.1 Klinische und röntgenologische Merkmale von Typ-A- und Typ-B-Verletzungen

4.1.1 Typ-A-Verletzungen

Im Gegensatz zu den stabilen Kompressionsfrakturen gehen die instabilen Kompressionsbrüche mit erheblichen Schmerzen einher. Bei der klinischen Untersuchung lässt sich eventuell eine Gibbusbildung im Bereich der Dornfortsätze feststellen, eine Schwellung findet man aufgrund des intakten Bandapparates jedoch nicht. Druckdolenz und Klopfschmerz sind ebenfalls festzustellen. Insgesamt können diese klinischen Merkmale jedoch lediglich als unsichere Zeichen einer Typ-A-Verletzung gedeutet werden.

Bei der röntgenologischen Untersuchung lässt sich in der seitlichen Aufnahme meist eine leichte kyphotische Abknickung der Wirbelsäulenachse feststellen. Ein Höhenverlust der Wirbelkörper sowie ein eventuell nach dorsal verlagertes Hinterkantenfragment sind ebenfalls sichtbar. Durch die Impression kann auch der senkrechte Abstand der Bogenwurzeln verkürzt sein. Die Lamina ist meist längs gespalten. Insgesamt ist die Wirbelsäulenachse in der a.-p.-Aufnahme aber nicht wesentlich verschoben.

4.1.2 Typ-B-Verletzungen

Bei den Typ-B-Verletzungen ist der dorsale Ligamentkomplex zerrissen. Da auch Teile der Fascia thoracolumbalis in den hinteren Bandapparat mit einstrahlen, kann es ebenso zu einer Zerreißung dieser Strukturen kommen. Außerdem können auch Teile des M. erector trunci rupturiert sein.

Durch den Flexionsmechanismus bei den Typ-B-Verletzungen sind die kyphotischen Abknickungen meist stärker ausgeprägt als bei den Typ-A-Verletzungen. Schwellung, Hämatom sowie Druckdolenz können als indirekte Zeichen einer Bandruptur gesehen werden. Ebenso lässt sich aufgrund des rupturierten Ligamentkomplexes ein vermehrter Abstand zwischen den Dornfortsätzen, eventuell auch eine Diastase palpatorisch feststellen. Bei den Hyperextensionsverletzungen (B3) dagegen kann es zu einer Stufenbildung in der Dornfortsatzreihe kommen. Wie bei den Typ-A-Verletzungen können diese klinischen Merkmale jedoch ebenso als nur sehr unsichere Zeichen einer Distraaktionsverletzung verstanden werden.

Die Wirbelsäulenachse ist im Röntgenbild nur nach ventral (B1 und B2) oder dorsal (B3) verschoben. Eine Seitversetzung ist im a.-p.-Strahlengang meist nicht zu erkennen. In der seitlichen Aufnahme lässt sich jedoch eine starke kyphotische Abknickung diagnostizieren. Wirbelkörper können nach vorne disloziert sein, Vorder- und Hinterkanten können ausgerissen sein. Die Hinterwand des Wirbelkörpers ist dabei durch die Flexionsbewegung der Wirbelsäule teilweise verlängert. Hinterkantenfragmente sind meist nach dorsal und kranial ausgesprengt.

Die Bogenwurzeln, die Laminae sowie die Querfortsätze können auch quere Frakturen aufweisen. Außerdem ist der Abstand zwischen den Dornfortsätzen deutlich vergrößert. Die kleinen Wirbelgelenke können durch die Distraktionsbewegung subluxiert oder luxiert sein. Die Gelenkfortsätze können ebenfalls mit betroffen sein und weisen dann beidseitige Frakturen auf.

Die Unterschiede zwischen einer ligamentären Zerreißung (B1) und einer ossären Zerreißung (B2) lassen sich durch den Verlauf der Frakturlinien verdeutlichen.

Bei den B1-Frakturen findet sich eine Zerreißung durch die Intervertebralgelenke. Die Verletzung geht mit einer Luxation oder Subluxation einher. Allerdings können auch die Gelenkfortsätze mit abgerissen sein.

Bei den B2-Frakturen ist der Wirbelbogen zerrissen. Die Fraktur verläuft dann tiefer und betrifft die Lamina und die Bogenwurzeln.

Letztendlich ist jedoch mit einer rein konventionellen radiologischen Diagnostik eine sichere Differenzierung zwischen Typ-A- und Typ-B-Verletzungen nicht möglich.

4.2 Praktische Anleitung zur Klassifikation von Typ-A- und Typ-B-Verletzungen

Bei der Einteilung der Verletzungen im klinischen Einsatz sollte eine Ordnung in Typen und Gruppen vorgenommen werden.

Zuerst sollte die vordere Säule beurteilt werden. Wenn sich eine Fraktur des Wirbelkörpers feststellen lässt, muss auch die hintere Säule mit Pedikeln, Lamina, Fortsätzen und dorsalem Bandapparat betrachtet und auf mögliche Frakturen oder Zerreißungen untersucht werden. Art und Ausmaß dieser Verletzungen entscheiden dann über eine Einteilung in Typ A, Typ B oder Typ C. Wenn der Wirbelkörper nicht gebrochen und der Diskus nicht gerissen ist, handelt es sich entweder um eine isolierte Fortsatzfraktur oder um eine Hyperextensions-Subluxation (B3.1.1). Bei einer zerrissenen Zwischenwirbelscheibe muss die grobe Einordnung

wiederum über eine Beurteilung der dorsalen Säule vorgenommen werden (Abb. 13).

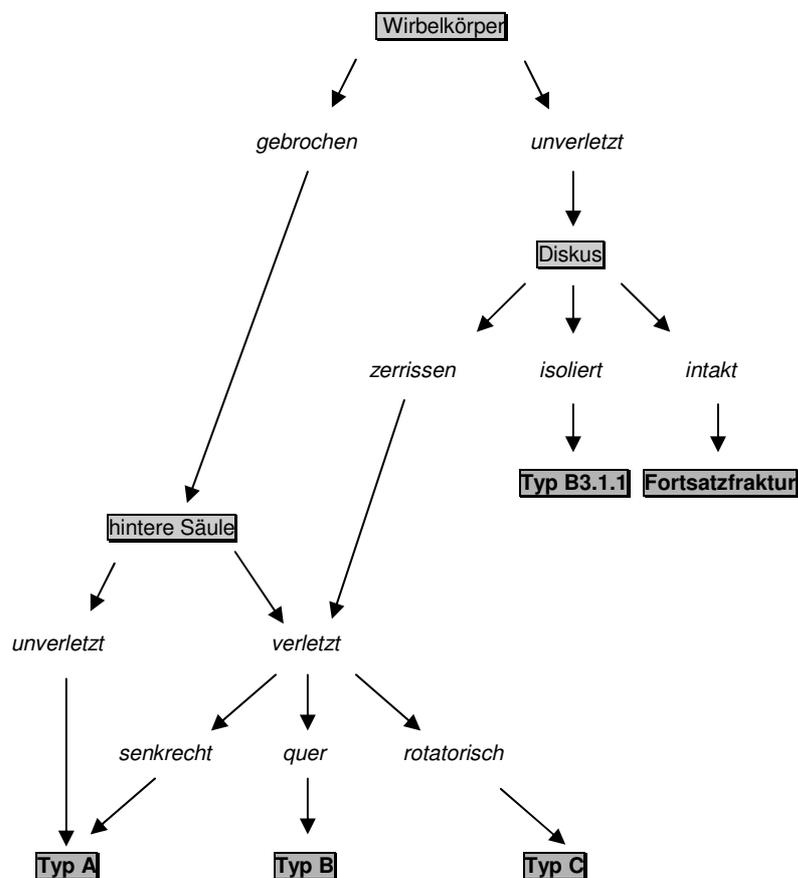


Abb. 13 Fließdiagramm zur groben Einteilung thorakolumbalen Verletzungen. Nach [51]

Ein großes Problem stellt die Abgrenzung der Typ-A-Verletzungen von den Typ-B-Verletzungen dar. Eine korrekte Einordnung der Verletzung ist für die Therapie und die Prognose unerlässlich. Um eine Distraktionsverletzung auszuschließen, muss jedoch oft eine aufwändige zusätzliche Diagnostik durchgeführt werden.

Einige klinische und diagnostische Hinweise können bei der Abgrenzung hilfreich sein. So spricht eine starke lokale Schmerzhaftigkeit eher für eine Distraktionsverletzung. Außerdem zeichnen sich Typ-B-Verletzungen durch eine vermehrte sagittale Knickbildung aus. Eine eindeutige Zuordnung kann letztlich jedoch nur mit Hilfe der MRT-Untersuchung erfolgen. Hierbei kann eine Ligamentruptur sowie ein Hämatom als indirektes Zeichen einer Bandverletzung nachgewiesen werden.

4.3 Klinische Untersuchung

Die klinische Untersuchung kann schon vor Beginn der radiologischen Diagnostik zahlreiche Hinweise sowohl auf die Höhe der Fraktur als auch auf die Art der Verletzung geben.

Wie bereits in Abschnitt A 4.2 beschrieben, kann eine starke lokale Druckdolenz Hinweis einer Flexions-Distraktions-Verletzung sein. Außerdem finden sich oft eine lokale Schwellung und ein Hämatom als indirektes Zeichen einer Bandruptur sowie eine Diastase der Dornfortsätze. Ein vergrößerter Abstand zwischen den Dornfortsätzen kann ebenfalls Ausdruck einer Zerreißung des dorsalen Bandapparates sein. Eine Hyperextensionsverletzung (B3) kann mit einer Stufenbildung in der Dornfortsatzreihe einhergehen. Diese Merkmale gelten jedoch als nur sehr unsichere Zeichen der einzelnen Verletzungen.

Williams et al. [54] beschrieben allgemeine Symptome einer Verletzung der Wirbelsäule. So wiesen 70% der polytraumatisierten Patienten mit einer Wirbelsäulenverletzung einen Muskelhartspann, 30% Prellmarken, 7% eine Stufenbildung in der Dornfortsatzreihe und ebenfalls 7% neurologische Defizite auf.

4.4 Röntgenologische Untersuchungen

4.4.1 Konventionelles Röntgen

Grundlage jeder Diagnostik von Wirbelsäulenverletzungen ist das konventionelle Röntgen im a.-p.- sowie seitlichen Strahlengang.

In der a.-p.-Aufnahme lässt sich insbesondere eine skoliotische Fehlstellung diagnostizieren. Eine Achsenabweichung in der Frontalebene kann ebenfalls beurteilt werden. Erkennbar wird diese durch eine seitliche Versetzung der Dornfortsätze und Wirbelkörper. Auch der Abstand zwischen den Pedikeln sowohl eines Wirbelkörpers als auch benachbarter Wirbelkörper kann verbreitert oder vermindert sein. Ein vergrößerter Abstand ist meist Zeichen einer Fraktur von Wirbelkörper, Pedikel oder Lamina. Im a.-p.-Strahlengang lässt sich insbesondere die hintere Säule

gut beurteilen. Dadurch kann sie als grobes Unterscheidungskriterium für die verschiedenen Verletzungstypen herangezogen werden (Tab. 4).

dorsale Säule	Verletzungstyp
unverletzt	Typ-A-Verletzung
Senkrecht in Längsrichtung gebrochen	Typ-A-Verletzung
quer zerrissen und/oder gebrochen	Typ-B-Verletzung
quer zerrissen und/oder gebrochen mit Rotation	Typ-C-Verletzung

Tab. 4 Unterscheidungsmerkmal „dorsale Säule“. Nach [51]

Im seitlichen Strahlengang dagegen lässt sich die dorsale Hinterkante der Wirbelkörper gut beurteilen. Eine Unterbrechung oder Verlagerung ist meist Hinweis einer Fraktur. Außerdem lässt sich das Ausmaß der Wirbelkörperkompression gut abschätzen. Dabei kann ab einer Verminderung der dorsalen Wirbelkörperhöhe um 15% im Vergleich zu den Nachbarwirbeln von einer Fraktur ausgegangen werden [37]. Ebenso lassen sich ausgesprengte Hinterkantenfragmente feststellen. Eine genaue Beurteilung der dabei entstehenden Spinalkanaleinengung ist jedoch nicht ausreichend durchführbar.

4.4.2 Computertomographie

Die Computertomographie hat bei der Beurteilung von Wirbelsäulenverletzungen einen besonderen Stellenwert.

Der Spinalkanal sowie eine mögliche Einengung lassen sich besonders gut darstellen [29, 36]. Ausgesprengte Fragmente können dabei schon ab einer Größe von 0,6 mm dargestellt werden [53]. Ebenso lassen sich im Gegensatz zum konventionellen Röntgen die Intervertebralgelenke beurteilen. Der Bereich der Brustwirbelsäule ist in konventionellen Röntgenaufnahmen wegen der Überlagerungen durch die Rippen nur unzureichend darstellbar. Auch hier ist die CT in der Darstellung überlegen. Auf konventionellen Aufnahmen häufig übersehene Frakturen der Laminae, der Pedikel und der Gelenkfortsätze lassen sich mit der CT ebenfalls gut erfassen. Auch 3D-Rekonstruktionen können ein wertvolles Hilfsmittel beim Verständnis komplexer Läsionen darstellen.

Obwohl bei fast allen Patienten der Verumgruppe aufgrund einer möglichen Einengung des Spinalkanals eine Computertomographie-Untersuchung durchgeführt wurde, soll die CT im Bezug auf die Diagnostik des dorsalen Bandapparates vernachlässigt werden. Ligamentäre Strukturen lassen sich computertomographisch nicht darstellen.

4.4.3 Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie hat die diagnostischen Möglichkeiten an der Wirbelsäule wesentlich erweitert. Zusätzliche Weichteilverletzungen und vaskuläre Strukturen können dargestellt werden. Ebenso sind Signalverluste bei adipösen Patienten sowie Knochenartefakte auszuschließen. Dennoch ist die CT in der Darstellung von knöchernen Strukturen der MRT durch eine höhere Auflösung überlegen. Außerdem bestehen zahlreiche Kontraindikationen für die MRT-Untersuchung, wie z.B. implantierte Herzschrittmacher. Dazu kommt, dass die Geräte nur sehr selten vorhanden sind und oft kein durchgehender Bereitschaftsdienst verfügbar ist. Außerdem stellt sich eine Untersuchung von polytraumatisierten, beatmeten Patienten als sehr schwierig dar.

Besonders hilfreich ist die MRT bei Fragestellungen zum Myelon und möglichen Schäden bis hin zur Zerreißung des Rückenmarks. Ödeme, Verdrängungen des epiduralen Fettgewebes, epi- oder subdurale Blutungen sowie Einblutungen als mögliche indirekte Zeichen einer Bandruptur können ebenfalls erkannt werden. Außerdem kann die Ausrichtung und Krümmung eines größeren Wirbelsäulenabschnittes bewertet [20] sowie das Verhältnis zwischen knöchernem Wirbelkanal und Rückenmark dargestellt werden [13]. Besonders hilfreich in der Klassifizierung der Verletzungen scheint die Bewertung der ligamentären Strukturen zu sein [15, 17, 20]. Insbesondere der dorsale Bandapparat mit dem Lig. flavum, Lig. interspinale und Lig. supraspinale kann auf mögliche Läsionen untersucht werden.

Terk et al. [50] beschrieben die Magnetresonanztomographie bei der Diagnostik von Verletzungen des posterioren Ligamentkomplexes als

zuverlässiges bildgebendes Verfahren. Bei allen sechs Patienten mit schweren Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule, die alle chirurgisch therapiert worden waren, korrelierten die intraoperativen Befunde des dorsalen Bandapparates mit den Ergebnissen der Magnetresonanztomographieuntersuchung.

Lee et al. [31] untersuchten ebenfalls die Zuverlässigkeit der MRT bei der Diagnostik von Verletzungen des PLC. In einer prospektiven Studie mit 34 Patienten, die alle Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule aufwiesen, wurden die Ergebnisse der Magnetresonanztomographie mit intraoperativen Befunden verglichen. Neben den konventionellen Ebenen wurden auch T₂-gewichtete sagittale STIR-Sequenzen angefertigt. Die Operationen erfolgten über einen posterioren Zugang. Ein Alignment des Lig. supraspinale wurde in der MRT bei 27 Patienten diagnostiziert, intraoperativ war dies bei 28 Personen der Fall. Das Lig. interspinale zeigte in der Magnetresonanztomographie in 30 Fällen eine Ruptur, intraoperativ waren 29 Patienten betroffen. Das Lig. flavum war in der bildgebenden Diagnostik bei neun Patienten verletzt, intraoperativ war bei sieben Patienten tatsächlich eine Läsion festzustellen. Sagittale T₂-gewichtete STIR-Sequenzen in der MRT seien demnach eine Methode mit hoher Sensitivität und Spezifität bei der Diagnostik des PLC.

Auch Haba et al. [21] untersuchten die Genauigkeit der Magnetresonanztomographie in der Darstellung von Läsionen des PLC bei Patienten mit thorakolumbalen Frakturen. Präoperative Befunde der MRT sollten mit den direkten intraoperativen Beobachtungen verglichen werden. Bei 35 Patienten mit Verletzungen der Brust- und/oder Lendenwirbelsäule wurden 17 Berstungsfrakturen, sechs Flexions-Distraktions-Verletzungen und zwölf Dislokationsfrakturen diagnostiziert. Die operativen Befunde wurden alle retrospektiv aus einem Operationsprotokoll erhoben. Bei 65.7 % der Patienten war es dabei zu einer Verletzung des dorsalen Bandapparates gekommen. In 90.5 % dieser Fälle war auch in der MRT ein Alignment des Lig. supraspinale gesehen worden. Eine Diskontinuitätsunterbrechung des Lig. interspinale wurde im bildgebenden Verfahren in 94.3 % der Fälle diagnostiziert. Die Spezifität eines T₁-gewichteten Bildes für die Darstellung des Lig.

supraspinale wurde dabei als signifikant höher eingestuft als die eines T₂-gewichteten Bildes ($p < 0.05$). Der μ -Koeffizient für das Diagnostizieren einer Bandverletzung mit der MRT lag bei 0.803. Der Koeffizient für das Lig. interspinale alleine war dabei signifikant größer (0.915) als für das Lig. supraspinale (0.69) ($p < 0.05$). Haba et al. [21] konnten somit die MRT als bildgebendes Verfahren mit einer hohen diagnostischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit in der Darstellung von Verletzungen des PLC beschreiben.

4.4.4 Operation

Der intraoperative Befund kann bei chirurgisch therapierten Patienten als letzte diagnostische Maßnahme ebenso hinzugezogen werden. Bei dorsalem Zugang können dabei insbesondere die interspinösen ligamentären Strukturen, die Fascia thoracolumbalis, der M. erector trunci sowie Einblutungen in die paravertebrale Muskulatur bewertet werden. Dabei liefert die Operation als diagnostische Maßnahme letztlich die höchste Sensitivität und Spezifität im Vergleich zur Sonographie und MRT. Deshalb soll auch in dieser Studie – zumindest bei den chirurgisch therapierten Patienten – die Operation helfen, die Sensitivität bzw. Spezifität der Sonographie zu bestimmen.

4.4.5 Sonographie

Der Ultraschall als Bestandteil der Diagnostik von Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule soll Thema dieser Studie sein. Durch die sonographische Darstellung des dorsalen Bandapparates sollen ligamentäre Strukturen betrachtet und bewertet werden. Anhand dieser Angaben soll dann eine Einteilung der Fraktur in Kompressions- oder Distractionsverletzung erfolgen.

Moon et al. [39] beschrieben 2002 erstmalig die Sonographie als Bestandteil der Diagnostik von Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule.

Um Normalbefunde des PLC zu erhalten, wurden zwei Personen, die weder eine traumatische noch eine degenerative Vorgeschichte im

Bereich der Wirbelsäule aufwies, sonographisch untersucht. Die sog. Verumgruppe bestand aus zwölf Patienten mit jeweils Frakturen der Brust- und/oder Lendenwirbelsäule. Die Gruppe umfasste vier Flexions-Distraktions-Verletzungen, sechs Berstungsfrakturen und zwei einfache Kompressionsfrakturen. Die Untersuchungen wurden von einem erfahrenen Radiologen über dem verletzten Bereich der Wirbelsäule durchgeführt. Zusätzlich wurden neben dem konventionellen Röntgen MRT-Aufnahmen angefertigt. Außerdem wurden fünf der zwölf Patienten operativ therapiert, wobei in diesen Fällen auch intraoperative Befunde des dorsalen Bandapparates erhoben werden konnten. Schließlich wurden die Ergebnisse der Sonographie, der Magnetresonanztomographie sowie die intraoperativen Befunde miteinander verglichen.

In der Gruppe, die konservativ therapiert worden war, konnte in fünf von sieben Fällen eine Übereinstimmung der Befunde des PLC festgestellt werden. Die Gruppe, die operativ therapiert worden war, zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen sonographischen Befunden, Ergebnissen der Magnetresonanztomographie sowie intraoperativen Resultaten. Besonders das Lig. supraspinale und das Lig. interspinale waren gut darstellbar. Vorhandene Rupturen in diesem Bereich konnten immer mit dem Ultraschall diagnostiziert werden. Dennoch war es nicht möglich, tiefer liegende Strukturen wie das Lig. flavum, tief liegende Muskeln der Wirbelsäule oder Gelenkkapseln der Intervertebralgelenke mit dem Ultraschall darzustellen.

Obwohl die Sonographie gegenüber der MRT eine geringere Empfindlichkeit bei der Diagnostik von Verletzungen des PLC aufwies, beschrieben Moon et al. [39] den Ultraschall als eine akzeptable, kostengünstige und leicht verfügbare Alternative. Werte bezüglich der Sensitivität und Spezifität konnten jedoch nicht angegeben werden.

5. Ziele der Studie

Erstes Ziel unserer Studie war es, die Möglichkeit einer Sonographie des dorsalen Bandapparates der Wirbelsäule zu prüfen. Dabei sollte geklärt

werden, welche Strukturen des PLC sich sonographisch darstellen lassen und welche Anteile nicht einsehbar sind. Außerdem wollten wir versuchen, Normalbefunde von pathologischen Ergebnissen abzugrenzen und Unterschiede zu beschreiben. Schließlich sollte mit Hilfe der Sonographie als bildgebendes Verfahren der Versuch einer Klassifikation der Verletzung nach oben beschriebenem Schema unternommen werden.

Ein weiteres Ziel war es, die Zuverlässigkeit der Sonographie im Vergleich zu den intraoperativen Befunden bzw. der Magnetresonanztomographie, d. h. die Sensitivität und Spezifität zu prüfen.

Außerdem sollte dargestellt werden, wie viele der durch konventionelles Röntgen und Computertomographie diagnostizierten vordergründigen Typ-A-Verletzungen tatsächlich Typ-B-Verletzungen waren. Als Kriterium für eine Flexions-Distraktions-Verletzung galt hierbei eine Läsion des Lig. supraspinale und/oder Lig. interspinale in der Sonographie bzw. intraoperativ. Eine solitäre Einblutung in den Bandapparat war dabei nicht hinreichend.

Weitere Ziele dieser Studie bezogen sich auf die Bestimmung des mittleren Alters der Patienten, der Geschlechterverteilung sowie der Häufigkeiten der verschiedenen Unfallmechanismen und der verschiedenen Symptome. Dabei wollten wir insbesondere die Klinik der Typ-A-Verletzungen mit der Symptomatik der Typ-B-Verletzungen vergleichen. Außerdem sollten die Häufigkeiten der einzelnen frakturierten Wirbelkörper graphisch dargestellt werden. Der Anteil der Typ-A-, Typ-B- und Typ-C-Verletzungen sowie der verschiedenen Gruppen und Untergruppen aller Verletzungstypen, verteilt auf die drei Bereiche der Brust- und Lendenwirbelsäule, sollte ebenfalls betrachtet werden. Bei der radiologischen Diagnostik konnten die Häufigkeiten der verschiedenen Arten der Frakturen, bei der Klassifikation nach Magerl [33] die Häufigkeiten der verschiedenen Typen, Gruppen und Untergruppen bezogen auf die gesamte Brust- und Lendenwirbelsäule berechnet werden. Ferner ließen sich auch die verschiedenen angewandten Therapiemöglichkeiten absolut und verteilt auf Typ-A- und Typ-B-Verletzungen graphisch erfassen.

Schließlich sollte eine tabellarische Übersicht über die durchgeführte Diagnostik bei allen Patienten angefertigt werden. Daraus resultierende Schlussfolgerungen zum diagnostischen Management thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen sollen dann Gegenstand der Diskussion sein.

B. Material und Methoden

1. Untersuchungsprotokoll

Zu Beginn der Untersuchungsreihe wurde der dorsale Bandapparat der Wirbelsäule bei einer Kontrollperson sonographisch betrachtet, um Normalbefunde des PLC darzustellen. Eine traumatische oder degenerative Vorgeschichte im Bereich der gesamten Wirbelsäule konnte bei dieser Person anamnestisch ausgeschlossen werden.

Die Verumgruppe bestand aus 22 Patienten der *Klinik und Poliklinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie*, die in der Zeit von November 2003 bis Juli 2004 untersucht wurden. Voneinander lokal unabhängige Verletzungen im Bereich der Wirbelsäule bei derselben Person wurden einzeln in das Protokoll aufgenommen.

Das Alter der Patienten lag zwischen 16 und 70 Jahren (\bar{x} 43,0 Jahre). Sowohl männliche (n=17) als auch weibliche Probanden (n=8) wurden untersucht.

Einschlusskriterien der Verumgruppe in Bezug auf das Verletzungsmuster waren Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule zwischen dem 1. Brust- und dem 5. Lendenwirbelkörper. Sowohl Einfach- als auch Mehrfachverletzungen in diesem Bereich waren zulässig. Ausschlußkriterien waren dagegen alte oder fehlverheilte Frakturen (> 4 Wochen) sowie osteoporotische Sinterungsfrakturen. Alle Patienten befanden sich in stationärer Behandlung, ambulante Untersuchungen wurden nicht durchgeführt.

Zur Archivierung und Auswertung der Ergebnisse und Befunde dieser prospektiven Studie wurde ein umfangreiches Untersuchungsprotokoll angelegt (Abb. 14). Als Software wurde **SPSS Version 11.5** verwendet. Alle Patienten wurden in zeitlicher Reihenfolge im Bezug auf das Datum der Erstuntersuchung aufgeführt.

Das Protokoll bestand aus fünf Teilbereichen, in denen unterschiedliche Informationen bezüglich der persönlichen Patientendaten, Krankengeschichte, Klinik, diagnostischen Befunde der verschiedenen

Nummer	Name	Vorname	Geburtsd.	Geschlecht	Unfalltag	Unfallm.	Klinik	Wirbelk.	Level	Radiologie
1										
2										

Datum SO	SSL SO	H SSL SO	ISL SO	H ISL SO	LF SO	H LF SO	HÄM SO	H HÄM SO

Datum MR	SSL MR	H SSL MR	ISL MR	H ISL MR	LF MR	H LF MR	HÄM MR	H HÄM MR

Datum OP	SSL OP	H SSL OP	ISL OP	H ISL OP	LF OP	H LF OP	HÄM OP	H HÄM OP

Klassif.	Therapie

Geburtsd. = Geburtsdatum SO = Sonographie SSL = Lig. supraspinale HÄM = Hämatom
 Unfallm. = Unfallmechanismus MR = MRT ISL = Lig. interspinale H = Höhe
 Wirbelk. = Wirbelkörper OP = Operation LF = Lig. flavum Klassif. = Klassifikation

Abb. 14 Untersuchungsprotokoll, Teilbereiche 1-5

Untersuchungen, Klassifikation der Verletzung und Art der Therapie zusammengefasst wurden.

Im ersten Teil des Protokolls wurden die Patienten fortlaufend nach dem Datum der Erstuntersuchung nummeriert (Abb. 15). Danach folgten jeweils Name und Vorname des Patienten. Das Geburtsdatum sowie das Geschlecht wurden ebenso aufgeführt. Als Wertelabels konnten hier „männlich“ (0) und „weiblich“ (1) definiert werden.

Nr	Name	Vorna	Geb	Geschl	Tag	Mech	Klinik	Wirbel	Level	Radio
1										
2										
3										

Nr = Nummer
 Vorna = Vorname
 Geb = Geburtsdatum
 Geschl = Geschlecht
 Tag = Unfalltag
 Mech = Unfallmechanismus
 Wirbel = Wirbelkörper
 Radio = Radiologie

Abb. 15 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 1, allgemeine Patienteninformationen

Für spätere statistische Zusammenhänge wurden auch das Datum des Unfalltages sowie der Unfallmechanismus protokolliert. Hierbei konnten die verschiedenen Merkmalsausprägungen „Sturz aus großer Höhe“ (0), „Verkehrsunfall“ (1), „Verkehrsunfall Fußgänger“ (2), „direkte Gewalteinwirkung“ (3) und „sonstiges“ (4) unterschieden werden. Das Wertelabel „Verkehrsunfall Fußgänger“ (2) umfasste alle Personen, die als Fußgänger von einem Fahrzeug jeglicher Art erfasst und verletzt wurden. Wie auch in Abschnitt A 4.3 beschrieben, wurden alle Patienten klinisch untersucht. Die Merkmalsausprägungen der Aufnahmebefunde konnten wir als „ohne Befund“ (0), „Druckdolenz“ (1), „spontane Beschwerden“ (2), „Diastase der Dornfortsätze“ (3) sowie „neurologische Ausfälle“ (4) definieren. Da die Reihenfolge der Ausprägungen mit dem Schweregrad der Verletzungen korreliert, haben wir beim Auffinden von mehreren Befunden an unterschiedlichen Stellen der Wirbelsäule jeweils nur die höchste Merkmalsausprägung protokolliert. Durch die röntgenologischen Untersuchungen konnten außerdem die frakturierten Wirbelkörper als eine weitere Variable angegeben werden. Hierbei waren Einfachverletzungen, Serienverletzungen sowie von einander räumlich getrennte Frakturen im Bereich von T₁ bis L₅ möglich. Alle frakturierten Wirbelkörper des

Patienten wurden fortlaufend aufgeführt. Wie bereits in Abschnitt A 2.3 formuliert, kann die thorakolumbale Wirbelsäule in drei anatomisch-funktionelle Bereiche unterteilt werden. Deshalb wurden alle Verletzungen jeweils einem dieser drei Level zugeordnet. Die zugehörigen Wertelabels waren „BWK 1-10“ (0), „BWK 11 – LWK 2“ (1) sowie „LWK 3-5“ (2). Verletzungen, die sich über zwei verschiedene Level erstreckten, wurden demjenigen Bereich zugeordnet, in dem der Hauptanteil der Frakturen vorzufinden war. Durch eine weitere Variable im Untersuchungsprotokoll haben wir die Art der Fraktur festgelegt. Sie konnte durch die Wertelabels „Impressionsfraktur“ (0), „Kompressionsfraktur“ (1), „Querfraktur“ (2), „Dorn- oder Querfortsatzfraktur“ (3) sowie „Kantenabsprengung“ (4) kategorisiert werden.

Datum	SSL	Höhe	ISL	Höhe	LF	Höhe	HÄM	Höhe

SSL = Lig. Supraspinale LF = Lig. flavum
 ISL = Lig. interspinale HÄM = Hämatom

Abb. 16 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 2, Sonographiebefunde

Im zweiten Teil des Protokolls wurden alle Angaben zu den sonographischen Befunden zusammengefasst (Abb. 16). Neben dem Datum der Ultraschalluntersuchung haben wir den Status jedes einzelnen Bandes des PLC aller frakturierten Wirbelsegmente bewertet und protokolliert. Dabei wurde der dorsale Bandapparat sowohl kranial als auch kaudal des/der verletzten Wirbelsegments/Wirbelsegmente betrachtet. Das Lig. supraspinale, das Lig. interspinale sowie das Lig. flavum haben wir dabei unabhängig voneinander in ihrer Morphologie bewertet. Als Wertelabels wurden „ohne Befund“ (0), „Ruptur“ (1) sowie „nicht beurteilbar“ (2) für jedes Ligament des PLC definiert. War bei einem Patienten sonographisch eine Bandruptur festgestellt worden, erfolgte zusätzlich eine Angabe der betroffenen Wirbelkörperhöhe. Dabei wurden jeweils die Wirbelsegmente angegeben, zwischen denen das Alignment festzustellen war. Verletzungen sowohl zwischen zwei Segmenten als auch zwischen mehreren Segmenten waren hier möglich. Konnte keine

Läsion im umschriebenen Wirbelsäulenbereich erkannt werden oder war das Ligament in seiner Struktur nicht beurteilbar, wurden keine Angaben zur Wirbelkörperhöhe gemacht.

Außerdem wurde nach einer möglichen Einblutung in den dorsalen Bandapparat gesucht. Die Wertelabels waren hierbei als „ohne Befund“ (0), „Einblutung“ (1) und „nicht beurteilbar“ (2) festgelegt worden. War bei einem Patienten eine Einblutung sonographisch sichtbar, erfolgte analog zu den Bandläsionen die Angabe der Wirbelkörpersegmenthöhe.

Im dritten Abschnitt des Untersuchungsprotokolls wurden die Befunde der MRT-Untersuchung zusammengefasst (Abb. 17). Auch hier wurde das Datum der Untersuchung angegeben. Als weitere Variablen wurden in gleicher Weise wie in Teilbereich 2 das Lig. supraspinale, das Lig. interspinale sowie das Lig. flavum jeweils durch die Wertelabels „ohne Befund“ (0), „Ruptur“ (1) sowie „nicht beurteilbar“ (2) in ihrem Status bewertet. Bei einem Patienten mit einer Bandläsion folgte analog zur Sonographie die Angabe der Wirbelkörperhöhe. Bei anderen Merkmalsausprägungen wurde auf eine Höhenangabe verzichtet. Auch auf den MRT-Aufnahmen wurde nach einer Einblutung in den PLC gesucht. In gleicher Weise wurden bei dieser Variablen die Wertelabels „ohne Befund“ (0), „Einblutung“ (1) und „nicht beurteilbar“ (2) übernommen. War eine Einblutung im dorsalen Bandapparat gesehen worden, musste erneut die Wirbelkörperhöhe mit angegeben werden. In den anderen Fällen war hier keine Angabe erforderlich.

Datum	SSL	Höhe	ISL	Höhe	LF	Höhe	HÄM	Höhe

SSL = Lig. Supraspinale LF = Lig. flavum
 ISL = Lig. interspinale HÄM = Hämatom

Abb. 17 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 3, Magnetresonanztomographiebefunde

Im vierten Abschnitt des Protokolls wurden die Befunde der Operation erfasst (Abb. 18). Neben der Angabe des Operationsdatums wurden in gleicher Weise zu Teilbereich 2 und 3 als Variablen das Lig. supraspinale, das Lig. interspinale und das Lig. flavum durch die Wertelabels „ohne

Befund“ (0), „Ruptur“ (1) sowie „nicht beurteilbar“ (2) sowie eine mögliche Einblutung in den Bandapparat durch die Merkmalsausprägungen „ohne Befund“ (0), „Einblutung“ (1) und „nicht beurteilbar“ (2) bewertet. Bei einer Bandläsion und/oder einer Einblutung musste gleichermaßen die Angabe der Wirbelsegmenthöhe erfolgen.

Datum	SSL	Höhe	ISL	Höhe	LF	Höhe	HÄM	Höhe

SSL = Lig. Supraspinale LF = Lig. flavum
 ISL = Lig. interspinale HÄM = Hämatom

Abb. 18 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 4, Operationsbefunde

Im letzten Teilbereich des Protokolls wurden schließlich Klassifizierungen der Wirbelsäulenverletzungen durchgeführt sowie Angaben zur Art der Therapie gemacht (Abb. 19).

Klassifikation	Therapie

Abb. 19 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 5, Klassifikation und Therapie

Die Klassifikation der Verletzungen erfolgte nach Magerl [33] durch die in Tabelle 5 angegebenen Wertelabels.

Wert	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Wertelabel	A 1.1	A 1.2	A 1.3	A 2.1	A 2.2	A 2.3	A 3.1	A 3.2	A 3.3
Wert	9	10	11	12	13	14	15	16	
Wertelabel	B 1.1	B 1.2	B 2.1	B 2.2	B 2.3	B 3.1	B 3.2	B 3.3	
Wert	17	18	19	20	21	22	23	24	
Wertelabel	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	

Tab. 5 Werte und Wertelabels für die Klassifikation n. Magerl [33], Typ-A-, Typ-B- und Typ-C-Verletzungen

Die letzte Variable umfasste schließlich die Art der Therapie. Die Merkmalsausprägungen wurden in „konservativ“ (0), „dorsale Spondylodese“ (1), „ventrale Spondylodese“ (2) sowie „dorsale und

ventrale Spondylodese“ (3) kategorisiert. Letztere bezeichnete dabei immer ein zweizeitiges Vorgehen.

Patienten, die zwei oder mehrere voneinander lokal unabhängige Frakturen an der thorakolumbalen Wirbelsäule aufwiesen, die durch mindestens ein nicht frakturiertes Wirbelsegment getrennt waren (n=3), wurden jeweils mehrfach in das Protokoll aufgenommen. Zusammenhängende Verletzungen wurden dagegen jeweils einfach gewertet.

In dieser prospektiven klinischen Studie wurden in der Zeit von November 2003 bis Juli 2004 insgesamt 22 Patienten untersucht, von denen drei aufgrund mehrerer, voneinander lokal unabhängiger Verletzungen in verschiedenen Bereichen der thorakolumbalen Wirbelsäule doppelt in das Protokoll aufgenommen werden konnten. Somit konnten 25 Verletzungen bei 17 Männern und 8 Frauen beschrieben werden.

2. Klinische Untersuchung, konventionelles Röntgen

Alle Patienten dieser prospektiven klinischen Studie wurden jeweils vor Beginn der Diagnostik durch Palpation der Wirbelsäule klinisch untersucht. Dabei konnten die Patienten nach folgenden klinischen Symptomen kategorisiert werden:

- Patienten ohne klinische Symptomatik
- Patienten mit Druckdolenz
- Patienten mit spontanen Beschwerden
- Patienten mit Diastase der Dornfortsätze
- Patienten mit neurologischen Ausfällen

Von allen Patienten der Verumgruppe wurden ebenso konventionelle Aufnahmen im a.-p.- sowie seitlichen Strahlengang angefertigt. Dadurch konnte zum einen eine Angabe zur Höhe der Verletzung an der thorakolumbalen Wirbelsäule gemacht werden. Dokumentiert wurden dabei die frakturierten Wirbelkörper. Sowohl Einfach- als auch Mehrfachverletzungen verschiedener, auch nicht direkt benachbarter

Wirbelkörper waren hierbei möglich. Außerdem wurden die Verletzungen einem der drei Bereiche der thorkolumbalen Wirbelsäule zugeordnet. Zum anderen konnten die Wirbelkörperfrakturen nach der Art der Fraktur kategorisiert werden:

- Impressionsfraktur
- Kompressionsfraktur
- Querfraktur
- Dorn- oder Querfortsatzfraktur
- Kantenabsprengung

Kompressionsfrakturen unterschieden sich hierbei von den Impressionsfrakturen durch eine Abnahme der Wirbelkörperhöhe und durch eine Verbreiterung des Quer- oder Tiefendurchmessers.

3. Sonographie

Alle Untersuchungen des dorsalen Bandapparates wurden mit einem **SIEMENS SONOLINE G60 S** Ultraschallgerät durchgeführt (Abb. 20). Die Frequenz der Schallwellen betrug 7.5 MHz. Bei allen Untersuchungen wurde die zweidimensionale B-Mode-Darstellung angewandt. Die Verletzungen wurden dabei mit einem Linearscanner-Schallkopf (Parallels scanner) betrachtet, wie er auch bei der Diagnostik oberflächennaher Prozesse, wie zum Beispiel beim Schilddrüsenschall, verwendet wird (Abb. 21). Das resultierende Bild stellte sich somit rechteckig dar.

Die sonographische Untersuchung sowie die Befundung der Ultraschallbilder wurden in der *Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie* immer von demselben Untersucher (Facharzt für Chirurgie) durchgeführt.

Die Sonographie wurde bei allen Patienten innerhalb der ersten drei Tage des stationären Aufenthaltes durchgeführt. Aufgrund des mobilen Ultraschallgerätes konnten wir alle Patienten im Bett auf den jeweiligen

Stationen untersuchen. Bei der Lagerung und Betreuung der Patienten wurden wir von Pflegekräften unterstützt.

Umlagerungen in Untersuchungsräume waren wegen der Schwere der Verletzung nur selten möglich. Aus diesem Grunde konnte auch die Belastung der Patienten durch die Untersuchung als sehr gering eingestuft werden. Der Zeitaufwand dieser Untersuchung konnte bei jedem Patienten mit jeweils ca. zehn Minuten veranschlagt werden.



Abb. 20 SIEMENS SONOLINE G60 S



Abb. 21 Linearscanner

Die Verumgruppe bestand aus allen beschriebenen Patienten mit Frakturen an der thorakolumbalen Wirbelsäule.

Die Patienten wurden bei der Untersuchung von der Rückenlage in eine Seitenlage oder Seiten-Bauchlage mobilisiert, so dass der Rücken zugänglich war. Die Wirbelsäule sollte dabei möglichst weit inkliniert werden, insofern der Zustand des Patienten dies zuließ.

Zuerst wurde die Wirbelsäule inspiziert. Schwellungen und/oder Grübchen zwischen den Dornfortsätzen gaben dabei erste Hinweise auf ligamentäre

Verletzungen. Teilweise konnten wir durch Palpation einen Schmerz provozieren. Somit waren auch Rückschlüsse auf die richtige Höhe des palperten Wirbelkörpers möglich, da uns die frakturierten Wirbelsegmente durch die radiologische Diagnostik bekannt waren.

Der Schallkopf wurde sowohl in transversaler Schnitfführung (Abb. 22) als auch in Längsschnitfführung bewegt (Abb. 23). In transversaler Ebene musste sich der Scanner dabei jeweils zwischen den Dornfortsätzen befinden, damit die Schallweiterleitung nicht durch die hohen Impedanzunterschiede zwischen Weichteilgewebe und Knochen verhindert wurde.



Abb. 22 transversale Schnitfführung



Abb. 23 Längsschnitfführung

In der longitudinalen Ebene war dies aufgrund der Scannergröße nicht möglich, jedoch auch nicht zwingend notwendig. Allerdings musste hierbei der Schallkopf exakt auf der dorso-ventralen Ebene des Lig. supraspinale bzw. Lig. interspinale positioniert werden, da sonst die Bandverbindungen nicht sichtbar waren.

In beiden Schnitfführungen konnte der Schallkopf dann kontinuierlich von kranial nach kaudal bewegt werden, um sämtliche Bandverbindungen des PLC darzustellen. Auf diese Weise war durch die Bildgebung auch ein Abgrenzen und Abzählen verschiedener Wirbelsegmente möglich.

Die Höhenlokalisierung des Ultraschallkopfes an der Wirbelsäule konnte zum einen durch Tasten der Dornfortsätze, zum anderen durch einen Abgleich mit der konventionellen Bildgebung erfolgen. Außerdem war es möglich, die dorsalen Beckenkämme in Beziehung zum 4. LWK zu setzen.

Die lokalen Schallbereichsgrenzen wurden durch die verletzen Wirbelsegmente festgelegt. Darüber hinaus haben wir dennoch die zwei bis drei kranial bzw. kaudal der Verletzung gelegenen Segmente sonographiert, um weiter reichende Läsionen ebenfalls auszuschließen. Von allen interspinösen Bandverbindungen wurden sowohl in transversaler als auch in longitudinaler Schnittführung Bilder gemacht und mit den jeweiligen Höhenangaben dokumentiert. Digitale Abbildungen waren dabei ebenfalls möglich. Die Befundung der Bilder erfolgte ebenfalls durch den Chirurgen. Ergebnisse der Magnetresonanztomographie-Untersuchung waren – sofern sie zu diesem Zeitpunkt schon vorlagen – ihm nicht mitgeteilt worden. Die Operation erfolgte immer nach der Sonographieuntersuchung, so dass auch diese Ergebnisse dem Untersucher nicht bekannt waren. Der Status jedes einzelnen Bandes bzw. einer möglichen Einblutung wurde schließlich im Untersuchungsprotokoll dokumentiert.

4. Magnetresonanztomographie

Die vergleichende Diagnostik wurde im *Institut für Klinische Radiologie (IKR)* des Universitätsklinikums Münster durchgeführt. Die Patienten wurden mit einem **PHILIPS GYROSCAN INTERA 1.5T** Magnetresonanztomographiegerät (**PHILIPS MEDICAL SYSTEM**, Best, Niederlanden) untersucht. Die Feldstärke betrug 1,5 Tesla.

STIR	sagittal
T ₁ -w	sagittal
T ₂ -w	sagittal, axial

Tab. 6 verwendete Sequenzen und Ebenen in der MRT-Diagnostik

Die verwendeten Sequenzen waren jeweils sagittal T₁- und T₂-gewichtet sowie axial T₂-gewichtet. Eine fettunterdrückende STIR-Aufnahme in sagittaler Ebene (short tau inversion recovery) wurde ebenfalls durchgeführt (Tab. 6).

Die MRT-Untersuchung wurde nur bei einem Teil der Patienten jeweils innerhalb der ersten zwei Tage des stationären Aufenthaltes durchgeführt. Eine MRT-Untersuchung in den oben beschriebenen Ebenen und Sequenzen dauerte durchschnittlich 30 Minuten. Zusätzlich dazu musste noch die Zeit für den Transfer, die Vor- und Nachbereitung der Untersuchung berücksichtigt werden.

Die MRT wurde nur bei den Patienten durchgeführt, bei denen die Befunde und Ergebnisse der Untersuchung auch eine Konsequenz für Therapie und Prognose hatten. Konnte durch andere radiologische Verfahren wie konventionelles Röntgen oder Computertomographie die Therapie bereits festgelegt werden, wurde auf eine Magnetresonanztomographie verzichtet. Dies war beispielsweise bei vielen konservativ therapierten Patienten der Fall. Außerdem wurden einige Patienten notfallmäßig operiert. In diesen Fällen wurde aus zeitlichen Gründen auf diese Untersuchung verzichtet. Ein weiteres Ausschlusskriterium für die MRT waren Patienten mit Herzschrittmachern, Metallteilen wie Skelettprothesen, intrazerebralen Clips, Gefäß-, Gallengangsprothesen oder Metallsplittern sowie einer schweren Klaustrophobie.

Die Befundung der Bilder erfolgte jeweils durch denselben Radiologen des *IKR*. Dabei sollten ebenfalls Angaben zum Status des PLC gemacht und die einzelnen Strukturen in ihrer Morphologie sowie eine mögliche Einblutung nach oben beschriebenem Schema bewertet werden. Angaben aus der sonographischen Untersuchung – sofern diese zum Zeitpunkt der Befundung schon vorlagen – waren ihm vorher nicht bekannt. Bei einer chirurgischen Therapie wurde die Operation ebenso nach der MRT-Untersuchung durchgeführt, so dass auch intraoperative Befunde ihm ebenfalls noch nicht zugänglich waren.

Neben den konventionellen Aufnahmen konnten teilweise auch digitale Bilder angefertigt und archiviert werden.

Abschließend wurden mir die Befunde der MRT mitgeteilt. Der Status der Bänder sowie einer möglichen Einblutung wurde daraufhin im Untersuchungsprotokoll dokumentiert.

5. Operation

Die Operation soll neben der Therapie der Patienten auch dem diagnostischen Verfahren dienen. Dabei haben wir die Operation als Methode mit der höchsten Genauigkeit und Empfindlichkeit bei der Darstellung von Läsionen des dorsalen Bandapparates definiert, da letztlich alle Verletzungen direkt gesehen werden können. Falsch positive oder falsch negative Ergebnisse waren somit ausgeschlossen.

Bei chirurgischer Therapie der Patienten wurde die Operation innerhalb der ersten fünf Tage durchgeführt. Alle Eingriffe wurden in der *Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie* vorgenommen. Neurologische Defizite und Verletzungen, die als instabil einzustufen waren, stellten eine Operationsindikation dar. Richtete sich das Therapiekonzept nach der Klassifikation von Magerl et al. [33], so wurden A2.3-Frakturen und alle A3-Frakturen sowie Typ-B- und Typ-C-Verletzungen operativ therapiert.

Die Eingriffe wurden über einen dorsalen Zugang bei Bauchlagerung des Patienten durchgeführt. Teilweise war auch ein zweizeitiges Vorgehen von ventral und dorsal indiziert.

Nach Hautinzision in der Mittellinie über den Dornfortsätzen und Präparation durch die subkutane Schicht konnte die Fascia thoracolumbalis dargestellt werden. Danach folgte das subperiostale Ablösen der Muskulatur im Bereich der Dornfortsätze. Daraufhin waren die supra- und intraspinalen Bänder einsehbar. Rupturen und Einblutungen konnten ebenso erkannt werden. Eine Orientierungshilfe bei der Höhenlokalisierung war der Fortsatz des vierten Lendenwirbelkörpers auf der Verbindungslinie beider dorsaler Beckenkämme. Sicherer war eine Lokalisation des verletzten Wirbelkörpers mit Hilfe des Bildwandlers.

Als Referenz wurde jeder Operateur angewiesen, bei der dorsalen Spondylodese den Zustand des dorsalen Bandapparates zu dokumentieren. Teilweise war es dabei möglich, digitale Aufnahmen vom intraoperativen Befund anzufertigen. Außerdem sollte eine Klassifizierung der Verletzung nach Magerl et al. [33] vorgenommen werden. Vor der operativen Versorgung wurden die Untersuchungsergebnisse der

Sonographie und Magnetresonanztomographie dem Operateur nicht mitgeteilt.

6. Berechnungen, statistische Methoden

Ein weiteres Ziel war es, die Zuverlässigkeit der Sonographie im Vergleich zu den intraoperativen Befunden bzw. der Magnetresonanztomographie, d. h. die *Sensitivität* und *Spezifität* zu prüfen. Außerdem sollten *positiver* und *negativer prädiktiver Wert* sowie die Wahrscheinlichkeiten für *falsch positive* und *falsch negative Ergebnisse* angegeben werden. Diese bedingten Wahrscheinlichkeiten wollten wir zum einen für das Lig. supraspinale, das Lig. interspinale, das Lig. flavum sowie für eine Einblutung in den Bandapparat getrennt berechnen. Zum anderen sollten entsprechende Angaben auch für die Beurteilung des gesamten PLC gemacht werden. Prinzipiell galt dabei der Vergleich der Sonographie mit den intraoperativen Befunden. Da die Operation jedoch nicht bei allen Patienten durchgeführt wurde, sollte hier die Magnetresonanztomographie die Referenz bilden.

In diesem Teil sollen nur die statistischen Methoden und Berechnungen zur *Sensitivität*, *Spezifität*, *positivem* und *negativem prädiktivem Wert* sowie *falsch positivem* und *falsch negativem Wert* erläutert werden. Alle anderen Ergebnisse der Studie gehen auf rein additive Verfahren der verschiedenen Variablen zurück und bedürfen daher keiner weiteren Erklärung. Hierbei sei auch auf den Ergebnisteil verwiesen.

Alle nachfolgenden statistischen Methoden wurden jeweils für das Lig. supraspinale, das Lig. interspinale, das Lig. flavum sowie für die mögliche Einblutung gesondert angewandt.

Zur Berechnung von *Sensitivität* und *Spezifität* sowie der anderen bedingten Wahrscheinlichkeiten konnten wir zunächst eine Vierfeldertafel erstellen (Abb. 24).

Der Begriff Testergebnis bezog sich dabei auf die Befunde der Sonographie. Positiv war das Ergebnis bei einer Ruptur des jeweiligen Ligaments (1) bzw. bei einer diagnostizierten Einblutung in den Bandapparat. Die Höhe des/der betroffenen Wirbelsegmente/s war dabei

nicht relevant. Konnte kein Alignment (0) bzw. kein Hämatom (0) gesehen werden, so war das Testergebnis negativ. Im Falle einer nicht beurteilbaren Struktur (2) war das Ergebnis nicht zu verwerten. Der Patient wurde dann nicht in der Berechnung berücksichtigt und aus dem Protokoll gestrichen.

Testergebnis <i>T</i>	Wirklichkeit <i>W</i>		Summe
	Positiv	Negativ	
Positiv	[a]	[b]	[c]
Negativ	[d]	[e]	[f]
Summe	[g]	[h]	[i]

Abb. 24 Vierfeldertafel

Alle positiven und negativen Ergebnisse wurden jeweils addiert und die Summen in die Vierfeldertafel aufgenommen (Abb. 24, [c] und [f]).

Der Begriff Wirklichkeit umfasst dagegen die Befunde der Operation bzw. Magnetresonanztomographie. Wie bereits erläutert haben wir dabei zuerst die Ergebnisse der Operation betrachtet. War der Patient konservativ behandelt worden, so wurden die Befunde der MRT mit in die Berechnungen einbezogen.

Positiv war der Befund im Falle einer intraoperativ beschriebenen Ruptur des jeweiligen Ligaments (1) bzw. einer diagnostizierten Einblutung (1). Die Höhe der Verletzung war dabei primär nicht relevant. Konnte keine Kontinuitätsunterbrechung (0) bzw. kein Hämatom (0) gesehen werden, so war das Ergebnis negativ. War eine Struktur intraoperativ nicht einsehbar und damit nicht beurteilbar (2), konnten diese Befunde nicht verwertet werden. Auch allen konservativ behandelten Patienten wurden diese Wertelabel zugeschrieben.

In diesen Fällen wurden dann die Befunde der MRT betrachtet. Positiv war das Ergebnis bei einer Ruptur (1) bzw. bei einem Hämatom (1), negativ dagegen bei erhaltener Kontinuität (0) bzw. bei keiner Einblutung in den Bandapparat (0). War die Morphologie auch in der MRT nicht beurteilbar (2), war das Ergebnis nicht zu verwerten. Der Patient konnte dann in den Berechnungen der Studie nicht berücksichtigt werden.

Alle positiven und negativen Ergebnisse wurden jeweils addiert. Die Summen konnten dann in die Vierfeldertafel übertragen werden (Abb. 24, [g] und [h]).

Die Summen der jeweiligen positiven und negativen Ergebnisse wurden ebenso addiert und entsprachen dann der Anzahl der Patienten in der Verumgruppe (Abb. 24, [i]).

Waren bei einem Patienten sowohl das Testergebnis T als auch die Wirklichkeit W positiv (1), konnte eine Übereinstimmung im Protokoll aufgenommen werden (Abb. 24, [a]). Dabei war die identische Wirbelsegmenthöhe bei beiden Ergebnissen jedoch obligat. Waren Unterschiede in der Höhenlokalisierung der Verletzung festzustellen, war eine Übereinstimmung nicht legitim.

War dagegen der intraoperative Befund bzw. der Befund der MRT negativ (0), so war das Ergebnis als falsch positiv zu bewerten (Abb. 24, [b]).

Waren bei einem Patienten Testergebnis T und Wirklichkeit W negativ (0), konnten wir ebenfalls eine Identität im Protokoll festhalten (Abb. 24, [e]).

Bei einem Patienten mit sonographisch bestätigtem negativen Befund (0) und positiver Wirklichkeit W (1) lag ein falsch negatives Ergebnis vor (Abb. 24, [d]).

Alle Einzelsummen der Testergebnisse T und Wirklichkeiten W ließen sich zur Gesamtzahl aller aufgenommenen Patienten rekonstruieren.

Die *Sensitivität* sollte nun ausdrücken, bei wie vielen Prozent der tatsächlich verletzten Patienten der Ultraschall ebenso eine Läsion bzw. Einblutung feststellen konnte. Die *Spezifität* beschrieb dagegen den Anteil der nicht verletzten Patienten, bei denen in der Sonographie auch kein Alignment bzw. Hämatom nachweisbar war.

Sensitivität und *Spezifität* konnten nun nach folgendem Schema berechnet werden:

$$\text{Sensitivität: } P(T=+ | W=+) = [a] / [g]$$

$$\text{Spezifität: } P(T=- | W=-) = [e] / [h]$$

Ebenso konnte durch den *positiven prädiktiven Wert* die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der ein durch Ultraschall

positiv getesteter Patient intraoperativ auch tatsächlich eine Läsion bzw. Einblutung aufweist. Dagegen beschrieb der *negative prädiktive Wert* die Wahrscheinlichkeit, mit der ein sonographisch negativ getesteter Patient tatsächlich auch keine Kontinuitätsunterbrechung bzw. kein Hämatom aufweist.

Positiver bzw. *negativer prädiktiver Wert* ließen sich folgendermaßen bestimmen:

$$\text{Positiver prädiktiver Wert: } P(W=+ | T=+) = [a] / [c]$$

$$\text{Negativer prädiktiver Wert: } P(W=- | T=-) = [e] / [f]$$

Der *falsch positive Wert* bezeichnete den Anteil aller Patienten, die sonographisch positiv getestet wurden, bei denen jedoch keine Verletzung vorlag. Dagegen veranschaulichte der *falsch negative Wert* den Prozentsatz aller Patienten, bei denen trotz positivem sonographischen Befund intraoperativ keine Kontinuitätsunterbrechung bzw. keine Einblutung nachzuweisen war.

Falsch positiver bzw. *falsch negativer Wert* ließen sich auf folgende Weise berechnen:

$$\text{Falsch positiver Wert: } P(\{W=-\} \cap \{T=+\}) = [b] / [i]$$

$$\text{Falsch negativer Wert: } P(\{W=+\} \cap \{T=-\}) = [d] / [i]$$

Diese sechs bedingten Wahrscheinlichkeiten ließen sich jeweils für alle oben aufgeführten Strukturen errechnen.

Ferner sollten auch für den gesamten PLC Angaben zur Sensitivität, Spezifität, positivem und negativem prädiktivem Wert sowie falsch positivem und falsch negativem Wert gemacht werden. Dazu wurden die Ergebnisse der Vierfeldertafeln aller einzelnen Qualitäten zusammengefasst und entsprechende Berechnungen nochmals durchgeführt.

C. Ergebnisse

1. Normalbefunde und Pathologien

Normalbefunde des PLC konnten durch die Untersuchung der Kontrollperson dargestellt werden.

In der sonographischen Längsschnittführung konnten zum einen die Dornfortsätze als rundlich-ovale Strukturen dargestellt werden (Abb. 25 und Abb. 26, unterer Doppelpfeil). Durch den hohen Impedanzsprung zwischen subkutanem Fettgewebe und Bandapparat einerseits sowie den knöchernen Strukturen andererseits kam es zur Reflexion des Schalls an deren Grenzfläche. Somit kam der Processus spinosus als Schallschatten zur Darstellung. Nur an der dorsalen Grenzfläche zum Weichteilgewebe war eine echoreiche Demarkation durch die Schallwellenreflexion erkennbar.

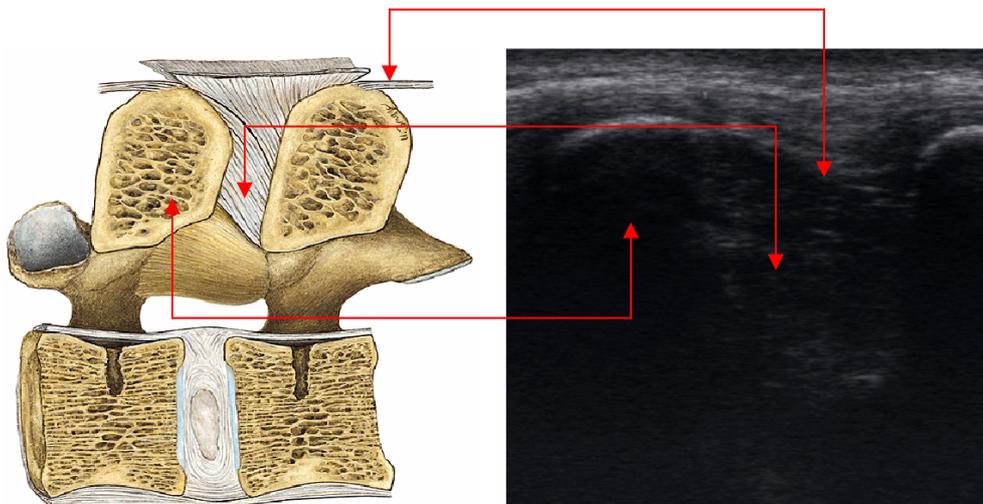


Abb. 25 *Lumbales Bewegungssegment, Schema, Medianschnitt. Aus [45]*

Abb. 26 *Dorsaler Bandapparat, Sonographie, Längsschnittführung*

Das Lig. supraspinale konnte zwischen diesen echoreichen Abgrenzungen als echoarme bis isoechogene kontinuierliche Linie dargestellt werden (Abb. 25 und Abb. 26, oberer Doppelpfeil).

Ventral dieses Bandes zeigte sich das Lig. interspinale als breite, kontinuierliche hypoechogene, teilweise inhomogene Struktur zwischen den benachbarten Dornfortsätzen (Abb. 25 und Abb. 26, mittlerer

Doppelpfeil). Dabei konnte eine Abnahme der Echogenität mit zunehmender Schalltiefe im Gewebe beobachtet werden.

Aus diesem Grunde war es uns auch nicht möglich, dass Lig. flavum zwischen den Laminae darzustellen. Die Weiterleitung des Ultraschalls war in diesem Bereich limitiert.

In der transversalen Schnitfführung konnten ebenfalls die Dornfortsätze durch eine echoreiche Demarkation zum subkutanen Fettgewebe sowie durch eine dorsale Schallauslöschung abgebildet werden (Abb. 27 und Abb. 28, mittlerer Doppelpfeil).

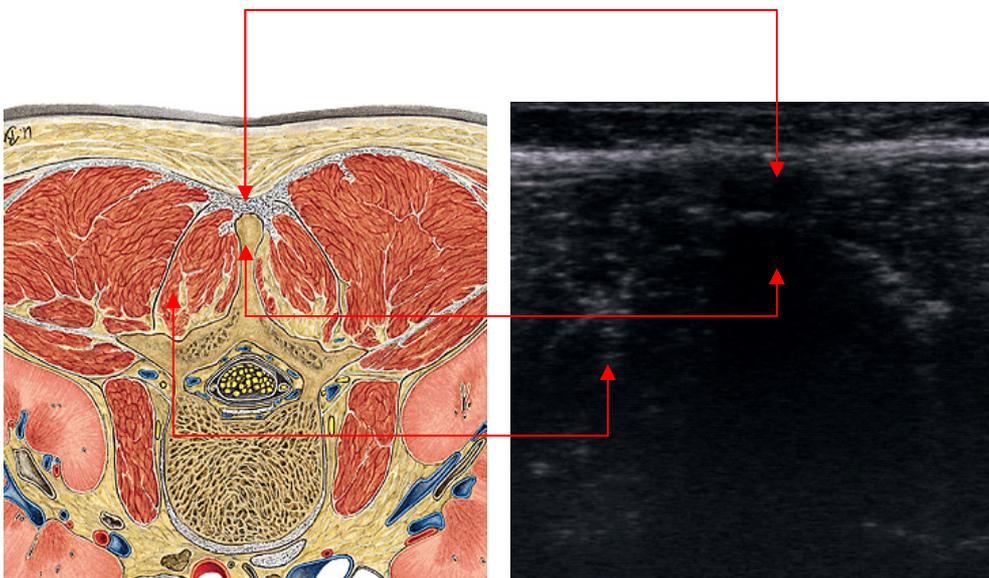


Abb. 27 Querschnitt auf Höhe des 2. Lendenwirbels, Schema, von kaudal. Aus [45]

Abb. 28 Dorsaler Bandapparat, Sonographie, transversale Schnitfführung

Das Lig. supraspinale zeigte sich in dieser Ebene ebenfalls als echoarme bis isoechogene Struktur (Abb. 27 und Abb. 28, oberer Doppelpfeil). Durch die schräge transversale Schnitfführung mit einer Schallrichtung von dorso-kaudal nach ventro-kranial (Abb. 22) kam das Lig. supraspinale im Ultraschallbild noch dorsal des Processus spinosus zur Darstellung (Abb. 28, oberer und mittlerer Doppelpfeil).

Das Lig. interspinale konnte dann zwischen Lig. supraspinale und echoreicher Demarkation des Dornfortsatzes als schmale hypoechogene Struktur abgebildet werden.

Das Lig. flavum war auch in transversaler Schnitfführung durch die starke Abnahme der Echogenität in dieser Gewebetiefe nicht beurteilbar.

Die paravertebrale Muskulatur kam lateral der Dornfortsätze als homogene echoarme bis isoechogene Anordnung zur Darstellung (Abb. 27 und Abb. 28, unterer Doppelpfeil). Bei einer Bewegung des Schallkopfes von proximal nach distal konnte ihre bündelähnliche Formation erkannt werden.

Abgesehen von Läsionen der paravertebralen Muskulatur, die in der transversalen Schnitfführung durch eine inhomogene Anordnung der Muskelfaserbündel bzw. Muskelfasern sowie durch hypoechogene Zonen lateral der Dornfortsätze identifiziert werden konnten, war die Längsschnitfführung in der Darstellung aller anderen Pathologien der transversalen Ebene überlegen.

Rupturen des Lig. supraspinale waren an einer hypoechogenen Kontinuitätsunterbrechung in diesem Bereich erkennbar (Abb. 29). Auch fokale echoarme, zystische Veränderungen in diesem Bereich waren Hinweis auf eine Verletzung. Abbildung 30 zeigt den entsprechenden intraoperativen Befund.

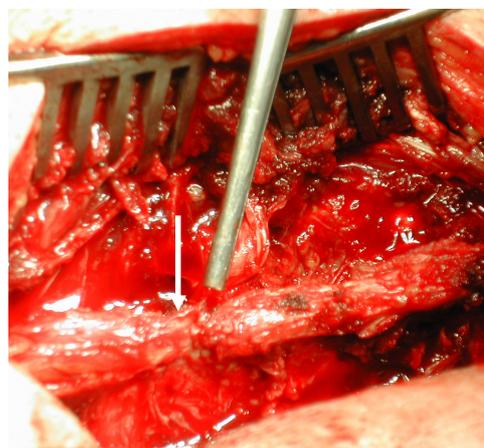


Abb. 29 Ruptur des Lig. supraspinale, Sonographie, Längsschnitfführung

Abb. 30 Ruptur des Lig. supraspinale intraoperativer Befund

Läsionen des Lig. interspinale zeigten ebenso eine inhomogene Anordnung der Faserstrukturen sowie hypoechogene Zonen als Zeichen der Kontinuitätsunterbrechung (Abb. 31).

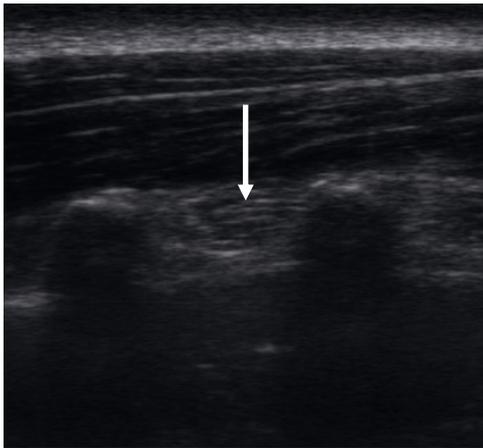


Abb. 31 Ruptur des Lig. interspinale
Sonographie
Längsschnittführung

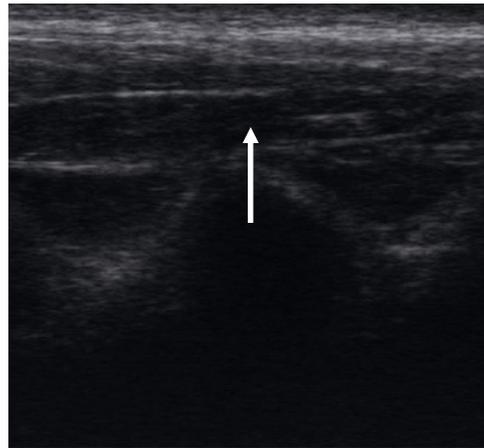


Abb. 32 Hämatom ,
Sonographie,
Längsschnittführung

Hämatome konnten sowohl im Bereich des Lig. supraspinale als auch zwischen den Dornfortsätzen erkannt werden. Echoarme zystische Bereiche, die teilweise umgebende ligamentäre Faserstrukturen nach ventral und/oder dorsal verdrängen konnten, waren dann Ausdruck einer Einblutung in den Bandapparat (Abb. 32).

Als Beispiel für den Abgleich der sonographischen Bildgebung mit der Magnetresonanztomographie zeigt Abbildung 33 eine T₂-gewichtete Aufnahme einer Lendenwirbelsäule im Medianschnitt. Wirbelkörper, Wirbelbögen und dorsaler Bandapparat waren intakt.

Die Darstellung einer ligamentären Kontinuitätsunterbrechung mit frakturiertem Wirbelkörper in der MRT soll anhand von Abbildung 34 erfolgen. Die ebenfalls T₂-gewichtete Sequenz im Medianschnitt zeigt eine Fraktur des achten Brustwirbelkörpers eines 25-jährigen Patienten nach Verkehrsunfall. Neben der ossären Verletzung (Abb. 34, durchgezogener Pfeil) fand man eine dorsale, überwiegend ligamentäre Zerreißung. Der dorsale Bandapparat wies in diesem Bereich eine veränderte Signalintensität auf. Die Ruptur des Lig. supraspinale und Lig. interspinale kam hyperintens zur Darstellung (Abb. 34, gestrichelter Pfeil). Diese Flexions-Distraktions-Verletzung war mit einer Subluxationsstellung der kleinen Wirbelgelenke verbunden. Nach der Klassifikation von Magerl [33] handelte es sich hier um eine B1.2.1-Verletzung.



Abb. 33 Lendenwirbelsäule, MRT, Medianschnitt. Aus [45]



Abb. 34 Fraktur BWK 8, Klassifikation n. Magerl B 1.2.1 MRT, T₂-gewichtete Sequenz Medianschnitt

2. Untersuchungsprotokoll

Die Tabellen 7-11 zeigen das vollständige Untersuchungsprotokoll aller untersuchten Patienten. Wie bereits in Abschnitt B 1 erwähnt, haben wir aus didaktischen Gründen eine Unterteilung in fünf Teilbereiche vorgenommen (Tab. 7-11, Anhang, S. I-III). Vergleiche zwischen den verschiedenen Befunden sollten somit übersichtlicher werden.

Bei allen Patienten wurden insgesamt 43 Wirbelkörperfrakturen diagnostiziert. Serienfrakturen der angrenzenden Segmente waren dabei enthalten. Aus diesem Grunde konnten auch Frakturen der Gruppe A1 in der Übersicht erscheinen.

Sieben Patienten wurden konservativ therapiert, 18 Patienten aufgrund einer Instabilität der Wirbelsäule operativ versorgt. Dabei wurden sowohl dorsale als auch ventrale Stabilisierungsverfahren angewandt.

3. Sensitivität und Spezifität

3.1 Ligamentum supraspinale

Bei sechs Patienten konnte sonographisch eine Ruptur des Lig. supraspinale festgestellt werden. Dabei waren in jeweils zwei Fällen die Segmente BWK 3/4, BWK 11/12 sowie BWK 12 / LWK 1 betroffen. 19 Patienten wiesen im Ultraschall keine Kontinuitätsunterbrechung auf. Eine operative Versorgung wurde dann bei 18 der 25 Patienten durchgeführt. Alle Patienten, bei denen sonographisch Läsionen erkannt worden waren, wurden chirurgisch therapiert, so dass eine bestmögliche Kontrolle der Befunde möglich wurde. Die sieben konservativ therapierten Patienten wurden magnetresonanztomographisch untersucht.

Intraoperativ zeigte sich jedoch nur in fünf Fällen eine Läsion des Lig. supraspinale. Ein Patient mit sonographisch positivem Befund wies tatsächlich keine Verletzung auf.

Alle Patienten, bei denen im Ultraschall keine Kontinuitätsunterbrechung des Lig. supraspinale beschrieben worden war, zeigten auch intraoperativ bzw. in der MRT keine Verletzung (Tab. 7-11).

Somit konnten Sensitivität, Spezifität, positiver und negativer prädiktiver Wert sowie die falsch positiven und falsch negativen Ergebnisse anhand der Vierfeldertafel berechnet werden (Tab. 12).

Testergebnis <i>T</i>	Wirklichkeit <i>W</i>		Summe
	Positiv	Negativ	
Positiv	5	1	6
Negativ	0	19	19
Summe	5	20	25

Tab. 12 Vierfeldertafel, Lig. supraspinale

Da alle Läsionen mit dem Ultraschall erkannt worden waren, konnte die Sensitivität mit 1.0 angegeben werden. Die Spezifität betrug 0.95, da nur

19 der 20 Patienten, die intraoperativ bzw. in der MRT keine Verletzung des Lig. supraspinale aufwiesen, auch im Ultraschall keine Anzeichen für eine Kontinuitätsunterbrechung zeigten.

$$\begin{aligned} \text{Sensitivität: } & P (T=+ | W=+) = 5 / 5 = 1.0 \\ \text{Spezifität: } & P (T=- | W=-) = 19 / 20 = 0.95 \end{aligned}$$

Positiver und negativer prädiktiver Wert konnten mit 0.83 bzw. 1.0 angegeben werden.

$$\begin{aligned} \text{Positiver prädiktiver Wert: } & P (W=+ | T=+) = 5 / 6 = 0.83 \\ \text{Negativer prädiktiver Wert: } & P (W=- | T=-) = 19 / 19 = 1.0 \end{aligned}$$

Bei einem Patienten war sonographisch eine Läsion diagnostiziert worden, die intraoperativ nicht zu sehen war. Der falsch positive Wert betrug somit 0.04. Falsch negative Ergebnisse gab es nicht, wodurch ein falsch negativer Wert von 0 resultierte.

$$\begin{aligned} \text{Falsch positiver Wert: } & P (\{W=-\} \cap \{T=+\}) = 1 / 25 = 0.04 \\ \text{Falsch negativer Wert: } & P (\{W=+\} \cap \{T=-\}) = 0 / 25 = 0 \end{aligned}$$

3.2 Ligamentum interspinale

In der Sonographie konnte bei sieben Patienten eine Ruptur des Lig. interspinale diagnostiziert werden. In jeweils zwei Fällen waren die Bänder zwischen den Segmenten BWK 3/4, BWK 11/12 sowie BWK 12 / LWK 1 verletzt. Diese Zerreißen waren immer mit einer Läsion des Lig. supraspinale verbunden. Eine solitäre Verletzung des Lig. interspinale zwischen BWK 6 und BWK 8 konnte einmal beobachtet werden. 18 Patienten wiesen im Ultraschall keinen pathologischen Befund auf.

Intraoperativ bzw. in der MRT konnte bei sechs der sieben Patienten eine Ruptur des Lig. interspinale bestätigt werden (Tab. 7-11). Bei einem Patienten, der konservativ therapiert worden war, konnte in der Magnetresonanztomographie eine Läsion zwischen den Segmenten BWK

7/8 erfasst werden, die in der Sonographie nicht gesehen worden war (Tab. 7-11). Somit konnten 17 der 18 negativen sonographischen Befunde auch intraoperativ bzw. in der MRT als solche bestätigt werden.

Alle bedingten Wahrscheinlichkeiten konnten wir wieder mit der Vierfeldertafel berechnen (Tab.13).

Testergebnis <i>T</i>	Wirklichkeit <i>W</i>		Summe
	Positiv	Negativ	
Positiv	6	1	7
Negativ	1	17	18
Summe	7	18	25

Tab. 13 Vierfeldertafel, Lig. interspinale

Da sechs der sieben Läsionen in der Sonographie erkannt worden waren, konnten wir eine Sensitivität von 0.86 angeben. Von 18 negativen Befunden konnten sonographisch 17 als solche identifiziert werden. Die Spezifität betrug somit 0.94.

$$\text{Sensitivität: } P (T=+ | W=+) = 6 / 7 = 0.86$$

$$\text{Spezifität: } P (T=- | W=-) = 17 / 18 = 0.94$$

Berechnungen des positiven bzw. negativen prädiktiven Wertes ergaben Werte von 0.86 bzw. 0.94.

$$\text{Positiver prädiktiver Wert: } P (W=+ | T=+) = 6 / 7 = 0.86$$

$$\text{Negativer prädiktiver Wert: } P (W=- | T=-) = 17 / 18 = 0.94$$

Den falsch positiven und falsch negativen Wert konnten wir jeweils mit 0.04 angeben.

$$\text{Falsch positiver Wert: } P (\{W=-\} \cap \{T=+\}) = 1 / 25 = 0.04$$

$$\text{Falsch negativer Wert: } P (\{W=+\} \cap \{T=-\}) = 1 / 25 = 0.04$$

3.3 Hämatom

Sieben der 25 Patienten zeigten im Ultraschall eine Einblutung in den dorsalen Bandapparat. Intraoperativ bzw. in der Magnetresonanztomographie konnten fünf dieser Befunde tatsächlich bestätigt werden. Bei zwei Patienten war dagegen der Befund falsch positiv. Intraoperativ bzw. in der MRT war hierbei kein Hämatom sichtbar. 18 Patienten zeigten in der Sonographie jedoch keinen pathologischen Befund. Intraoperativ bzw. in der Kernspintomographie war dies bei 16 Patienten zu beobachten. In zwei Fällen beschrieben die Operateure eine Einblutung, die im Ultraschall nicht identifiziert worden war (Tab. 7-11). Diese Daten konnten ebenso in die Vierfeldertafel übertragen werden (Tab. 14).

Testergebnis <i>T</i>	Wirklichkeit <i>W</i>		Summe
	Positiv	Negativ	
Positiv	5	2	7
Negativ	2	16	18
Summe	7	18	25

Tab. 14 Vierfeldertafel, Hämatom

Berechnungen der Sensitivität und Spezifität ergaben Werte von 0.71 bzw. 0.89.

$$\text{Sensitivität: } P(T=+ | W=+) = 5 / 7 = 0.71$$

$$\text{Spezifität: } P(T=- | W=-) = 16 / 18 = 0.89$$

Positiver und negativer prädiktiver Wert konnten ebenfalls mit 0.71 bzw. 0.89 angegeben werden.

$$\text{Positiver prädiktiver Wert: } P(W=+ | T=+) = 5 / 7 = 0.71$$

$$\text{Negativer prädiktiver Wert: } P(W=- | T=-) = 16 / 18 = 0.89$$

Da zwei pathologische Befunde intraoperativ bzw. in der MRT nicht bestätigt werden konnten, ergab sich ein falsch positiver Wert von 0.08. Ebenso wurden zwei Läsionen in der Sonographie nicht erkannt. Der falsch negative Wert betrug somit ebenfalls 0.08.

Falsch positiver Wert: $P(\{W=-\} \cap \{T=+\}) = 2 / 25 = 0.08$

Falsch negativer Wert: $P(\{W=+\} \cap \{T=-\}) = 2 / 25 = 0.08$

Abbildung 35 zeigt nochmals die Sensitivität der Sonographie in der Darstellung einer Läsion des Lig. supraspinale bzw. Lig. interspinale sowie in der Darstellung einer Einblutung in den dorsalen Bandapparat der Wirbelsäule.

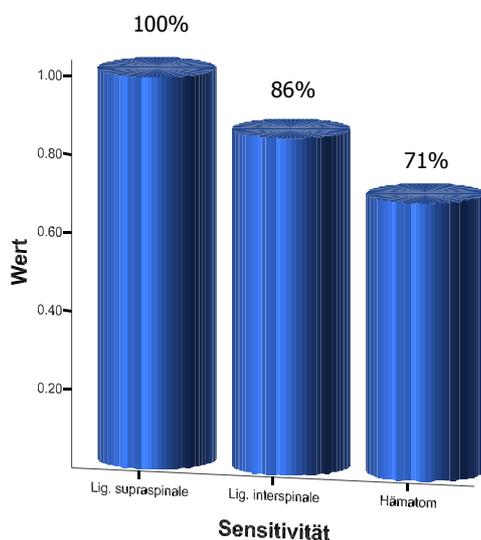


Abb. 35 Sensitivität, Lig. supraspinale, Lig. interspinale, Hämatom

Die Spezifität des Ultraschalls in Bezug auf die oben genannten Strukturen verdeutlicht Abbildung 36. Die Graphik beschreibt den Anteil der nicht verletzten Patienten, bei denen in der Sonographie auch kein Alignment bzw. Hämatom nachweisbar war.

Die Balkendiagramme in Abbildung 37 veranschaulichen die positiven sowie negativen prädiktiven Werte. Die erste Darstellung gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein durch Ultraschall positiv getesteter Patient intraoperativ auch tatsächlich eine Läsion bzw. Einblutung aufwies. Hingegen beschreibt die rechte Abbildung die

Wahrscheinlichkeit, mit der ein sonographisch negativ getesteter Patient auch intraoperativ faktisch keine Kontinuitätsunterbrechung bzw. kein Hämatom zeigte.

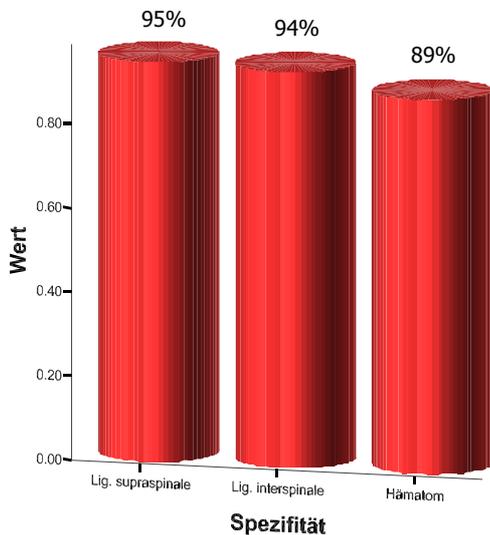


Abb. 36 Spezifität, Lig. supraspinale, Lig. interspinale, Hämatom

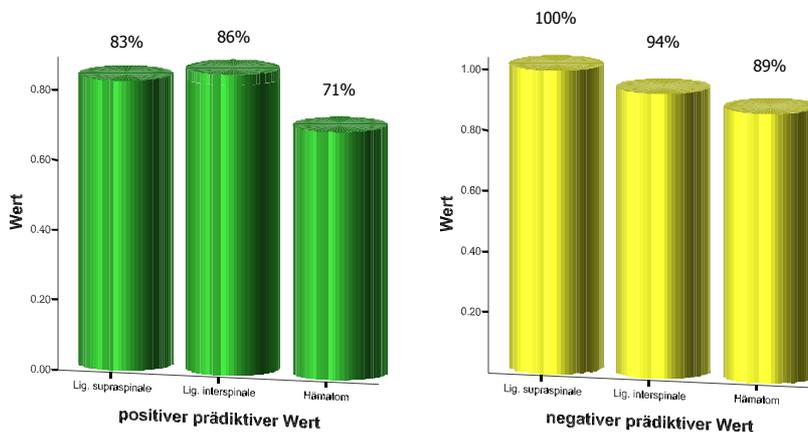


Abb. 37 positiver prädiktiver Wert und negativer prädiktiver Wert, Lig. supraspinale, Lig. interspinale, Hämatom

Abbildung 38 zeigt nochmals den Prozentsatz aller Patienten, die sonographisch positiv getestet wurden, jedoch intraoperativ keine Verletzung zeigten, bzw. den Anteil der Patienten, deren Befund im Ultraschall negativ war, jedoch der Operateur eine Läsion beschrieb.

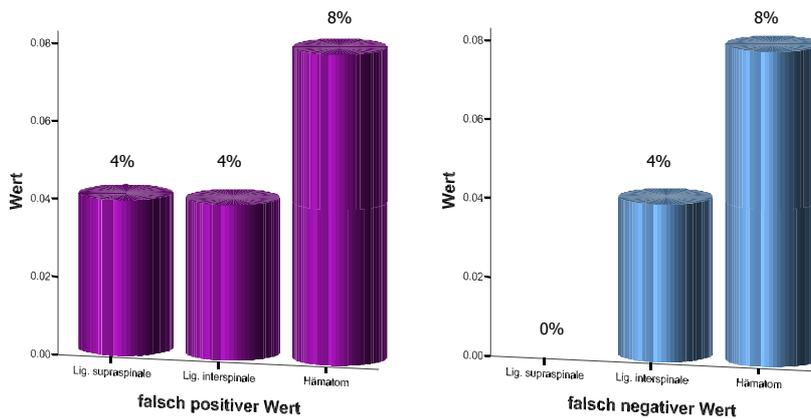


Abb. 38 falsch positiver Wert und falsch negativer Wert, Lig. supraspinale, Lig. interspinale, Hämatom

3.4 PLC

Durch das Erfassen aller Befunde der drei einzeln beurteilten Qualitäten konnten wir entsprechende bedingte Wahrscheinlichkeiten für den PLC angeben. Alle Vierfeldertafeln der drei anatomischen Strukturen (Lig. supraspinale, Lig. interspinale, Hämatom) wurden dabei aufsummiert und ergaben nachfolgende Ergebnisse (Tab. 15).

Testergebnis <i>T</i>	Wirklichkeit <i>W</i>		Summe
	Positiv	Negativ	
Positiv	16	4	20
Negativ	3	52	55
Summe	19	56	75

Tab. 15 Vierfeldertafel, PLC

Sensitivität: $P(T=+ | W=+) = 16 / 19 = 0.84$

Spezifität: $P(T=- | W=-) = 52 / 56 = 0.93$

Die Sensitivität für den PLC konnte somit mit 84 % angegeben werden, die Spezifität betrug dabei 93 %.

Berechnungen des positiven prädiktiven bzw. negativen prädiktiven Wertes für den PLC ergaben Werte von 0.8 bzw. 0.95

Positiver prädiktiver Wert: $P(W=+ | T=+) = 16 / 20 = 0.8$

Negativer prädiktiver Wert: $P(W=- | T=-) = 52 / 55 = 0.95$

Für den falsch positiven Wert konnten wir 0.05 angeben, der falsch negative Wert betrug 0.04.

Falsch positiver Wert: $P(\{W=-\} \cap \{T=+\}) = 4 / 75 = 0.05$

Falsch negativer Wert: $P(\{W=+\} \cap \{T=-\}) = 3 / 75 = 0.04$

Abbildung 39 zeigt nochmals vergleichend alle bedingten Wahrscheinlichkeiten der Sonographie in der Darstellung des posterioren Ligamentkomplexes.

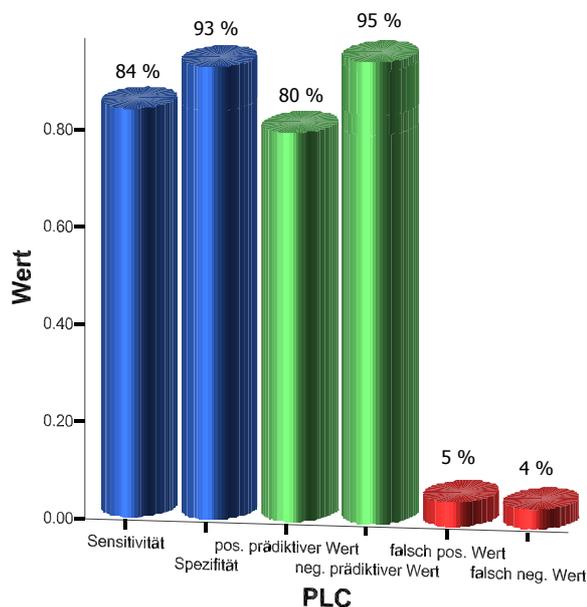


Abb. 39 Bedingte Wahrscheinlichkeiten, PLC

4. Unterklassifizierung von Typ-A-Verletzungen

Mittels konventionellen Röntgens sowie der Computertomographie konnten wir bei 25 Patienten eine Typ-A-Verletzung der Wirbelsäule diagnostizieren. Wie bereits beschrieben, zeigte sich dabei jedoch auch

das Problem, dass ein Teil dieser Verletzungen unterklassifiziert wurde. Tatsächlich handelte es sich in einigen Fällen um eine Flexions-Distraktions-Verletzung, die auf konventionellen Aufnahmen nicht erkannt werden konnte.

Die Abbildung 40 zeigt nun den Anteil der vordergründigen Typ-A-Verletzungen, der nachfolgend durch die Sonographie als Typ-B-Verletzung identifiziert werden konnte.

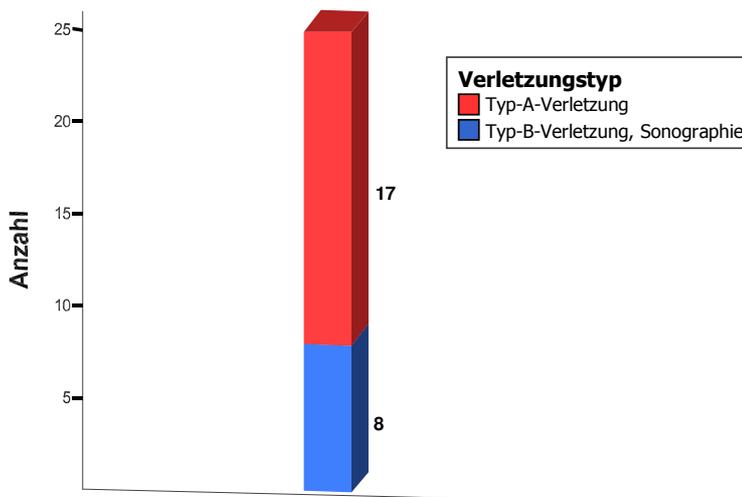


Abb. 40 Unterklassifizierung von Typ-A-Verletzungen, Sonographie

Acht der 25 Typ-A-Verletzungen konnten wir mit Hilfe der Sonographie als Typ-B-Verletzungen einordnen (Abb. 40). Somit konnte nur in 17 von 25 Fällen von einer rein ossären Verletzung ausgegangen werden.

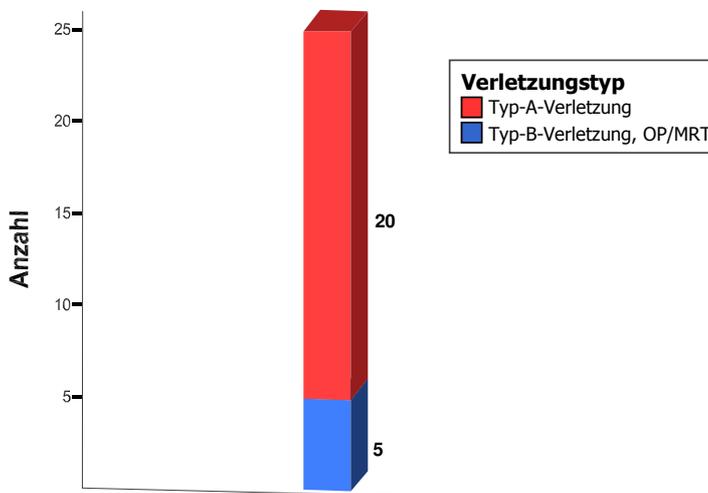


Abb. 41 Unterklassifizierung von Typ-A-Verletzungen, Operation und MRT

Tatsächlich zeigte sich in der intraoperativen Kontrolle bzw. in der Magnetresonanztomographie bei nur fünf Patienten eine Flexions-Distraktions-Verletzung. 20 Verletzungen waren demnach nur durch die Fraktur gekennzeichnet. In Abbildung 41 sind die regelrechten Häufigkeiten der Typ-A-Verletzungen sowie der Flexions-Distraktions-Verletzungen abgebildet, wie sie letztendlich aus der Bewertung des Operateurs resultierten.

Somit zeigte sich in drei Fällen eine Überklassifizierung der Verletzung durch die Sonographie. Fünf Frakturen wurden durch den Ultraschall zutreffend als Typ-B-Verletzung eingeordnet.

Tatsächlich waren damit 20 % der Typ-A-Verletzungen als Typ-B-Verletzungen einzuordnen. Mittels Sonographie wurden 32 % der Typ-A-Verletzungen als Typ-B-Verletzungen beschrieben. Daraus resultiert eine Überklassifizierung der Verletzung in 12 % der Fälle.

5. Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule

5. 1 Patientenkollektiv

Von 25 Patienten konnten acht Frauen sowie 17 Männer untersucht werden. Dies entspricht einem Anteil von 32 % bzw. 68 % (Abb. 42).

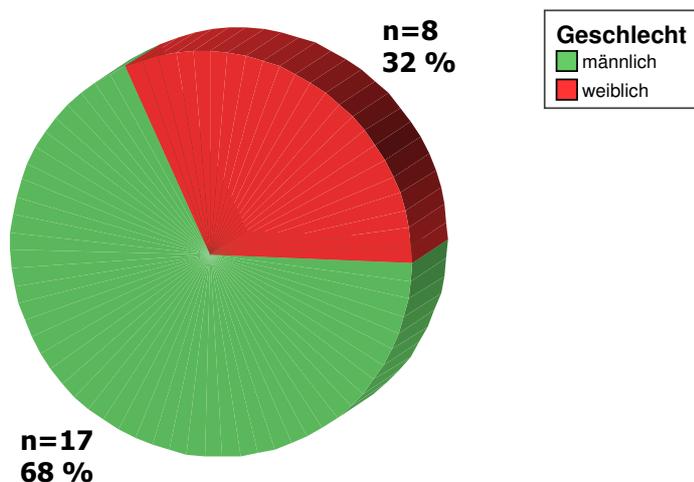


Abb. 42 Patientenkollektiv

5.2 Unfallmechanismus

Die häufigsten Unfallmechanismen waren Stürze aus großer Höhe (n= 12, 48 %) sowie Verkehrsunfälle (n=10, 40 %). Verkehrsunfälle, bei denen Fußgänger von einem Fahrzeug erfasst und verletzt wurden, konnten wir nur einmal beobachten (n=1, 4 %). Eine direkte Gewalteinwirkung als Ursache für die Wirbelsäulenverletzung konnten wir keinem Patienten feststellen (Abb. 43). Alle anderen Mechanismen traten zweimal auf. Ihr Anteil an allen Unfallmechanismen betrug damit 8 %.

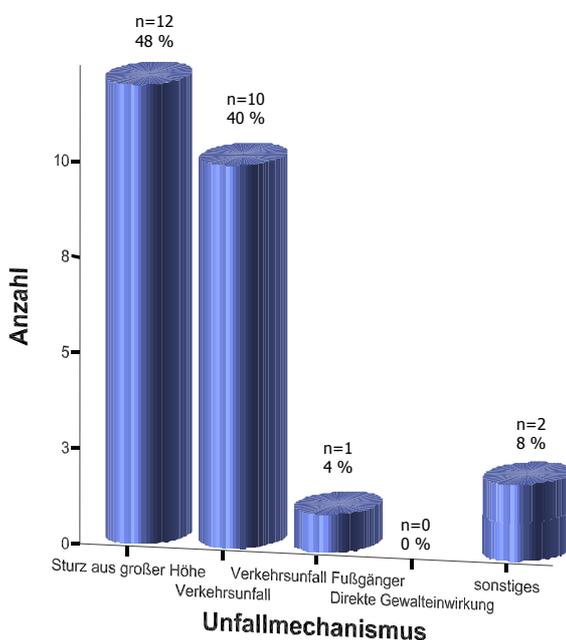


Abb. 43 Häufigkeiten der Unfallmechanismen

5.3 Klinik

Wie bereits in Abschnitt B 1 erwähnt, korrelierte die Reihenfolge der Merkmalsausprägungen mit dem Schweregrad der Verletzung.

Eine fehlende Symptomatik konnten wir nur bei einem Patienten feststellen (n=1, 4 %). Bei etwa der Hälfte der Patienten war der verletzte Bereich druckschmerzhaft (n=13, 52 %). Spontane Beschwerden traten in 32 % der Fälle auf (n=8, 32 %). Eine Diastase der Dornfortsätze fanden wir nur bei drei der fünf Typ-B-Verletzungen (n=3, 12 %). Neurologische Ausfälle oder eine Querschnittssymptomatik konnten wir nicht beobachten (Abb.44).

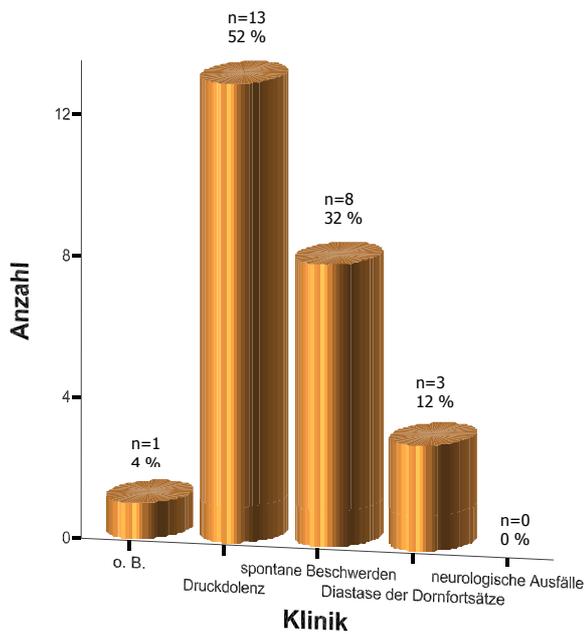


Abb. 44 Häufigkeiten der Symptomatik

Abbildung 45 betrachtet ausschließlich die Symptomatik der Typ-A-Verletzungen. Druckdolenzen sowie spontane Beschwerden konnten wir in 60 % bzw. 35 % der Fälle feststellen (Abb. 45).

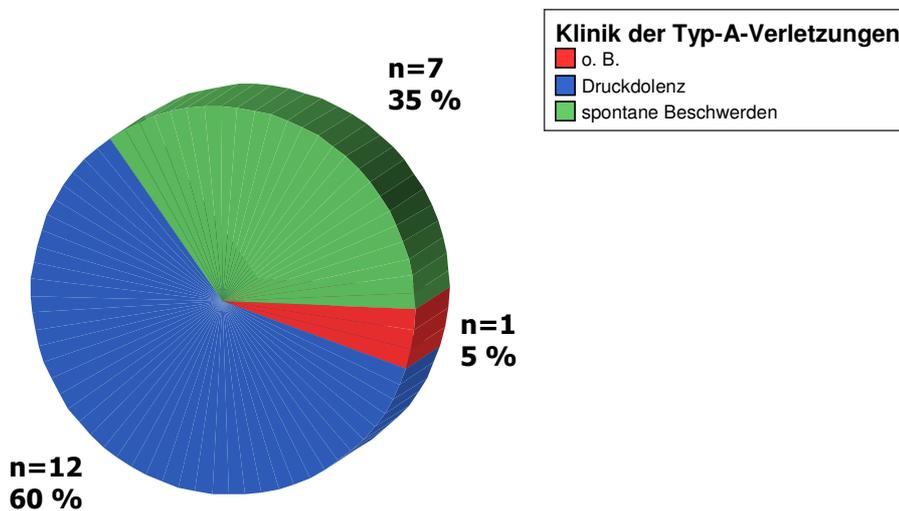


Abb. 45 Häufigkeiten der Symptomatik bei Typ-A-Verletzungen

Bei den Flexions-Distraktionsverletzungen konnten wir bei drei Patienten eine Diastase der Dornfortsätze erkennen. Druckdolenz sowie spontane Beschwerden fanden wir bei jeweils einem Patienten. Abbildung 46 zeigt die Häufigkeiten der Symptomatik bei Typ-B-Verletzungen.

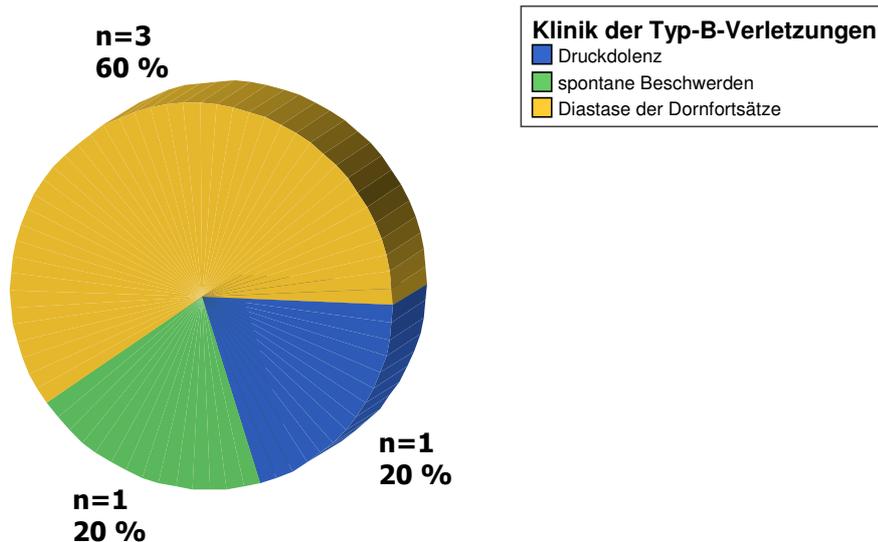


Abb. 46 Häufigkeiten der Symptomatik bei Typ-B-Verletzungen

5.4 Häufigkeiten der Wirbelkörperfrakturen an der thorakolumbalen Wirbelsäule

Bei 25 Patienten konnten wir insgesamt 43 Wirbelkörperfrakturen diagnostizieren. 22 Frakturen lagen dabei im Bereich der thorakalen Wirbelsäule von BWK 1-10. Dies entspricht einem Anteil von 51 %. Die Segmente BWK 11 bis LWK 2 zeigten zusammen 18 Frakturen. Damit waren 42 % aller Verletzungen am thorakolumbalen Übergang anzutreffen. Der fünfte Lendenwirbelkörper war bei keinem Patienten frakturiert. Die Häufigkeiten der Wirbelkörperfrakturen im thorakolumbalen Bereich gibt Abbildung 47 wieder.

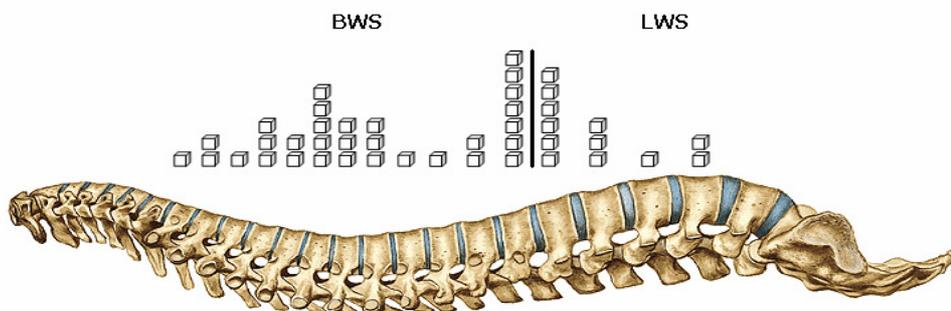


Abb. 47 Häufigkeiten der Wirbelkörperfrakturen an der thorakolumbalen Wirbelsäule

5.5 Häufigkeiten der Verletzungen, aufgeteilt nach der Wirbelsäulenebene

Bei insgesamt sieben Patienten konnten wir im Bereich der Segmente BWK 1-10 eine Verletzung diagnostizieren. Dabei handelte es sich in zwei Fällen um eine Flexions-Distraktions-Verletzung vom Typ B 1.2. Ossäre Verletzungen vom Typ A 3.1 bzw. A 3.3 waren bei vier bzw. einem Patienten erkennbar (Abb. 48).

Der größere Anteil der Läsionen entfiel jedoch auf den thorakolumbalen Übergang von BWK 11 – LWK 2. 16 Patienten zeigten in diesem Bereich eine Kompressions- bzw. Distraktionsverletzung. Eine Fraktur vom Typ B 1.2 konnten wir bei insgesamt drei Patienten erkennen. Bei 13 Patienten handelte es sich dagegen um reine Spaltbrüche vom Typ A 2.1 bzw. A 2.3 oder um Berstungsbrüche vom Typ A 3.1, A 3.2 bzw. A 3.3 ohne ligamentäre Mitbeteiligung.

Bei nur zwei Patienten war es im Bereich der Segmente LWK 3-5 zu einer Verletzung gekommen. In beiden Fällen handelte es sich dabei um Kneifzangenbrüche vom Typ A 2.3 (Abb. 48).

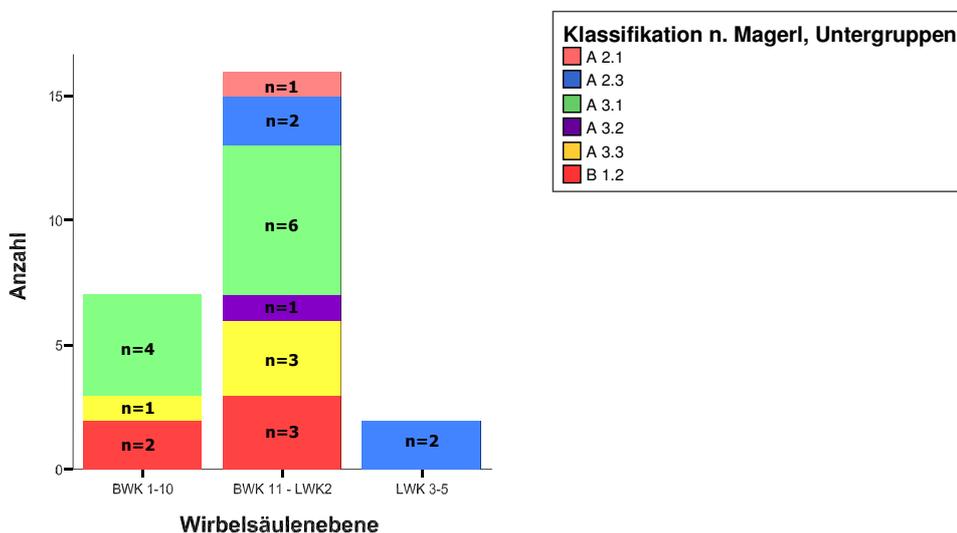


Abb. 48 Häufigkeiten der Untergruppen, aufgeteilt nach der Wirbelsäulenebene

5.6 Radiologische Befunde

Die radiologische Befundung zeigte bei zwölf Patienten eine Impressionsfraktur nach axialer Kompression (48 %). Bei zehn Patienten

(40 %) war es zu einer Kompressionsfraktur mit deutlicher Abnahme der Wirbelkörperhöhe und eventuell einer Verbreiterung des Quer- oder Tiefendurchmessers gekommen. Eine Querfraktur konnten wir nur bei einem Patienten erkennen. Eine zusätzliche Dorn- bzw. Querfortsatzfraktur war in einem Fall feststellbar. Ebenso zeigte sich bei nur einem Patienten eine zusätzliche Kantenabsprengung eines Wirbelkörperfragmentes (Abb. 49).

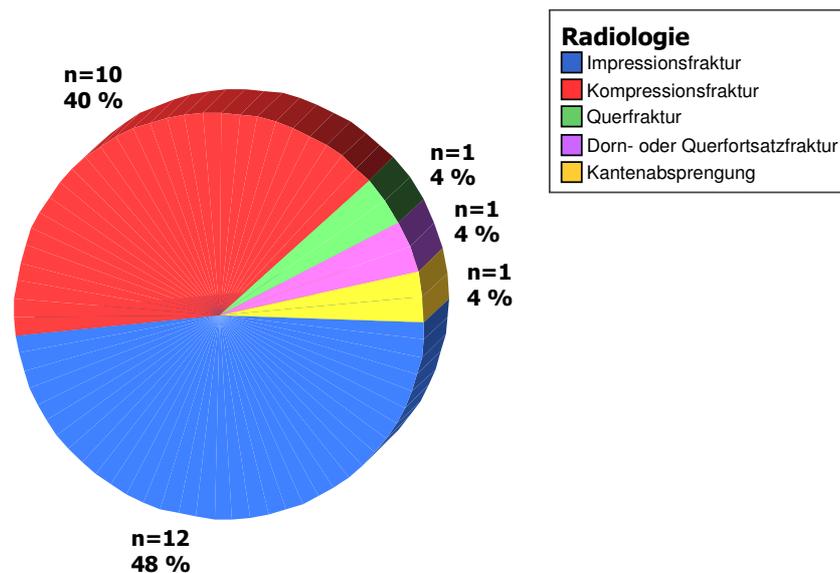


Abb. 49 Häufigkeiten der radiologischen Befunde

5.7 Häufigkeiten der Verletzungen

Abbildung 50 zeigt die Häufigkeiten der einzelnen Untergruppen bezogen auf die gesamte thorakolumbale Wirbelsäule. In den meisten Fällen handelte es sich um inkomplette Berstungsbrüche vom Typ A 3.1 (n=10, 40 %). Einen Berstungsspaltbruch vom Typ A 3.2 konnten wir bei nur einem Patienten erkennen (4 %). Komplette Berstungsbrüche (A 3.3) zeigten sich dagegen bei 16 % der Patienten (n=4).

Sagittale Spaltbrüche (A 2.1) bzw. Kneifzangenfrakturen (A 2.3) konnten wir bei einem (4 %) bzw. vier Patienten (16 %) diagnostizieren. Frontale Spaltbrüche vom Typ A 2.2 waren bei keinem Patienten erkennbar.

Frakturen der A1-Gruppe (Impaktionsbrüche) konnten in der gesamten Studie nicht beobachtet werden.

Wie bereits erwähnt, zeigte sich bei fünf Patienten eine Fraktur mit ligamentärer Zerreißung (20 %). Dabei konnten alle Läsionen der Untergruppe B 1.2 (Flexionsdistraction mit Fraktur des Wirbelkörpers vom Typ A) zugeordnet werden (Abb. 50). Verletzungen der Gruppe B 2 sowie der Gruppe B 3 konnten bei keinem Patienten festgestellt werden. Ebenso war es in keinem Fall zu einer Rotationsverletzung vom Typ C gekommen.

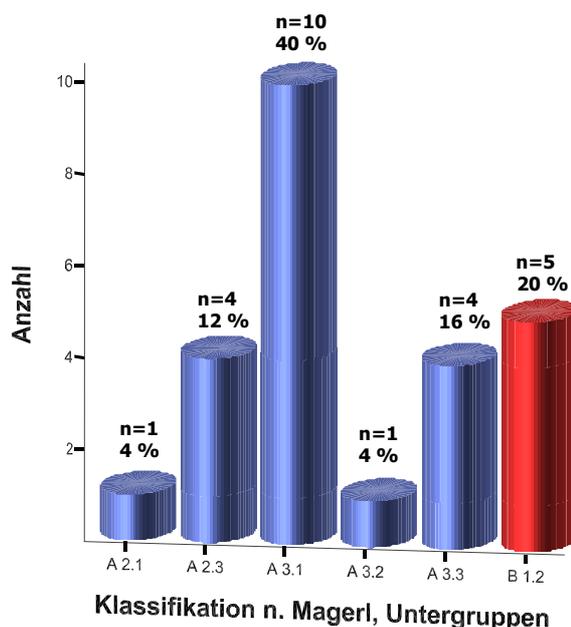


Abb. 50 Häufigkeiten der Untergruppen

5.8 Therapie

Eine konservative Therapie wurde bei sieben Patienten angestrebt. Dies entsprach einem Anteil von 28 % aller 25 untersuchten Patienten.

In der operativ versorgten Gruppe wurden sieben Patienten mittels dorsaler Spondylodese stabilisiert (28 %). Bei zwei Patienten (8 %) wurde dagegen ein rein ventraler Zugang mit folgender ventraler Spondylodese vorgezogen. Ein zweizeitiges Vorgehen mit primär dorsaler Spondylodese und später folgender ventraler Stabilisierung wurde in neun Fällen erwogen. Damit wurden 36 % aller Verletzungen kombiniert operativ therapiert. Abbildung 51 gibt die absoluten und relativen Häufigkeiten der Therapien bei Typ-A und Typ-B-Verletzungen wieder.

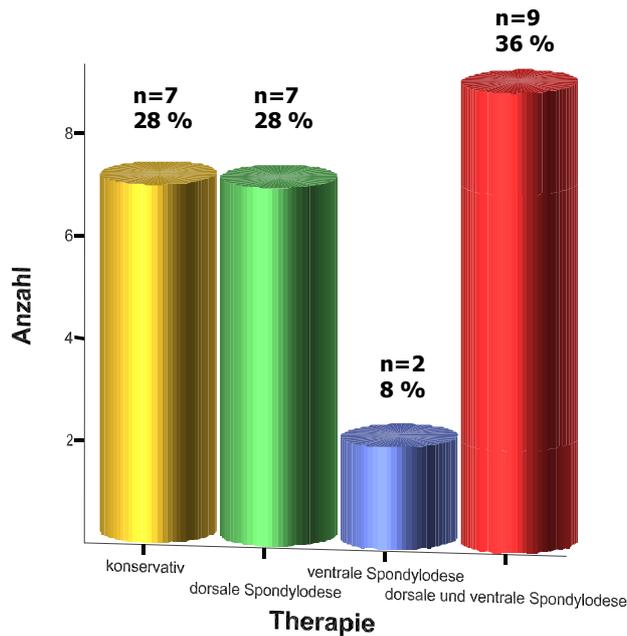


Abb. 51 Therapie bei Typ-A- und Typ-B-Verletzungen

Ferner haben wir auch die Therapien der Kompressions- sowie Distractionsverletzungen getrennt voneinander beobachtet (Abb. 52). Bei den Typ-A-Verletzungen wurde in jeweils 35 % der Fälle eine konservative Therapie bzw. eine dorsale und ventrale Spondylodese angestrebt. Eine rein dorsale Stabilisierung wurde bei vier Patienten (20 %) durchgeführt. Zwei Patienten wurden über einen ventralen Zugang versorgt (10 %).

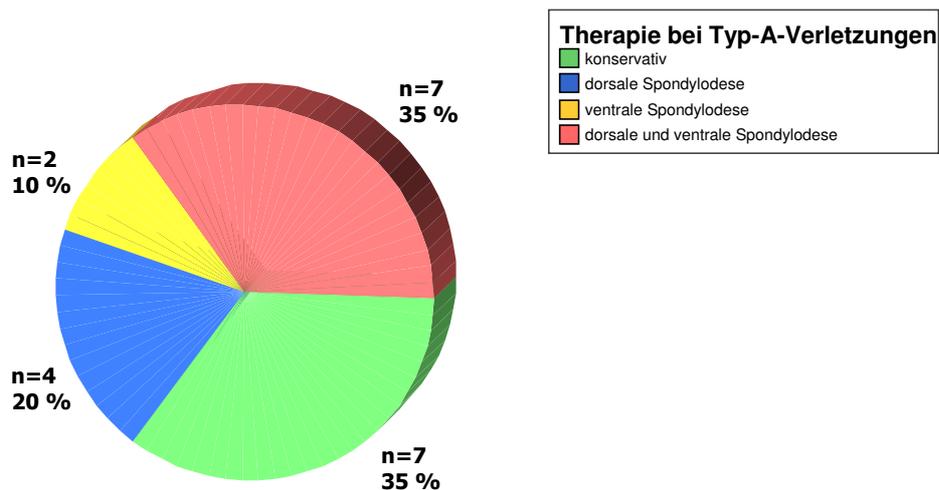


Abb. 52 Therapie bei Typ-A-Verletzungen

Bei den Distractionsverletzungen wurden alle Patienten operativ behandelt. In drei Fällen wurde rein dorsal instrumentiert, bei zwei

Patienten dagegen zweizeitig kombiniert stabilisiert. Abbildung 53 gibt die entsprechenden Verhältnisse bei den Distractionsverletzungen graphisch wieder.

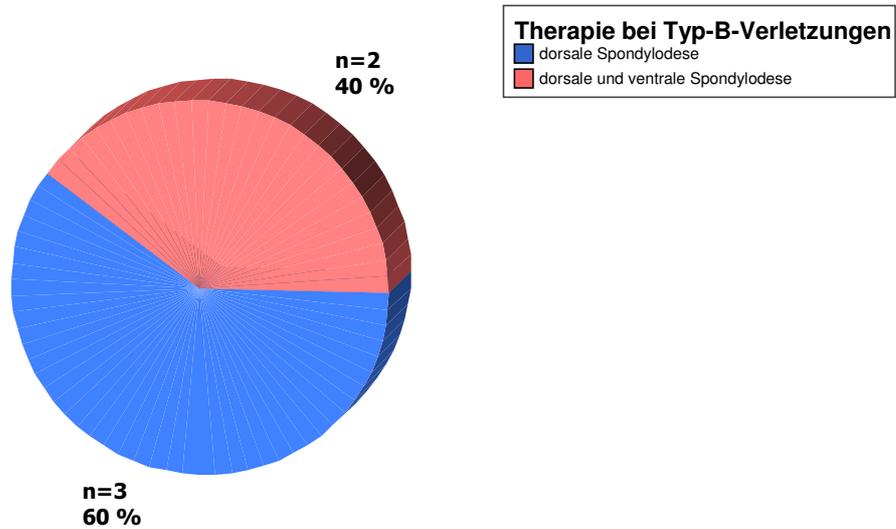


Abb. 53 Therapie bei Typ-B-Verletzungen

6. Diagnostikprogramm

Nr.	Sonographie	MRT	Operation
1	x	x	x
2	x	x	x
3	x		x
4	x	x	
5	x		x
6	x	x	x
7	x		x
8	x	x	
9	x	x	x
10	x	x	
11	x		x
12	x	x	x
13	x		x
14	x		x
15	x	x	x
16	x	x	x
17	x	x	
18	x		x
19	x		x
20	x	x	x
21	x	x	x
22	x	x	
23	x	x	
24	x		x
25	x		x

Tab. 16 durchgeführte Diagnostik bzw. Operation bei 25 Patienten

Von 25 Patienten, die alle sonographisch untersucht werden konnten, wurde bei 60 % (n=15) ebenfalls eine Magnetresonanztomographie durchgeführt. 76 % aller Patienten wurden schließlich operativ versorgt

(n=19). Tabelle 16 zeigt die durchgeführte Diagnostik bzw. Operation bei allen 25 Patienten.

Von 19 operierten Patienten wurden weniger als die Hälfte (n=9) präoperativ durch die MRT untersucht. 53 % der operativ versorgten Verletzungen wurden nicht mittels Magnetresonanztomographie betrachtet (n=10). Abbildung 54 zeigt graphisch den Anteil der operierten Patienten, die präoperativ auch einer MRT-Untersuchung zugeführt wurden. Von den konservativ therapierten Patienten wurden alle magnetresonanztomographisch untersucht.

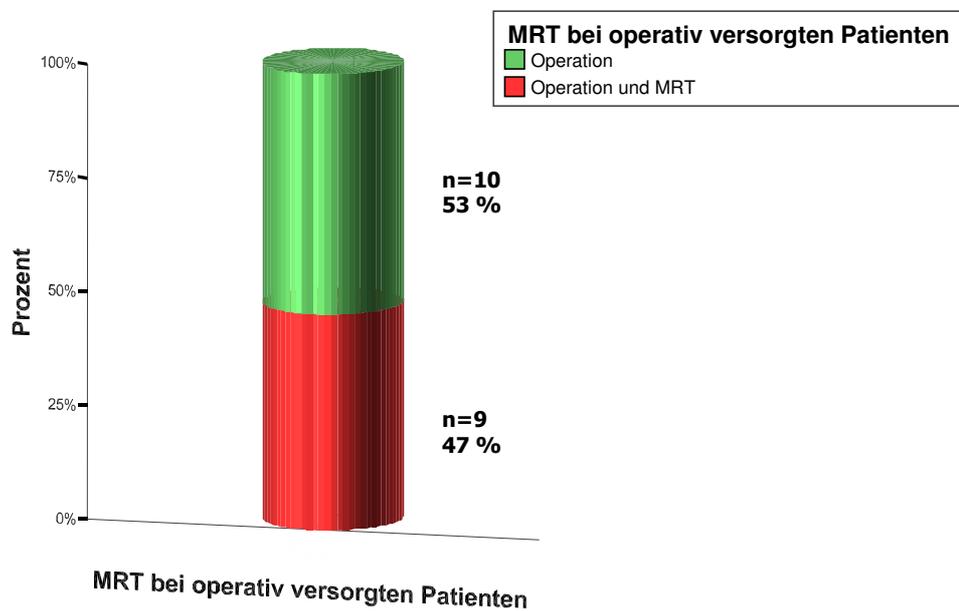


Abb. 54 Anteil der operativ versorgten Patienten mit MRT

D. Diskussion

1. Normalbefunde und Pathologien

Die Stabilität der Wirbelsäule wird neben den knöchernen Elementen wie Wirbelkörper und Wirbelbögen im Wesentlichen durch die Integrität der ligamentären Strukturen bestimmt. Die Bedeutung dieser Bandverbindungen wurde in mehreren Studien betont [1, 22]. Besonders der dorsale Bandkomplex der Wirbelsäule (posterior ligament complex, PLC), bestehend aus dem Lig. supraspinale, Lig. interspinale sowie dem Lig. flavum, scheint für die Integrität der Segmente eine übergeordnete Rolle zu spielen. Gillespie et al. [19] konnten aktuell in biomechanischen Belastungsuntersuchungen nachweisen, dass der posteriore Bandkomplex wesentlich den Flexionswiderstand der thorakolumbalen Wirbelsäule bestimmt. Als Hauptträger der Belastung konnte hierbei das Lig. supraspinale sowie das Lig. interspinale identifiziert werden. Ferner wurden sie als jener ligamentäre Anteil beschrieben, welcher bei einer Hyperflexionsverletzung als Erster rupturiert [1]. Damit stellt der Nachweis einer Läsion des PLC einen guten Indikator für die Schwere der Verletzung und den Verlust der Stabilität dar [41].

Die Klassifikation nach Magerl [33] hat sich im klinischen Alltag durchgesetzt. Zum einen kann sie die ligamentäre Verletzungskomponente berücksichtigen und präzise abbilden, zum anderen wird durch sie der Unfallmechanismus berücksichtigt. Kompressionsverletzungen können somit leicht von Distraktions- oder Rotationsverletzungen abgegrenzt werden. Dies kann auch entscheidend zum Verständnis der hier zugrunde liegenden Kräfte beitragen. Dennoch hat der hohe Informationsgehalt der Magnetresonanztomographie zu Forderungen geführt, die bestehenden Klassifikationen zu erweitern [43]. Aufgrund fehlender Praktikabilität haben sich diese Vorstellungen jedoch nicht durchsetzen können. Auch für den klinischen Alltag, die Indikation zur operativen Versorgung und das Vorgehen des Operateurs scheinen solche Spezialisierungen keine Konsequenz zu haben.

Die Magnetresonanztomographie stellt dabei heute das Verfahren der Wahl zur Beurteilung von Wirbelsäulenverletzungen dar. Insbesondere Läsionen des Myelons und des dorsalen Bandapparates können mit ausreichender Sicherheit identifiziert werden [15, 17, 20]. Vorteile liegen jedoch auch in der zeitgleichen Beurteilung des ventralen Bandapparates mit dem Lig. longitudinale anterius sowie der Bewertung der Bandscheibe, des Lig. longitudinale posterius und des Lig. flavum. Diese scheinen jedoch im Vergleich zum Lig. supraspinale und Lig. interspinale biomechanisch eine nur untergeordnete Rolle als Prädiktor einer Instabilität zu spielen [19]. In einer T₂-gewichteten Sequenz lassen sich hierbei ligamentäre Strukturen als hypointenses Signal darstellen. Ein Verlust der Kontinuität oder eine hohe Signalintensität können dann Zeichen eines Alignments sein. Dennoch kann auch Fettgewebe, das teilweise ligamentäre Strukturen umgibt, ein identisch hohes Signalverhalten aufweisen. Diesem Problem kann mit einer fettunterdrückenden STIR-Sequenz begegnet werden.

Trotz dieser großen Zweckmäßigkeit der Magnetresonanztomographie bei der Identifizierung von Läsionen des PLC bei thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen scheinen jener diagnostischen Methode Grenzen gesetzt zu sein. Nicht selten verwehren Kontraindikationen den Einsatz der MRT [12, 27]. Hierbei stellen zum einen Implantate aus Metall ein großes Problem dar. Herzschrittmacher, mechanische Herzklappen, Skelettprothesen, Granatsplitter, intrazerebrale Clips, Gefäß- oder Gallengangsprothesen (Stents) oder Metallsplitter (z. B. bei Personen aus metallverarbeitenden Berufen und Personen mit okkulten Metallfremdkörpern im Gesichtsbereich oder anderen Körperstellen) können sich innerhalb des Patienten bewegen und je nach topographischer Lage und Materialzusammensetzung zu schweren Verbrennungen oder anderen Verletzungen führen. Herzschrittmacher können wegen ihrer magnetsteuerbaren Einstellung außer Funktion gesetzt oder die Elektrodenkabel erhitzt werden. Die meisten Hersteller von älteren Herzschrittmachern verbieten deshalb die Untersuchung von diesen Patienten. Trotz der Clips, Stents und Endoprothesen neueren Herstellungsdatums, die in der Regel keine magnetisierbaren Metalle

mehr enthalten, kann kein exaktes Datum angegeben werden, nach dem keine ferromagnetischen Materialien mehr implantiert wurden [27]. Deshalb muss der untersuchende Arzt sich allein durch anamnestische Angaben über die Materialbeschaffenheit des Implantats informieren. Treffen oben genannte Eigenschaften auch für medizinische Überwachungsgeräte zu, auf die der Patient angewiesen ist, müssen gegebenenfalls teure Spezialausrüstungen ohne ferromagnetische Bestandteile beschafft werden.

Ein weiteres Problem stellen psychische Beschwerden in Form der Klaustrophobie dar. Auch der durch das Ein- und Ausschalten der Gradientenspulen entstehende Lärm, der je nach angewendeter Sequenz einen Lärmpegel zwischen 65 und 115 dB erreichen kann, vermag diese Problematik noch zu verstärken [27]. Sowohl diese Hindernisse als auch die oben genannten Kontraindikationen bei metallischen Implantaten konnten wir bei mehreren Patienten selbst beobachten, so dass diese Untersuchungen nicht durchführbar waren.

Obwohl bislang für eine Schwangerschaft keine Schädigungen nachgewiesen wurden, empfiehlt die Strahlenschutzkommission jedoch, keine Untersuchungen im ersten Trimenon der Schwangerschaft durchzuführen [27]. Dies sollte ebenfalls bei der Diagnostik bedacht werden.

Des Weiteren können eine zirkulatorische und/oder respiratorische Instabilität des Patienten die Untersuchung wesentlich erschweren. Insbesondere bei polytraumatisierten, beatmeten Patienten sind der apparativen Diagnostik allein durch die Transportbelastung der Personen Grenzen gesetzt [12, 24].

Neben diesen zahlreichen Kontraindikationen ist derzeit in vielen Kliniken ein Magnetresonanztomograph noch nicht verfügbar oder bei fehlendem Bereitschaftsdienst nicht ständig disponibel.

Außerdem verlangt der wirtschaftliche und finanzielle Aspekt dieser Untersuchung nach einer kostengünstigen Alternative, die jedoch eine ausreichend hohe Sensitivität und Spezifität gewährleisten kann.

An der thorakolumbalen Wirbelsäule wird für die Magnetresonanztomographie eine Sensitivität und Spezifität von bis zu

100 % angenommen [23, 50]. Haba et al. [21] untersuchten im MRT 35 Patienten mit Berstungsfrakturen und gaben für das Lig. supraspinale eine Sensitivität von 90.5 % an. Entsprechende Werte für das Lig. interspinale lagen sogar bei 94.3 %. Berechnungen der Reliabilität für den posterioren Ligamentkomplex ergaben Werte von 0.803.

Auch Lee et al. [31] untersuchten 34 Patienten mit Frakturen an der thorakolumbalen Wirbelsäule und beschrieben sogar eine Sensitivität von 92.9 % für das Lig. supraspinale bzw. 100 % für das Lig. interspinale. Die Spezifität für das Lig. supraspinale bzw. Lig. interspinale konnte mit 80 % respektive 75 % angegeben werden.

Moon et al. [39] beschrieben 2002 erstmals den Ultraschall als eine Alternative zum MRT, konnten jedoch aufgrund einer geringeren Patientenzahl keine validen Aussagen zu den bedingten Wahrscheinlichkeiten machen. Die Autoren betonten die hervorragende Darstellbarkeit des Lig. supraspinale und Lig. interspinale sowie des paravertebralen Gewebes. Außerdem ließen sich fokale zystische Einblutungen in den Bandapparat abgrenzen. Diese Beobachtungen konnten wir bestätigen. Die häufigsten Übereinstimmungen zwischen sonographischem und intraoperativem bzw. MRT-Befund fanden wir im Bereich des Lig. supraspinale. Hier war in den meisten Fällen eine exakte Bewertung möglich. Da mit zunehmender Schalltiefe die Echogenität des Gewebes rapide abnahm, konnten tiefer gelegene Strukturen teilweise nur schlechter abgebildet werden. Aus diesem Grunde konnten wir einzelne falsch positive bzw. falsch negative Befunde im Bereich des Lig. interspinale beobachten. Eine richtige Beurteilung dieser Struktur war jedoch auch hier zumeist möglich. Nach unseren Erfahrungen war es jedoch teilweise problematisch, Übergangszustände wie Dehnungen des Bandkomplexes richtig einzuordnen. Hierbei waren die Übergänge zwischen intaktem Bandapparat und fibrillärem Alignment fließend. Hilfreich konnte dann die Identifizierung einer Einblutung in den Bandapparat als indirekter Hinweis einer Läsion sein. Eine Darstellung des Lig. flavum war aufgrund der Gewebetiefe nicht realisierbar. Auch diese Beobachtungen konnten bereits von Moon et al. [39] beschrieben werden. Unserer Ansicht nach kann eine Beurteilung dieses ligamentären

Anteils jedoch auch vernachlässigt werden, da das Lig. flavum nicht als Hauptträger der Flexionsbelastung identifiziert wurde und somit bei Hyperflexionsverletzungen ohnehin erst sehr spät rupturiert [1]. Als Indikator für den Verlust der Stabilität und die Schwere der Verletzung ist es damit nicht so wesentlich. Ebenso konnten auch die Gelenkkapseln der kleinen Wirbelgelenke nicht abgebildet werden. Damit waren mögliche Verletzungen Letzterer durch Luxationsstellungen der zygapophysialen Gelenke nicht einsehbar. Diese können jedoch zur Beurteilung einer Flexionsinstabilität ebenfalls vernachlässigt werden [1]. Einblutungen in den Bandapparat konnten bei oberflächlicher posteriorer Lage zumeist sicher identifiziert werden und als indirekter Hinweis einer Bandruptur verwendet werden. Bei weiter ventral gelegenen Hämatomen zeigte sich jedoch aufgrund der oben beschriebenen Abnahme der Echogenität eine nur unsichere Bewertung. Eine Abgrenzung zum intakten Gewebe war dann nicht immer sicher möglich. Aus diesem Grunde fanden wir bei Hämatomen am häufigsten falsch positive bzw. falsch negative Befunde. Dies sollte jedoch den Untersucher nicht davon abhalten, auf mögliche Inhomogenitäten als indirekten Ausdruck eines Alignments zu achten. Als obligat kann dieser Hinweis jedoch nicht angesehen werden.

Insgesamt empfehlen wir eine Bilddarstellung in Längsschnittführung, da nur so das supra- und interspinale Ligament gänzlich abgebildet werden kann. Auch wird dem Untersucher die Orientierung aufgrund der sichtbaren Dornfortsätze leichter fallen. Eine Beurteilung der paravertebralen Muskulatur zur Identifizierung von fibrillären Unregelmäßigkeiten erfordert jedoch die Bildgebung in transversaler Ebene.

Moon et al. [39] beschrieben bei der sonographischen Untersuchung Einschränkungen im Bereich der distalen thorakalen Wirbelsäule (T₁₀, T₁₁ und T₁₂). Durch die langen, dachziegelartig überlappenden Spinalfortsätze konnten die interspinösen Räume in diesem Bereich der Wirbelsäule nicht eingesehen werden. Diese Problematik konnten wir nicht nachvollziehen. Durch eine Schräganstellung des Schallkopfes mit einer Schallrichtung von dorso-kaudal nach ventro-kranial konnte eine ausreichende Darstellung des Lig. supraspinale und Lig. interspinale erzielt werden.

Ein größeres Problem der Sonographie als dynamische Untersuchungsmethode war nach unseren Erfahrungen die exakte Höhenlokalisierung der Verletzung und der Wirbelkörper. Hier war zum einen die Beziehung der dorsalen Beckenkämme zum 4. LWK hilfreich, zum anderen jedoch auch ein Abgleich mit der konventionellen Bildgebung sinnvoll.

Für eine effektive sonographische Darstellung des PLC sind unserer Ansicht nach ein gutes Verständnis der Anatomie der Wirbelsäule sowie etwas Erfahrung und Geschick mit dem Ultraschall unabdingbar.

Trotz der oben beschriebenen Schwächen erscheint uns die Sonographie als eine leicht erlernbare und gut durchführbare Alternative zum MRT. Neben den exakten Darstellungen des PLC in verschiedenen Ebenen sowie der großen Verfügbarkeit könnte dem Ultraschall nicht zuletzt auch aufgrund der Zeit- und Kosteneffizienz der Vorzug gegeben werden. Unserer Erfahrung nach ist mit der Sonographie letztendlich eine gute Differenzierung zwischen Typ-A und Typ-B-Verletzungen möglich, die das therapeutische Eingreifen zu beeinflussen vermag.

2. Sensitivität und Spezifität

In unserer prospektiven Studie konnten wir erstmals im Vergleich zur MRT Angaben zur Sensitivität und Spezifität sowie weiteren bedingten Wahrscheinlichkeiten des Ultraschalls in der Beurteilung von Verletzungen des dorsalen Bandapparates machen (Tab. 17).

	Sensitivität				Spezifität				pos. prädiktiver Wert				neg. prädiktiver Wert			
	SSL	ISL	LF	H	SSL	ISL	LF	H	SSL	ISL	LF	H	SSL	ISL	LF	H
Sonographie	100	86	-	71	95	94	-	89	83	86	-	71	100	94	-	89
MRT *	93	100	86	-	80	75	89	-	96	97	67	-	68	100	96	-

SSL = Lig. supraspinale
 ISL = Lig. interspinale
 LF = Lig. flavum
 H = Hämatom

* Lee et al. [31], SPINE © 2000

Tab. 17 bedingte Wahrscheinlichkeiten bei Sonographie und MRT

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Sonographie in der Bewertung des Lig. supraspinale sehr genaue Bewertungen ermöglicht. Sensitivität, Spezifität und negativer prädiktiver Wert lagen sogar noch über den von Lee et al. [31] angegebenen Referenzwerten der Magnetresonanztomographie. Nur der positive prädiktive Wert zeigte in der MRT noch bessere Ergebnisse.

Dagegen scheint die Magnetresonanztomographie in einer Bewertung des Lig. interspinale überlegen zu sein. Sensitivität, positiver sowie negativer prädiktiver Wert lassen hierbei noch höhere Werte erkennen. Die Sonographie zeigte jedoch auch beim Lig. interspinale eine deutlich höhere Spezifität. Insgesamt scheint es damit einfacher, in der Sonographie bei einem intakten Lig. interspinale auch diesen Befund zu erheben, als bei einer Läsion ein Alignment zu bestätigen. Trotzdem konnten wir auch für das Lig. interspinale insgesamt akzeptable Werte im Vergleich zur MRT angeben (Tab. 17).

Erklärbar scheinen diese Verhältnisse zum einen durch die vermehrte Echogenität und gute Schallreflexion des sehr oberflächlich gelegenen Lig. supraspinale und die dadurch bedingte gute Möglichkeit zur Bewertung.

Zum anderen kann das Lig. supraspinale im Medianschnitt der Magnetresonanztomographie aufgrund der nur geringen Ausdehnung von ventral nach dorsal lediglich sehr undeutlich abgebildet werden. Übergänge zum Lig. interspinale scheinen dabei fließend zu sein. Hyperintense Signalveränderungen können dann teilweise nicht dem richtigen Ligament zugeordnet werden. Eine sichere Beurteilung schien uns somit in einigen Fällen nicht immer möglich.

Dagegen kann das Lig. interspinale im Medianschnitt der MRT aufgrund seiner räumlich stärkeren Ausdehnung von ventral nach dorsal meist besser abgebildet werden. Hyperintense Zonen als Hinweis eines Alignments können mit großer Sicherheit erkannt und abgegrenzt werden. Die deutliche Abnahme der Echogenität im Bereich des Lig. interspinale sowie die daraus folgenden Einschränkungen für die Bewertung von Inhomogenitäten mit dem Ultraschall erklären ebenfalls die Überlegenheit der MRT bei dieser Struktur.

Obwohl bei der Beurteilung eines Hämatoms die Sensitivität teilweise unter derer der anderen Strukturen sowohl in der Sonographie als auch in der MRT lag, haben wir diesen Teilaspekt bewusst in die Berechnungen von Sensitivität und Spezifität des PLC mit einbezogen. Damit können auch Übergangszustände wie Dehnungen des dorsalen Bandapparates berücksichtigt werden. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Ultraschalluntersuchung mit einer Sensitivität von 84 % und einer Spezifität von 93 % für die Beurteilung des gesamten PLC eine dem MRT vergleichbare Zuverlässigkeit bietet.

3. Unterklassifizierung von Typ-A-Verletzungen

Unseren Erfahrungen nach besteht bei der sonographischen Untersuchung des PLC eher das Problem einer Überklassifizierung von Typ-A-Verletzungen. Die Gefahr, ein Malalignment zu übersehen und somit die Verletzung als irrtümlich reine Kompressionsfraktur einzuordnen, konnten wir als sehr gering einstufen. War eine Läsion im dorsalen Bandapparat vorhanden, konnte diese mit großer Wahrscheinlichkeit auch diagnostiziert werden. Alle fünf Typ-B-Verletzungen wurden von uns mit Hilfe der Sonographie richtig erkannt. In drei Fällen neigten wir zu einer Überklassifizierung der Fraktur.

4. Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule

Denis et al. [9] sowie weitere Autoren [18, 34] konnten bei ihren Patienten mit Verletzungen an der thorakolumbalen Wirbelsäule einen Altersdurchschnitt von 31.7 ~ 39.5 Jahren erkennen. Auch Rüter et al. [47] berichteten von einem Altersgipfel zwischen 20 und 40 Jahren. Ein Altersdurchschnitt von 43.0 ± 14.9 Jahren bei Patienten dieser Studie lag somit knapp über den zuvor angegebenen Werten.

Den Anteil der Männer bei Patienten mit Frakturen an der Brust- und/oder Lendenwirbelsäule gaben Magerl und Engelhardt [34] mit etwa zwei Dritteln an. Angaben anderer Autoren zufolge lagen die Verhältnisse zwischen 60 und 66.8 % [9, 18, 34]. Bei einem überwiegenden

Männeranteil von 68 %, der dieser Studie zugrunde lag, können wir diese Beobachtungen ebenfalls bestätigen.

Als häufigste Unfallereignisse können, je nach Studienkollektiv und Autor, Straßenverkehr [18, 46] und Sturz aus der Höhe [34] gelten. Unseren Erfahrungen nach zeigte sich mit 48 % in knapp der Hälfte der Fälle ein Trauma durch Sturz aus großer Höhe. Verkehrsunfälle dagegen konnten wir bei 40 % der Patienten beobachten. Somit können oben aufgeführte Verhältnisse von uns nur bestätigt werden. Stark abhängig mögen diese epidemiologischen Daten jedoch auch vom Einzugsgebiet und Charakter des jeweiligen Krankenhauses abhängen. So konnten wir eine direkte Gewalteinwirkung als Ursache der Verletzung bei keinem Patienten beobachten.

Bei der klinischen Untersuchung der Patienten zeigte sich in der Mehrzahl der Fälle bei Palpation eine vorhandene Druckdolenz im Bereich der frakturierten Wirbelkörper (52 %). Spontane Beschwerden (32 %) waren ebenfalls ein häufiger klinischer Befund. Aufgrund der bei fast allen Patienten laufenden Medikation erschienen uns jedoch derartige Bewertungen als nicht sehr valide. Ferner sahen wir das Problem, derartige klinische Symptome zu objektivieren. So fanden wir bei den Typ-A-Verletzungen neben Patienten mit lokaler Druckschmerzhaftigkeit und spontanen Beschwerden auch eine Person, die keine klinische Symptomatik äußerte. Verwertbarer erschienen uns dann jedoch die Befunde einer interspinösen Lücke mit vergrößertem Dornfortsatzabstand bei den Typ-B-Verletzungen. Bei drei der fünf Patienten mit einer Flexions-Distraktions-Verletzung zeigte sich bei der Palpation eine Diastase der Dornfortsätze. Nach unseren Erfahrungen kann dieser klinische Befund neben der weiteren bildgebenden Diagnostik als ein guter erster Indikator einer Typ-B-Verletzung angesehen werden. Williams et al. [54] berichteten dagegen von einer Stufenbildung in der Dornfortsatzreihe bei 7 % ihrer polytraumatisierten Patienten mit Wirbelsäulenverletzungen. Diese Veränderungen konnten als erster Hinweis einer Hyperextensions-Verletzung (B3) angesehen werden. Da in unserer Studie allen Distraktionsverletzungen ein

Hyperflexionsmechanismus zugrunde lag, konnten wir diese Beobachtungen nicht bestätigen.

Die häufigsten Wirbelkörperbrüche fanden wir im Bereich des thorakolumbalen Übergangs. 30 % aller Frakturen entfielen dabei auf die Segmente T₁₂ und L₁. Sowohl der Wechsel der Kyphose in die Lordose der LWS als auch der Übergang einer relativ fixierten BWS zur frei stehenden LWS bedingen dabei die hohe Anfälligkeit dieses Abschnitts für Verletzungen. Magerl u. Engelhardt [34] fanden unter 1446 Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule sogar in 27.8 % der Fälle reine L₁-Frakturen. Etwa halb so häufig folgten die beiden benachbarten Wirbelkörper T₁₂ und L₂.

Außerdem fanden wir im Bereich der Segmente T₆ und T₇ eine Häufung der Frakturen. Insgesamt 19 % aller Wirbelkörperbrüche der thorakolumbalen Wirbelsäule entfielen dabei auf T₆ und T₇. Der kyphotische Abschnitt der Brustwirbelsäule ist durch den Rippenkäfig ventral und gegen Rotation stabilisiert. Resultierend stehen Kompressionsfrakturen an den Scheitelwirbeln T₆/T₇ im Vordergrund.

Insgesamt entfielen 64 % der Verletzungen auf den thoracolumbalen Übergang mit den Segmenten T₁₁ bis L₂. Magerl und Engelhardt [34] gaben ähnliche Werte von 62 % an. Meyer u. Heim [38] fanden bei 50.4 % ihrer Patienten Verletzungen im Bereich dieser Segmente.

Typ-B-Verletzungen fanden wir zu etwa gleichen Teilen sowohl an der oberen thorakalen Wirbelsäule als auch am thorakolumbalen Übergang. Dagegen scheint die untere LWS aufgrund der in diesem Bereich stärkeren Ausbildung der supra- und interspinösen Bänder [51] vor Distractionsverletzungen besser geschützt zu sein. So fanden wir bei keinem Patienten eine ligamentäre Komponente im Bereich der Segmente L₃ bis L₅.

Auch wenn die bei den radiologischen Befunden verwendeten Merkmalsausprägungen sich von den Kriterien der Magerl-Klassifikation abgrenzen, lassen sich dennoch Aussagen über das Ausmaß einer Wirbelkörperfraktur machen. Wir konnten zeigen, dass bei 40 % der Patienten eine Kompressionsfraktur zu einer deutlichen Abnahme der Wirbelkörperhöhe und eventuell einer Verbreiterung des Quer- oder

Tiefendurchmessers führte. Damit erscheinen uns hier die Gefahren einer kyphotischen Sinterung der betroffenen Wirbelkörper ohne operative Aufrichtung am größten.

Bei den Häufigkeiten der einzelnen Untergruppen der Verletzungen zeigten sich in der Mehrzahl der Fälle inkomplette Berstungsbrüche. Auch komplette Berstungsbrüche sowie Kneifzangenbrüche konnten wir häufig beobachten. Solitäre Spaltbrüche fanden wir dagegen nur sehr selten. Meist waren die Wirbelkörper multipel im Sinne einer Berstungsfraktur betroffen. War der dorsale Bandkomplex verletzt, zeigte sich bei allen betroffenen Patienten auch eine Fraktur des Wirbelkörpers vom Typ A. Verletzungen der Bandscheibe konnten wir in diesem Zusammenhang dagegen nicht beobachten.

Bei der operativen Therapie der thorakolumbalen Wirbelsäulenverletzungen sehen wir bei einer rein anterioren Versorgung und Verzicht auf die dorsale Spondylodese die Gefahr einer Unterklassifikation der Verletzung. Ein Alignment des dorsalen Bandapparates kann somit nicht endgültig erkannt und in der Therapieentscheidung berücksichtigt werden. Von vielen Autoren wird aus diesem Grunde die posteriore-anteriore Versorgung von Wirbelfrakturen propagiert [11]. Vorteile der primär dorsalen Spondylodese liegen im geringeren Blutverlust und der wohl kürzeren Operationszeit [8]. Auch kann die Beurteilung des dorsalen Bandapparates das operative Vorgehen und die Prognose beeinflussen. Das primär anteriore Vorgehen bietet den Vorteil der definitiven primären Versorgung und der besseren Dekompression mit Reduktion der Morbidität [26]. Außerdem befindet man sich bei anteriorer Versorgung am Hauptort der Verletzung. Die Zerstörung der vorderen Säule bestimmt dabei in hohem Maße die weitere Prognose [30]. Ferner können Dekompression und Abstützung über einen Zugang kombiniert werden. Der Bandscheibenraum kann ebenso effektiv ausgeräumt und mittels Span oder Cage versorgt werden. Eine Progression der Kyphose wird auf diese Weise verhindert, die im Wesentlichen nach rein dorsaler Versorgung im intervertebralen Raum und nicht im frakturierten Wirbelkörper stattfindet [42]. Wesentlich für das rein anteriore Vorgehen ist jedoch unserer Ansicht nach der intakte dorsale Bandapparat.

Die Reduktion des diagnostischen Aufwandes durch die Sonographie könnte zukünftig das operative Vorgehen beeinflussen, da bei sicherer Identifizierung einer Typ-A-Verletzung mit intaktem dorsalen Bandapparat durch den Ultraschall eine rein ventrale Spondylodese ausreichend sein könnte. So wurden in dieser Studie zwei Patienten durch ein rein ventrales operatives Vorgehen versorgt. Typ-B-Verletzungen bedürfen unserer Ansicht nach auch weiterhin einer zweizeitigen posterioren und anterioren Versorgung, wie sie auch bei 36 % der Patienten dieser Studie durchgeführt wurde. Diese Thematik sollte jedoch auch Gegenstand weiterer Studien sein.

5. Diagnostikprogramm

Unsere Ergebnisse konnten deutlich zeigen, dass weniger als die Hälfte der operativ therapierten Patienten präoperativ durch die Magnetresonanztomographie untersucht wurde. 53 % der Patienten konnten dagegen aufgrund von metallischen Implantaten, Klaustrophobie, der zeitlichen Komponente bei notfallmäßigen Eingriffen oder der Transportbelastung bei einigen polytraumatisierten und beatmeten Patienten gar nicht diesem bildgebenden Verfahren zugeführt werden.

Die Sonographie könnte bei jenem Anteil an Patienten dieses diagnostische Fenster schließen und folglich das therapeutische Vorgehen maßgeblich beeinflussen.

Insgesamt bestätigen unsere Daten, dass der Ultraschall eine diagnostische Alternative zur Magnetresonanztomographie darstellt, die neben Zeit- und Kosteneffizienz auch eine ausreichende Sicherheit bei der Differenzierung zwischen Typ-A- und Typ-B-Verletzungen ermöglicht.

E. Zusammenfassung

In dieser prospektiven klinischen Studie konnten wir anhand von 25 Patienten, die jeweils Frakturen an der thorakalen und/oder lumbalen Wirbelsäule zeigten, ein Untersuchungsprotokoll erstellen. Dabei sollte insbesondere der dorsale Bandkomplex mit dem Lig. supraspinale und Lig. interspinale sowie Zeichen einer möglichen Einblutung in den Bandapparat als indirekter Hinweis eines Alignments betrachtet und beurteilt werden. Dazu wurden alle Patienten mittels Sonographie untersucht und die Verletzungen bezüglich der dorsalen Bandhaft durch einen Chirurgen bewertet. Die Mehrzahl der Patienten konnte ebenso durch die Magnetresonanztomographie untersucht werden. Entsprechende Beurteilungen des Bandapparates folgten in gleicher Weise durch einen unabhängigen Radiologen. Die Befunde der sonographischen Untersuchung waren ihm zu diesem Zeitpunkt jedoch nicht bekannt. 19 Patienten wurden dann primär operativ versorgt. Dabei folgte ebenso die intraoperative Kontrolle des dorsalen Bandapparates und die Beurteilung sämtlicher Strukturen. Die Ergebnisse der bildgebenden Diagnostik waren dem Operateur zuvor nicht mitgeteilt worden.

Auf diese Weise konnten die wir die Ergebnisse der Sonographie mit den tatsächlichen Befunden der Operation sowie bei den konservativ therapierten Patienten mit den Beurteilungen der MRT vergleichen. Anhand einer Vierfeldertafel konnten wir dann Angaben zur Sensitivität und Spezifität der Sonographie in der Bewertung einer Verletzung des Lig. supraspinale und/oder Lig. interspinale sowie in der Beurteilung einer Einblutung in den dorsalen Bandapparat im Vergleich zu den intraoperativen Befunden bzw. der MRT machen. Ferner konnten wir diese bedingten Wahrscheinlichkeiten auch für den posterioren Ligamentkomplex, bestehend aus diesen drei beurteilten anatomischen Strukturen, angeben.

Unsere Ergebnisse konnten zeigen, dass die Sonographie mit einer Sensitivität von 84 % und einer Spezifität von 93 % bei einer Bewertung des PLC eine der Magnetresonanztomographie vergleichbare

Vorhersagesicherheit bietet. In der Darstellung von Verletzungen des Lig. supraspinale konnten wir sogar höhere Werte für Sensitivität und Spezifität im Vergleich zur MRT angeben. Obwohl bei der Beurteilung einer Einblutung in den dorsalen Bandapparat die bedingten Wahrscheinlichkeiten teilweise unter derer der ligamentären Strukturen lagen, haben wir diesen Teilaspekt trotzdem berücksichtigt. Zeichen einer Einblutung können dabei als Hinweis einer sonographisch nicht sichtbaren fibrillären Läsion der dorsalen Bandhaft verstanden werden.

Obwohl mehrere Studien zeigen konnten, dass die Magnetresonanztomographie in der Beurteilung des PLC eine hohe Sensitivität und Spezifität aufweist [21, 31], sind dieser diagnostischen Methode Grenzen gesetzt [27]. Kontraindikationen wie ferromagnetische Implantate, Klaustrophobie oder die Transportbelastung bei polytraumatisierten und beatmeten Patienten schränken dessen Einsatzbereich ein. Außerdem ist derzeit in vielen Kliniken eine Magnetresonanztomograph noch nicht verfügbar oder bei fehlendem Bereitschaftsdienst nicht ständig disponibel.

Insgesamt bestätigen unsere Daten, dass mit dem Ultraschall eine diagnostische Alternative zur Magnetresonanztomographie besteht, die gut durchführbar und leicht erlernbar ist, sowie neben einer guten Verfügbarkeit die Vorteile der Zeit- und Kosteneffizienz bietet. Eine sichere Differenzierung zwischen Typ-A- und Typ-B-Verletzungen scheint uns mittels Ultraschall möglich, die dann das operative Vorgehen zu beeinflussen vermag. Bei sicherer Identifizierung einer Typ-A-Verletzung durch die Sonographie könnte ein anteriores Vorgehen mit rein ventraler Spondylodese ausreichend sein. Damit könnte nicht zuletzt auch aufgrund der definitiven primären Versorgung die Prognose verbessert und die Morbidität reduziert werden [26].

F. Literaturverzeichnis

1. Adams MA: Mechanical testing of the spine - an appraisal of methodology, results, and conclusions. *Spine* (1995), 20: 2151-2156
2. An HS, Vaccaro A, Cotler JM, Lin S: Low lumbar burst fractures. Comparison among body cast, Harrington rod, Luque rod, and Steffee plate. *Spine* (1991), 16: 440-444
3. Andreychik DA, Alander DH, Senica KM, Stauffer ES: Burst fractures of the second through fifth lumbar vertebrae. Clinical and radiographic results. *J Bone Joint Surg (Am)* (1996), 78: 1156-1166
4. Been HD, Bouma GJ: Comparison of two types of surgery for thoraco-lumbar burst fractures: combined anterior and posterior stabilisation vs. posterior instrumentation only. *Acta Neurochir (Wien)* (1999), 141: 349-357
5. Benninghoff A, Drenckhahn D: Anatomie, Makroskopische Anatomie Histologie Embryologie Zellbiologie, Band 1, Zelle Gewebe Entwicklung Skelett- und Muskelsystem Harn- und Genitalsystem. 16. Aufl. Urban & Fischer; München & Jena; (2002)
6. Brightman RP, Miller CA, Rea GL, Chakeres DW, Hunt WE: Magnetic resonance imaging of trauma to the thoracic and lumbar spine. The importance of the posterior longitudinal ligament. *Spine* (1992), 17: 541-550
7. Chance CQ: Note on a type of flexion fracture of the spine. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule*. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 256
8. Danisa OA, Shaffrey CI, Jane JA, Whitehill R, Wang GJ, Szabo TA, Hansen CA, Shaffrey ME, Chan DP: Surgical approaches for the correction of unstable thoracolumbar burst fractures: a retrospective analysis of treatment outcomes. *J Neurosurg* (1995), 83: 977-983
9. Denis F: The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule*. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 242
10. Denis F, Ruiz H, Searls K: Comparison between square-ended distraction rods and standard round-ended distraction rods in the

- treatment of thoracolumbar spinal injuries. A statistical analysis. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 246
11. Dimar JR, Wilde PH, Glassmann SD, Puno RM, Johnson JR: Thoracolumbar burst fractures treated with combined anterior and posterior surgery. *Am J Orthop* (1996), 25: 159-165
 12. Duru F, Luechinger R, Candinas R: MR imaging in patients with cardiac pacemakers. *Radiology* (2000), 215: 869-879
 13. El-Khoury GY, Kathol MH, Daniel WW: Imaging of acute injuries of the cervical spine: value of plain radiography, CT, and MR imaging. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 23
 14. Fang D, Leong JC, Cheung HC: The treatment of thoracolumbar spinal injuries with paresis by conservative versus surgical methods. *Ann Acad Med Singapore* (1982), 11: 203-206
 15. Flanders AE, Schaefer DM, Doan HT, Mishkin MM, Gonzalez CF: Acute cervical spine trauma: correlation of MR imaging findings with degree of neurologic deficit. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 23
 16. Gehweiler JA, Osborne RL, Becker RF: The radiology of vertebral trauma. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 242
 17. Georgy BA, Hesselink JR: MR imaging of the spine: recent advances in pulse sequences and special techniques. *Am J Roentgenol* (1994), 162: 923-934
 18. Gertzbein SD: Scoliosis Research Society. Multicenter spine fracture study. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 242
 19. Gillespie KA, Dickey JP: Biomechanical role of lumbar spine ligaments in flexion and extension: determination using a parallel linkage robot and a porcine model. *Spine* (2004), 29: 1208-1216
 20. Goldberg RM, Rowan L, Anderson RE: Thoracic vertebral fracture as a complication of cardiopulmonary resuscitation. In: Tscherne H,

- Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 23
21. Haba H, Taneichi H, Kotani Y, Terae S, Abe S, Yoshikawa H, Abumi K, Minami A, Kaneda K: Diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging for detecting posterior ligamentous complex injury associated with thoracic and lumbar fractures. *J Neurosurg* (2003), 99: 20-26
 22. Hindle RJ, Pearcy MJ, Cross A: Mechanical function of the human lumbar interspinous and supraspinous ligaments. *J Biomed Eng* (1990), 12: 340-344
 23. Holmes JF, Mirvis SE, Panacek EA, Hoffman JR, Mower WR, Velmahos GC: Variability in computed tomography and magnetic resonance imaging in patients with cervical spine injuries. *J Trauma* (2002), 53: 524-530
 24. Ho HS: Safety of metallic implants in magnetic resonance imaging. *J Magn Reson Imaging* (2001), 14: 472-477
 25. James KS, Wenger KH, Schlegel JD, Dunn HK: Biomechanical evaluation of the stability of thoracolumbar burst fractures. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule*. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 246
 26. Kaneda K, Abumi K, Fujiya M: Burst fractures with neurologic deficits of the thoracolumbar-lumbar spine. Results of anterior decompression and stabilization with anterior instrumentation. *Spine* (1984), 9: 788-795
 27. Kauffmann G, Moser E, Sauer R: *Radiologie*. 2. Aufl. Urban & Fischer; München & Jena; (2002)
 28. Kaye JJ, Nance EPJ: Thoracic and lumbar spine trauma. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule*. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 242
 29. Keene JS, Goletz TH, Lilleas F, Alter AJ, Sackett JF: Diagnosis of vertebral fractures. A comparison of conventional radiography, conventional tomography and computed axial tomography. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule*. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 271

30. Knop C, Blauth M, Bastian L, Lange U, Becker T, Tscherne H: Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule – Spätergebnisse nach dorsaler Instrumentierung und ihre Konsequenzen. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 287
31. Lee HM, Kim HS, Kim DJ, Suk KS, Park JO, Kim NH: Reliability of magnetic resonance imaging in detecting posterior ligament complex injury in thoracolumbar spinal fractures. Spine (2000), 25: 2079-2084
32. Lindahl S, Willen J, Nordwall A, Irstam L: The crush-cleavage fracture. A "new " thoracolumbar unstable fracture. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 252
33. Magerl F, Aebi M, Gertzbein SD, Harms J, Nazarian S: A comprehensive classification of the thoracic and lumbar injuries. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 246
34. Magerl F, Engelhardt P: Brust- und Lendenwirbelsäule – Verlaufsformen. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 242
35. Maiman DJ, Pintar FA: Anatomy and clinical biomechanics of the thoracic spine. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 243
36. McAfee PC, Yuan HA, Fredrickson BE, Lubicky JP: The value of computed tomography in thoracolumbar fractures. An analysis of one hundred consecutive cases and a new classification. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 242
37. Melton LJ, Kann SH, Frye MA, Wahner HW, O`Fallon WM, Riggs BL: Epidemiology of vertebral fractures in woman. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 270
38. Meyer PR, Heim S: Fractures of the thoracic spine T₁-T₁₀. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): Unfallchirurgie Wirbelsäule. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 242

39. Moon SH, Park MS, Suk KS, Suh JS, Lee SH, Kim NH, Lee HM: Feasibility of ultrasound examination in posterior ligament complex injury of thoracolumbar spine fracture. *Spine* (2002), 27: 2154-2158
40. Nachemson AL, Evans JH: Some mechanical properties of the third human lumbar interlaminar ligament (ligamentum flavum). In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule*. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 243
41. Oner FC, Gils AP van, Faber JA, Dhert WJ, Verbout AJ: Some complications of common treatment schemes of thoracolumbar spine fractures can be predicted with magnetic resonance imaging: prospective study of 53 patients with 71 fractures. *Spine* (2002), 27: 629-636
42. Oner FC, Rijt RR van der, Ramos LM, Dhert WJ, Verbout AJ: Changes in the disc space after fractures of the thoracolumbar spine. *J Bone Joint Surg (Br)* (1998), 80: 833-839
43. Oner FC, Ramos LM, Simmermacher RK, Kingma PT, Diekerhof CH, Dhert WJ, Verbout AJ: Classification of thoracic and lumbar spine fractures: problems of reproducibility. A study of 53 patients using CT and MRI. *Eur Spine J* (2002), 11: 235-245
44. Petersilge CA, Pathria MN, Emery SE, Masaryk TJ: Thoracolumbar burst fractures: evaluation with MR imaging. *Radiology* (1995), 194: 49-54
45. Putz R, Pabst R: *Sobotta, Atlas der Anatomie des Menschen, Band 2, Rumpf Eingeweide untere Extremität*. 21. Aufl. Urban & Fischer; München & Jena; (2000)
46. Reid DC, Hu R, Davis LA, Saboe LA: The nonoperative treatment of burst fractures of the thoracolumbar junction. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule*. Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 242
47. Rüter A, Reilmann H, Nast-Kolb D: Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule. *Unfallchirurg* (2003), 106: 55-69
48. Saifuddin A, Noordeen H, Taylor BA, Bayley I: The role of imaging in the diagnosis and management of thoracolumbar burst fractures:

- current concepts and a review of the literature. *Skeletal Radiol* (1996), 25: 603-613
49. Scoles PV, Linton AE, Latimer B, Levy ME, Digiovanni BF: Vertebral body and posterior element morphology: the normal spine in middle life. *Spine* (1988), 13: 1082-1086
 50. Terk MR, Hume-Neal M, Fraipont M, Ahmadi J, Colletti PM: Injury of the posterior ligament complex in patients with acute spinal trauma: evaluation by MR imaging. *Am J Roentgenol.* (1997), 168: 1481-1486
 51. Tscherne H, Blauth M: *Unfallchirurgie Wirbelsäule.* Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998)
 52. Whitesides TE: Traumatic kyphosis of the thoracolumbar spine. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule.* Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 246
 53. Willen J, Lindahl S, Irstam L, Aldman B, Nordwall A: The thoracolumbar crush fracture. An experimental study on instant axial dynamic loading: the resulting fracture type and its stability. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule.* Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 271
 54. Williams D, Baggoley C, Wortzman D: Recognition of thoracic/lumbar spinal fractures in the multiple traumapatient. In: Tscherne H, Blauth M (Hrsg.): *Unfallchirurgie Wirbelsäule.* Springer; Berlin Heidelberg New York; (1998) 269

G. Anhang

Nr.	Name	Vorname	Geb.-Datum	Alter	Geschlecht	Unfalltag	Unfallmechanismus	Klinik	Wirbelkörper	Level	Radiologie
1	-	-	15.02.1963	40	männlich	03.12.2003	Verkehrsunfall Fußgänger	Druckdolenz	LWK 3	LWK 3-5	Impressionsfraktur
2	-	-	01.02.1952	51	männlich	29.11.2003	Sturz aus großer Höhe	spontane Beschwerden	LWK 1	BWK 11 – LWK2	Impressionsfraktur
3	-	-	20.03.1987	16	männlich	21.11.2003	Verkehrsunfall	spontane Beschwerden	BWK 4-6	BWK 1-10	Kompressionsfraktur
4	-	-	24.02.1987	16	weiblich	10.12.2003	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	BWK 12	BWK 11 – LWK2	Querfraktur
5	-	-	28.10.1950	53	männlich	02.01.2004	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	BWK 12	BWK 11 – LWK2	Kantenaussprengung
6	-	-	01.01.1963	21	männlich	08.01.2004	Sonstiges	spontane Beschwerden	LWK 2	BWK 11 – LWK2	Kompressionsfraktur
7	-	-	11.08.1951	52	weiblich	30.01.2004	Sonstiges	Druckdolenz	LWK 1	BWK 11 – LWK2	Impressionsfraktur
8	-	-	08.05.1962	21	männlich	05.02.2004	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	BWK 5-11	BWK 1-10	Impressionsfraktur
9	-	-	11.07.1933	70	männlich	14.02.2004	Sturz aus großer Höhe	o. B.	BWK 12, LWK 4	BWK 11 – LWK2	Impressionsfraktur
10	-	-	16.08.1942	61	männlich	27.02.2004	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	BWK 2,4,6 u. 7	BWK 1-10	Kompressionsfraktur
11	-	-	01.01.1954	50	weiblich	19.03.2004	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	LWK 1	BWK 11 – LWK2	Kompressionsfraktur
12	-	-	14.03.1979	25	männlich	23.04.2004	Verkehrsunfall	spontane Beschwerden	BWK 8	BWK 1-10	Kompressionsfraktur
13	-	-	28.01.1950	54	männlich	24.04.2004	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	LWK 1	BWK 11 – LWK2	Impressionsfraktur
14	-	-	28.05.1964	39	männlich	24.04.2004	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	BWK 3-4, 6	BWK 1-10	Kompressionsfraktur
15	-	-	04.10.1933	70	männlich	30.04.2004	Verkehrsunfall	Diastase der Dornfortsätze	BWK 1-2	BWK 1-10	Dorn- oder Querfortsatzfraktur
16	-	-	04.10.1933	70	männlich	30.04.2004	Verkehrsunfall	Diastase der Dornfortsätze	BWK 11-12	BWK 11 – LWK2	Diskoligamentäre Verletzungen
17	-	-	22.10.1968	35	weiblich	16.05.2004	Verkehrsunfall	Druckdolenz	BWK 6-8	BWK 1-10	Impressionsfraktur
18	-	-	28.04.1985	19	männlich	30.05.2004	Verkehrsunfall	spontane Beschwerden	LWK 1	BWK 11 – LWK2	Impressionsfraktur
19	-	-	30.10.1963	20	männlich	05.06.2004	Verkehrsunfall	Druckdolenz	LWK 1	BWK 11 – LWK2	Kompressionsfraktur
20	-	-	09.11.1942	61	weiblich	21.06.2004	Verkehrsunfall	Druckdolenz	BWK 12	BWK 11 – LWK2	Impressionsfraktur
21	-	-	09.11.1942	61	weiblich	21.06.2004	Verkehrsunfall	Druckdolenz	LWK 2	BWK 11 – LWK2	Impressionsfraktur
22	-	-	22.08.1957	46	weiblich	06.07.2004	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	BWK 12	BWK 11 – LWK2	Kompressionsfraktur
23	-	-	22.08.1957	46	weiblich	06.07.2004	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	LWK 2	BWK 11 – LWK2	Kompressionsfraktur
24	-	-	19.09.1985	19	männlich	20.08.2004	Verkehrsunfall	Druckdolenz	BWK 12	BWK 11 – LWK2	Impressionsfraktur
25	-	-	11.07.1944	60	männlich	05.09.2004	Sturz aus großer Höhe	Druckdolenz	LWK 4	LWK 3-5	Impressionsfraktur

Tab. 7 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 1, allgemeine Patienteninformationen

Nr.	Datum	SSL	Höhe	ISL	Höhe	LF	Höhe	Hämatom	Höhe
1	05.12.2003	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
2	05.12.2003	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
3	05.12.2003	Ruptur	BWK 3-4	Ruptur	BWK 3-4	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
4	05.12.2003	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	Einblutung	BWK 10 – LWK 1
5	04.12.2003	Ruptur	BWK 12 – LWK 1	Ruptur	BWK 12 – LWK 1	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
6	09.01.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
7	01.02.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
8	09.02.2004	o. B.	-	Ruptur	BWK 6-8	nicht beurteilbar	-	Einblutung	BWK 6-8
9	17.02.2004	Ruptur	BWK 12 – LWK 1	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
10	29.02.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
11	20.03.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	Einblutung	LWK 1-2
12	26.04.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	Einblutung	BWK 8-9
13	25.04.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
14	26.04.2004	Ruptur	BWK 3-4	Ruptur	BWK 3-4	nicht beurteilbar	-	Einblutung	BWK 3-4
15	02.05.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	Einblutung	BWK 1-2
16	02.05.2004	Ruptur	BWK 11-12	Ruptur	BWK 11-12	nicht beurteilbar	-	Einblutung	BWK 11-12
17	17.05.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
18	01.06.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
19	05.06.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
20	21.06.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
21	21.06.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
22	06.07.2004	o. B.	-	Ruptur	BWK 12 – LWK 1	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
23	06.07.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
24	20.08.2004	Ruptur	BWK 11-12	Ruptur	BWK 11-12	nicht beurteilbar	-	o. B.	-
25	06.09.2004	o. B.	-	o. B.	-	nicht beurteilbar	-	o. B.	-

Tab. 8 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 2, Sonographiebefunde

Nr.	Datum	SSL	Höhe	ISL	Höhe	LF	Höhe	Hämatom	Höhe
1	05.12.2003	o. B.	-	Ruptur	LWK 3-4	o. B.	-	o. B.	-
2	05.12.2003	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
3	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
4	12.12.2003	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
5	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
6	09.01.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
7	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
8	11.11.2004	o. B.	-	Ruptur	BWK 6-8	o. B.	-	Einblutung	BWK 6-8
9	16.02.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
10	02.03.2004	o. B.	-	Ruptur	BWK 7-8	o. B.	-	o. B.	-
11	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
12	29.04.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
13	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
14	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
15	04.05.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	Einblutung	BWK 1-2
16	04.05.2004	Ruptur	BWK 11-12	Ruptur	BWK 11-12	o. B.	-	Einblutung	BWK 11-12
17	17.05.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
18	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
19	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
20	22.06.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
21	22.06.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
22	07.07.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
23	07.07.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
24	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
25	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-

Tab. 9 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 3, Magnetresonanztomographiebefunde

Nr.	Datum	SSL	Höhe	ISL	Höhe	LF	Höhe	Hämatom	Höhe
1	05.12.2003	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
2	09.12.2003	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
3	08.12.2003	Ruptur	BWK 3-4	Ruptur	BWK 3-4	o. B.	-	Einblutung	BWK 3-4
4	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
5	05.01.2004	Ruptur	BWK 12 – LWK 1	Ruptur	BWK 12 – LWK 1	o. B.	-	Einblutung	BWK 12 – LWK 1
6	11.01.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
7	02.02.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
8	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
9	20.02.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
10	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
11	20.03.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	Einblutung	LWK 1-2
12	12.05.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
13	24.04.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
14	26.04.2004	Ruptur	BWK 3-4	Ruptur	BWK 3-4	o. B.	-	Einblutung	BWK 3-4
15	01.05.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	Einblutung	BWK 1-2
16	01.05.2004	Ruptur	BWK 11-12	Ruptur	BWK 11-12	o. B.	-	Einblutung	BWK 11-12
17	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
18	31.05.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
19	06.06.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
20	22.06.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
21	22.06.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-
22	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
23	.	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-	nicht beurteilbar	-
24	21.08.2004	Ruptur	BWK 11-12	Ruptur	BWK 11-12	o. B.	-	o. B.	-
25	07.09.2004	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-	o. B.	-

Tab. 10 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 4, Operationsbefunde

Nr.	Klassifikation nach Magerl	Therapie
1	A 2.3	ventrale Spondylodese
2	A 2.3	ventrale Spondylodese
3	B 1.2	dorsale Spondylodese
4	A 2.1	konservativ
5	B 1.2	dorsale und ventrale Spondylodese
6	A 3.1	dorsale und ventrale Spondylodese
7	A 3.3	dorsale und ventrale Spondylodese
8	A 3.1	konservativ
9	A 3.1	dorsale Spondylodese
10	A 3.1	konservativ
11	A 3.3	dorsale und ventrale Spondylodese
12	A 3.3	dorsale Spondylodese
13	A 3.2	dorsale und ventrale Spondylodese
14	B 1.2	dorsale Spondylodese
15	A 3.1	konservativ
16	B 1.2	dorsale Spondylodese
17	A 3.1	konservativ
18	A 3.3	dorsale und ventrale Spondylodese
19	A 3.1	dorsale und ventrale Spondylodese
20	A 2.3	dorsale Spondylodese
21	A 3.1	dorsale Spondylodese
22	A 3.1	konservativ
23	A 3.1	konservativ
24	B 1.2	dorsale und ventrale Spondylodese
25	A 2.3	dorsale und ventrale Spondylodese

Tab. 11 Untersuchungsprotokoll, Teilbereich 5, Klassifikation und Therapie

Für die Unterstützung, Anregungen und Kritik bei der Durchführung dieser Arbeit danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Michael J. Raschke, Herrn Dr. med. Thomas Vordemvenne, Herrn Dr. med. Volker Vieth, Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Marc Schult sowie Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Christian Götze.

Münster, im November 2007

Lebenslauf

Tobias Hüppe

Persönliche Daten

geboren am 17. Juni 1980

ledig

römisch-katholisch

Schule

06/1999

Abitur am Vestischen Gymnasium Kirchhellen

Zivildienst

08/1999-06/2000

St.-Antonius-Krankenhaus Kirchhellen

Studium

04/2001-12/2007

Studium der Humanmedizin an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

09/2003

Ärztliche Vorprüfung

08/2006-12/2006

Tertial „Wahlfach“ an der Klinik für Anästhesiologie und operative Intensivmedizin, St.-Marien-Hospital Lünen

12/2006-04/2007

Tertial „Innere Medizin“ an der Medizinischen Klinik I und II, Mathias-Spital Rheine

04/2007-07/2007

Tertial „Chirurgie“ an den Kliniken Chirurgie und Orthopädie/Traumatologie, Bürgerspital Solothurn, Schweiz

10/2007-12/2007

Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

Promotion

12/2003-02/2007

Dissertation an der Klinik und Poliklinik für Unfall-, Hand und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum Münster zum Thema „Wertigkeit des Ultraschalls in der Diagnostik ligamentär instabiler Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule - eine prospektiv vergleichende Studie zum MRT“

Kirchhellen, den 15. November 2007