

Redaktion
R. Graf · Stolzalpe
J. Löhr · Zürich
C.J. Wirth · Hannover

Die Beiträge der Rubrik „Weiterbildung“ sollen dem Stand des zur Facharztprüfung für den Orthopäden notwendigen Wissens entsprechen und zugleich dem Facharzt als Repetitorium dienen. Die Rubrik beschränkt sich auf klinisch gesicherte Aussagen zum Thema.

► **Stabilität: die Fähigkeit, unter physiologischen Belastungen das Alignment zu bewahren, den Körper zu stützen und das Myelon zu schützen**

► **Drei-Säulen-Modell**

H. Hawighorst¹ · M.F. Berger¹ · P. Moulin² · G.A. Zäch³

¹ Abt. Radiologie, Schweizer Paraplegiker-Zentrum, Nottwil/Schweiz

² Abt. für Wirbelsäulen-Chirurgie und Orthopädie, Schweizer Paraplegiker-Zentrum, Nottwil/Schweiz

³ Direktionspräsident, Schweizer Paraplegiker-Zentrum, Nottwil/Schweiz, (Klinikdirektion: Dr.D. Michel)

MRT bei spinoligamentären Verletzungen*

Wirbelsäulenverletzungen

Im klinischen Alltag stellt die Frage der Stabilität von Wirbelsäulenverletzungen häufig einen Diskussionspunkt zwischen Orthopäden und Neurochirurgen, Radiologen und anderen Ärzten dar, die Wirbelsäulenverletzungen behandeln. Dieses Thema ist insofern wichtig, als der Entschluss zur operativen Intervention vorwiegend auf den Punkten Stabilität und Spinalkanaleinengung beruht.

Wie sollte ► **Stabilität** definiert werden? Die Wirbelsäulenstabilität ist als die Fähigkeit definiert, unter physiologischen Belastungen das Alignment zu bewahren, den Körper zu stützen und das Myelon zu schützen. Die Stabilität hängt hierbei von der Unversehrtheit der tragenden Skelettkomponenten, der Zwischenwirbelscheiben, der Facettengelenke und der Bandstrukturen ab.

Meist liegt eine kombinierte Verletzung von o. g. Strukturen vor, die zu der Einschätzung einer Wirbelsäuleninstabilität führt. Eine instabile Wirbelsäule erfordert eine operative Stabilisierung, um das beste funktionelle Ergebnis zu erzielen.

Allgemeine Zeichen der Wirbelsäulenstabilität bzw. -instabilität

Das Konzept der Wirbelsäulenstabilität hat sich erst in den letzten 4 Dekaden entwickelt [1]. Die Untersuchungen von Roaf führten zum Konzept des Zwei-Säulen-Modells der Wirbelsäule. Die Trennlinie zwischen vorderer und hinterer Säule war das hintere Längsband. Die vordere Säule umfasst hierbei die vorderen Wirbelstrukturen (vorderes Längsband, Wirbelkörper, Zwischenwirbelscheibe), die hintere die Strukturen dorsal des hinteren Längsbandes (Wirbelbogen, Facettengelenke, dorsale Bandstrukturen).

Die Erkenntnis, dass bereits Verletzungen der Bandstrukturen oder der Zwischenwirbelscheibe zu einer Instabilität führen können, führten insbesondere im Bereich der thorakolumbalen Wirbelsäule Anfang der 80er Jahre zu der biomechanischen Theorie durch Denis [3] mit dem ► **Drei-Säulen-Modell**. Die vordere Säule wird durch die vorderen 2/3 der Wirbelkörper und der Bandscheibe gebildet, die mittlere Säule durch das hintere Drittel der Wirbelkörper und der Bandscheibe (einschließlich hinterem Längsband) und die hintere Säule durch den vorderen Wirbelbogen (Pedikle, Facettengelenke), den hinteren Wirbelbogen (Lamina) und durch die dorsalen Bandstrukturen. Denis konnte dabei zeigen, dass eine Instabilität nur bei Verletzung mindestens zweier Säulen auftritt.

Eine Übersicht über wichtige relevante Strukturen und Konturlinien für die Bildbefundung mit Zeichen des Traumas zeigt Abb. 1.

*Erstpublikation in Der Radiologe (2001) 41:307-322

Priv.-Doz. Dr. Hans Hawighorst
Schweizer Paraplegiker-Zentrum (SPZ), Postfach, 6207 Nottwil/Schweiz,
E-mail: Hans.Hawighorst@bluewin.ch, www.paranet.ch

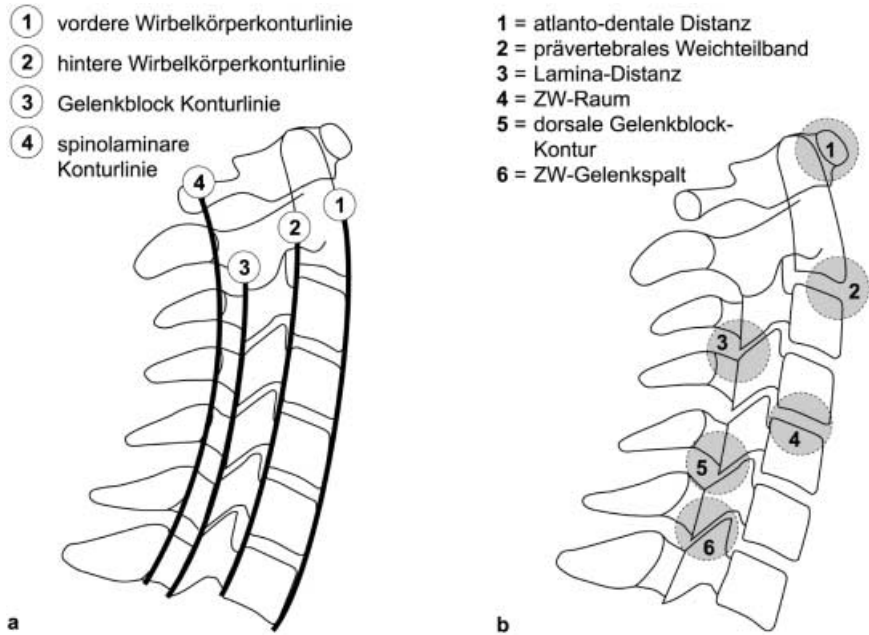


Abb. 1 ▲ Relevante Konturlinien im Bereich der HWS mit wichtigen Zeichen des Traumas, relevant für die Bildanalyse (z. B. sagittale MR-Bilder) beim HWS-Trauma

► Flexions- (Typ A), Extensions- (Typ B) und Rotationsverletzungen (Typ C)

► Radiologische Befunde

In den letzten Jahren wurde aber auch dieses Modell wieder verlassen, und heute wird vielerorts das Zwei-Säulen-Modell wieder zur Klassifikation herangezogen, welches nur noch eine vordere und eine hintere Säule kennt. Die vordere Säule umfasst dabei nur den Wirbelkörper, die dorsale Säule alle Strukturen dorsal des Wirbelkörpers. Nach den Arbeiten von Magerl [2] unterteilt man Wirbelsäulenverletzungen in ► Flexions- (Typ A), Extensions- (Typ B) und Rotationsverletzungen (Typ C) (Abb. 2).

Die Klassifikation nach Magerl (Typ A-, B-, C-Verletzung) erleichtert nicht nur die Einteilung von Wirbelsäulenverletzungen im radiologisch-klinischen Alltag, sondern eignet sich auch zur Klassifikation von Verletzungen der unteren HWS und der thorakolumbalen Wirbelsäule (Abb. 1).

Im Wesentlichen weist mindestens einer der folgenden ► radiologischen Befunde auf eine Instabilität hin:

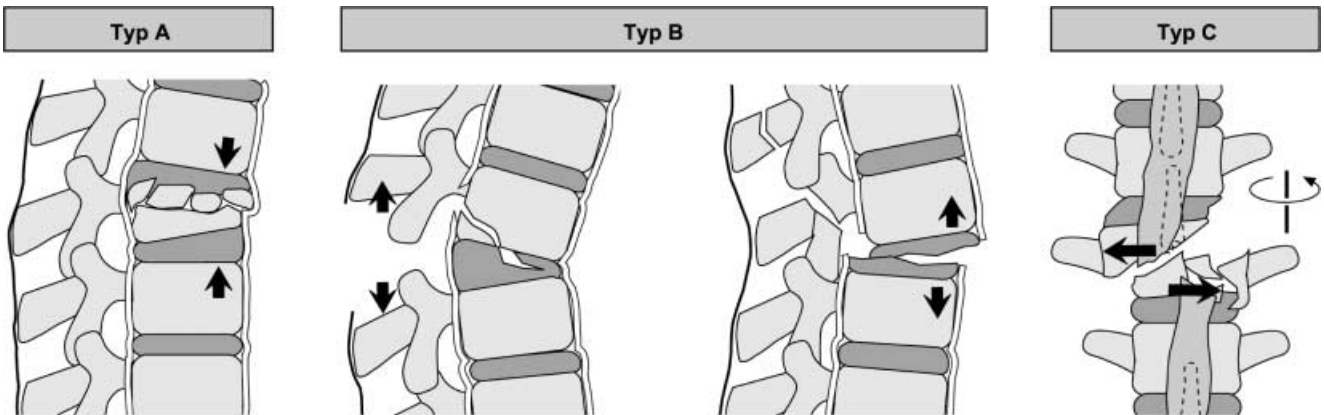


Abb. 2 ▲ Zwei-Säulen-Modell nach Magerl. Grundsätzlich unterscheidet man bei diesem Schema 3 Hauptverletzungstypen. Dieses Schema kann sowohl zur Klassifikation von Verletzungen der unteren HWS als auch der thorakolumbalen Wirbelsäule herangezogen werden! Flexionsverletzung (Typ A). Kompression ausschließlich der vorderen Säule (nur der Wirbelkörper ist betroffen). Extensionsverletzung (Typ B) mit Beteiligung der hinteren Säule, seltener auch der vorderen Säule (häufig durch eine Distraktionskraft verursacht). Rotationsverletzung (Typ C)

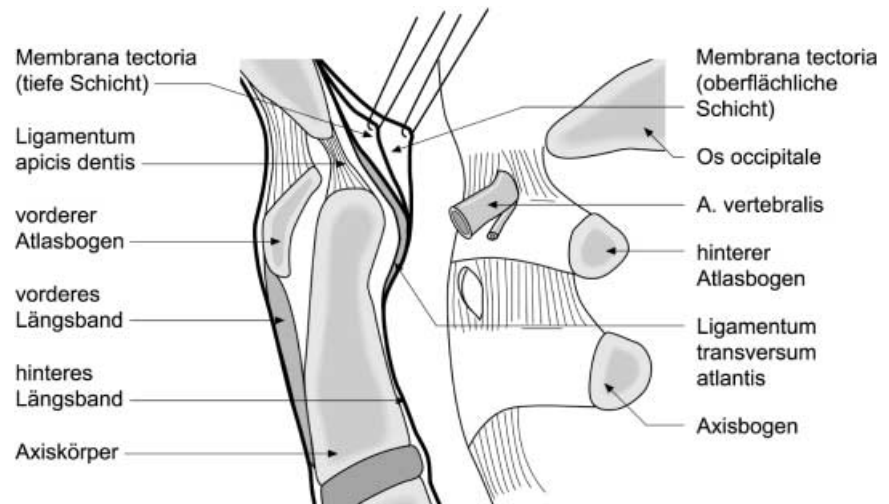


Abb. 3 ▲ Der Sagittalschnitt zeigt die wichtigen Bänderbeziehungen des kraniovertebralen Überganges

- ▶ Wirbelverschiebung >2 mm (nicht bei Kindern!),
- ▶ erweiterter interlaminarer oder interspinöser Raum,
- ▶ horizontale Verletzung der Zwischenwirbelscheibe,
- ▶ klaffende Facettengelenke,
- ▶ verbreiteter horizontaler Bogenwurzelabstand,
- ▶ eine unterbrochene Wirbelkörperhinterkante.

MRI bei Wirbelsäulenverletzungen

Die Erkenntnis, dass nicht nur knöchernen Verletzungen der Wirbelsäule eine Instabilität hervorrufen können, sondern auch Verletzungen der Zwischenwirbelscheiben und der Bandstrukturen, haben zur Etablierung der MRT bei Wirbelsäulenverletzungen geführt. Hierbei ist die MRT gerade zum Nachweis von Bandrupturen, Diskusherniation, Epi- und Subduralhämatomen, Myelonverletzungen und der muskulären Weichteilstrukturen hervorragend geeignet. Darüber hinaus liefert die ▶**MR-Angiographie** gerade bei Verletzungen der Halswirbelsäule wichtige Informationen über eine mögliche Läsion der A. vertebralis.

Spezielle Formen von Wirbelsäulenverletzungen

Dieser spezielle Teil ist in 3 Abschnitte gegliedert. Der 1. Abschnitt illustriert Verletzungen der Halswirbelsäule, der 2. Abschnitt Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule, und der letzte Abschnitt beschäftigt sich mit Aspekten der MR-Bildgebung.

Verletzungen der Halswirbelsäule (HWS)

Anatomische Betrachtungen der HWS-Gelenke und Bänder

Eine detaillierte Betrachtung der Wirbelsäulenanatomie liegt außerhalb des Rahmen dieses Textes, eine umfassende Beschreibung findet der interessierte Leser z. B. in dem Buch von Gehweiler et al. [3].

Die Wirbelkörper sind durch 2 Bänder untereinander in vertikaler Richtung verbunden, dem vorderen und hinteren Längsband (Übersicht in Abb. 3). Das ▶**vordere Längsband** liegt an der Wirbelkörpervorderkante und entspringt am Okziput. Das ▶**hintere Längsband** liegt auf der Wirbelkörperhinterfläche, entspringt am Axiskörper und verschmilzt nach kranial mit der Membrana tectoria (Abb. 3). Wichtig ist, dass das hintere Längsband fest mit den Zwischenwirbelscheiben verbunden ist. Dorsal der Wirbelkörper liegen die Facettengelenke, bei denen es sich um wichtige synoviale Gelenke handelt. Als Besonderheit gibt es in der HWS die Unkovertebralgelen-

Die Erkenntnis, dass neben knöchernen Verletzungen auch Verletzungen der Zwischenwirbelscheiben und der Bandstrukturen zur Instabilität führen können, haben zur Etablierung der MRT bei Wirbelsäulenverletzungen geführt.

▶ MR-Angiographie

▶ Vorderes Längsband

▶ Hinteres Längsband

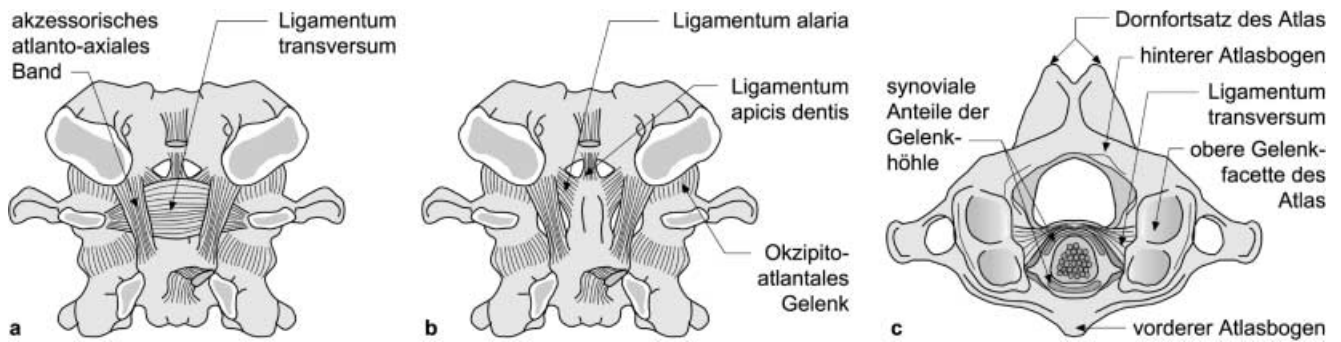


Abb. 4 ▲ Axiale und dorsale Ansicht der ligamentären Strukturen im kraniovertebralen Übergang. a Ansicht von dorsal. b Ansicht von dorsal nach Entfernung des Lig. transversum. c Ansicht von axial in der Höhe des Dens

- ▶ Atlantoaxiales Gelenk
- ▶ Membran atectoria
- ▶ Lig. cruciforme atlantis

▶ „Check-Ligamente“

Typische Verletzungslokalisationen sind Wirbelsäulenabschnitte mit hoher Beweglichkeit.

ke. Die Procc. uncinati entspringen dorsokranial am Wirbelkörper und verhindern wahrscheinlich eine Lateralverschiebung bei der HWS.

Das ▶ atlantoaxiale Gelenk ist komplex und beinhaltet wichtige Bandstrukturen. Die ▶ Membrana tectoria, die vom hinteren Längsband nach kranial zur Okziputinnenfläche zieht, bedeckt den Dens und die Bänder. Dicht ventral dieser Membrana tectoria liegt das ▶ Lig. cruciforme atlantis, welches 2 Komponenten besitzt, einen queren (Lig. transversum) und einen vertikalen Anteil (Fasciculus longitudinalis) (Abb. 4). Das Lig. transversum setzt an den kleinen Höckerchen an der Innenseite der Massae laterales an und hält den Dens fest gegen den vorderen Atlasbogen. Eine weitere sehr wichtige Struktur sind die Ligg. alaria. Dies sind paarige Bänder, die vom Dens seitlich zum Rand des Foramen magnum ziehen. Diese Ligamente werden auch ▶ „Check-Ligamente“ genannt, da diese eine übermäßige Bewegung zwischen Axis und Atlas verhindern.

Lokalisation

Verletzungen der HWS treten in ungleichmäßiger Verteilung auf. Typische Verletzungslokalisationen sind Wirbelsäulenabschnitte mit hoher Beweglichkeit, wie zwischen C1 und C2 und am Übergang von relativ starren zu beweglichen Abschnitten, also am zervikothorakalen Übergang Höhe C5–Th1.

Bildanalyse

Die für die Röntgenanalyse wichtigen Strukturen sind in Abb. 1 dargestellt. Bei der Bildanalyse sollten folgende Punkte beachtet werden:

- ▶ Die Klivusspitze steht normalerweise über der vorderen Krümmung der Densspitze.
- ▶ Die Überprüfung der Distanzen, wie der atlantodentale Abstand (beträgt beim Erwachsenen 2,0–2,5 mm, beim Kind bis zu 5,0 mm), die Weite der Zwischenwirbelräume und der interlaminaire Abstand.
- ▶ Die Überprüfung des vorderen und hinteren Alignments einschließlich der spinolaminaren Konturlinie (Abb. 1).
- ▶ Die Überprüfung von Weichteilzeichen, wie die Weite des prävertebralen Weichteilbandes (Höhe C2 weniger 7 mm).

Die Hauptaufgabe der MRT ist darüber hinaus:

- ▶ Die Aufdeckung von okkulten Frakturen (Spongiosafrakturen), zu deren Darstellung besonders gut T2-gewichtete MR-Sequenzen mit Fettunterdrückung geeignet sind,
- ▶ die Beurteilung der Kontinuität der Bandstrukturen (vorderes/hinteres Längsband), des Lig. flavum, der inter- und intraspinalen Bänder sowie der Intaktheit der Zwischenwirbelscheibe,

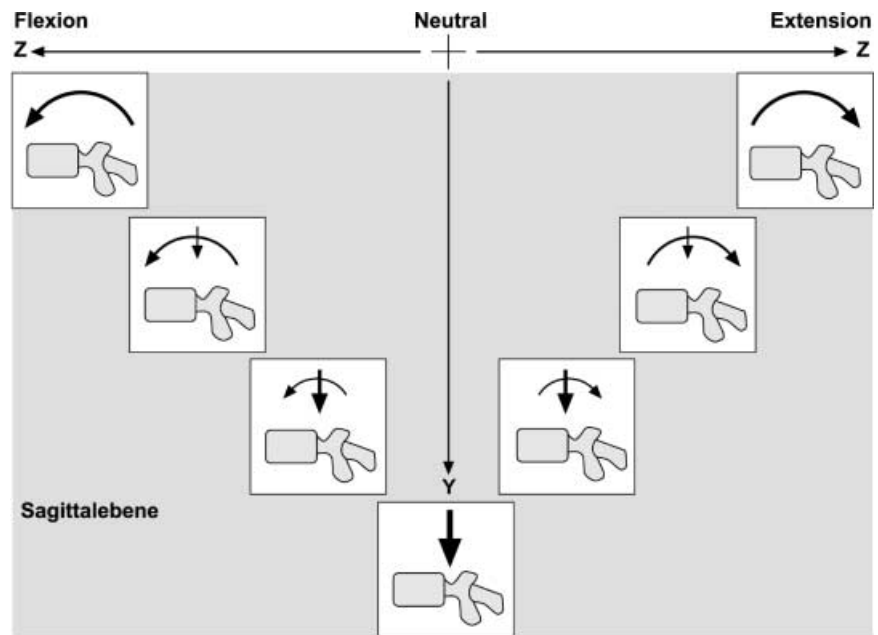


Abb. 5 ▲ Arten von Wirbelsäulenbelastungszonen

- ▶ die Beurteilung des Spinalkanals (Intaktheit der Hirnhäute, Signaländerungen im Myelon).

Biomechanische Betrachtungen

Das Verständnis der physiologischen Bewegung zwischen den Knochen, Gelenken, Zwischenwirbelscheiben, Bändern und Muskeln ist wichtig, will man radiologisch den Verletzungsmechanismus interpretieren und klassifizieren. Die Mechanismen der Verletzung sind hierbei wohl wesentlich komplexer als früher angenommen. Werden die o. g. Strukturen einer Kraft ausgesetzt, verformen diese sich innerhalb gewisser Grenzen (Abb. 5). Hierbei lassen sich im Wesentlichen 3 Zonen unterscheiden, die prinzipiell auch die ▶ **Hauptverletzungsklassifikation** umfassen.

Innerhalb der ▶ **neutralen Zone** ist nur wenig Kraft nötig, um den Bandapparat zu dehnen, die Deformation ist reversibel, und es entstehen keine strukturellen Schäden. Innerhalb der ▶ **elastischen Zone** sind die Kräfte wesentlich stärker, das Nachlassen der Kraft führt zu einer Aufhebung der Deformation und zur Rückkehr zum Ruhezustand. Die neutrale und elastische Zone bilden den physiologischen Bewegungsumfang.

Eine weitere Kraftzunahme über den physiologischen Bewegungsumfang bedingt Mikrofrakturen und Mikrorisse im Bandapparat (▶ **traumatische Zone**). Entfällt die Kraft, kehren diese funktionellen Einheiten nicht mehr in die Ruheposition zurück, und es verbleibt eine Deformität. Je nach Krafrichtung entstehen vorwiegend eine Flexionsbewegung (mit vertikaler Kompression), eine Extensionsbewegung oder eine Rotation. Obwohl in Wirklichkeit eine Kombination von Faktoren zum Hauptvektor der Bewegung führen, erleichtert solch eine Einteilung im klinischen Alltag die radiologische Befundung.

Klassifikation der HWS-Verletzungen

Derzeit existiert keine einheitliche Klassifikation der HWS-Verletzungen. Wir halten die Einteilung nach Magerl auch in der unteren HWS für sinnvoll, ist doch eine solche Klassifikation weitgehend auch auf Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule übertragbar und erleichtert dem Radiologen so eine einheitliche Beurteilung des Befundes.

Sonderformen im Bereich der HWS sind C1- und C2-Frakturen. Diese sollen aus didaktischen Gründen zuerst kurz beschrieben werden.

Frakturen des ▶ **hinteren Atlasbogens** sind typische Extensionsverletzungen und stabil. Durch die oftmals ausgedehnten Bandverletzungen sind diese Frakturen gut

▶ Hauptverletzungsklassifikation

▶ Neutrale Zone

▶ Elastische Zone

Die neutrale und elastische Zone bilden den physiologischen Bewegungsumfang.

▶ Traumatische Zone

Je nach Krafrichtung entstehen vorwiegend eine Flexionsbewegung (mit vertikaler Kompression), eine Extensionsbewegung oder eine Rotation.

Sonderformen im Bereich der HWS sind C1- und C2-Frakturen.

▶ Hinterer Atlasbogen

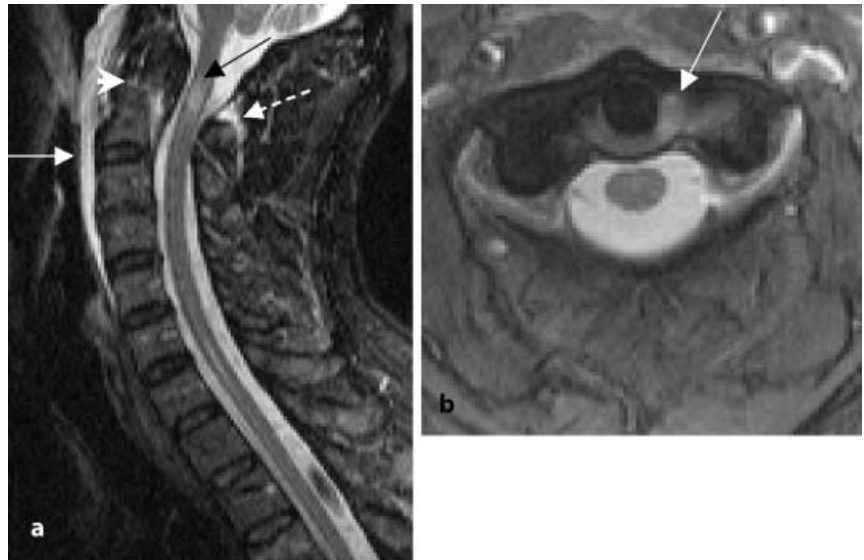


Abb. 6a,b ▲ Skiuifall. Densfraktur Anderson Typ II. a Das sagittal T2-gewichtete Bild mit Wasserunterdrückung (STIR-Sequenz) der HWS zeigt die Dorsalverlagerung des Dens nach intraspinal (Pfeilspitze), intakte Membrana tectoria, intramedulläres Ödem (schwarzer Pfeil), prävertebrale Weichteileinblutungen (weißer Pfeil) und Distorsion des Lig. atlantooccipitale posterior (gestrichelter Pfeil). b Axiales Gradientenechobild durch die Densbasis. Gut sichtbar die asymmetrische Verdickung und Signalanhebung des linken Lig. alaria mit angrenzendem Knochenödem als Zeichen einer Distorsion bzw. Teilerreißung

► Jefferson-Fraktur

► Densfrakturen

durch sagittale T2-gewichtete MR-Aufnahmen, möglichst mit Fettunterdrückung, darstellbar.

Kombinierte vordere und hintere Atlasbogenfrakturen (► Jefferson-Fraktur) entstehen häufig durch eine vertikale Kompression, wie z. B. beim Kopfsprung ins zu flache Wasser. Insbesondere auf koronar T2-gewichteten MR-Aufnahmen sind diese Frakturen gut sichtbar, da die Massae laterales gegenüber dem Axis nach lateral verschoben sind. Beträgt diese laterale Verschiebung mehr als ca. 7 mm, muss auch von einer Zerreißung des Lig. transversum ausgegangen werden.

► Densfrakturen werden sowohl durch Flexions- wie auch Extensionstraumen hervorgerufen. Nach Anderson werden die Densfrakturen in 3 Typen unterschieden (Abb. 7):

- ▶ Typ I stellt eine Abrissfraktur der Densspitze dar,
- ▶ Typ II geht durch die Densbasis,
- ▶ Typ III geht durch den Axiskörper.

Nach unserer Meinung sind Densfrakturen häufig als instabil anzusehen, z. B. kann ein Typ I ein Hinweis auf eine relevante Verletzungen zwischen Co/C1 sein. Bei kon-

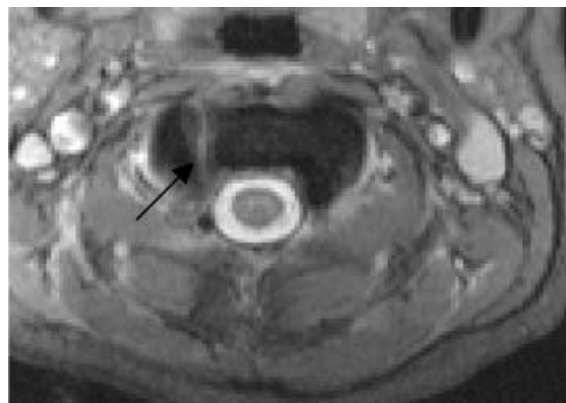


Abb. 7 ◀ Autounfall. Axisfraktur. Die vertikal verlaufende Frakturlinie (Pfeil) ist gut auf dem axial T2-gewichteten Gradientenechobild sichtbar, geringe Dislokationen der Fragmente sind erkennbar



Abb. 8 ◀ Snowboardunfall. Luxationsfraktur C7/Th1 unter Beteiligung aller 3 Säulen. Auf dem sagittal T2-gewichteten Bild mit Wasserunterdrückung ist die ventrale Luxation von C7 gegenüber Th1 gut erkennbar (Pfeilspitze), das vordere und hintere Alignment ist fast vollständig verloren. Kneifzangenartige Einengung des Spinalkanals mit Myelonkompression. Komplette Zerreißung des hinteren Längsbandes in dieser Höhe, Zerreißung des Lig. flavum (schwarzer Pfeil), Weichteileinblutungen (weißer Pfeil). Darüber hinaus sind Spongiosaödeme deck- und bodenplattennah Höhe C5/C6 (gestrichelter Pfeil) mit einer Bandscheibenvorwölbung erkennbar als Zeichen degenerativer Veränderungen

▶ **Axisbogenfrakturen**

▶ „fat C2“

▶ **Flexionstraumen**

▶ **Tear-drop-Frakturen**

▶ **Extensionstraumen**

▶ **Rotationstraumen**

▶ **Flexionstraumen**

Flexionstraumen (Typ-A-Verletzungen) sind die häufigste Form des HWS-Traumata.

servativer Therapie ist in bis zu 60% der Fälle (Typ II) mit instabilen pseudoarthrotischen Ausheilungen zu rechnen.

Die MRT kann dabei besonders zur Beurteilung der Intaktheit der Ligg. alaria und transversaria in sagittaler und koronarer Schnittführung in T1- und T2-Gewichtung (Abb. 6) herangezogen werden.

▶ **Axisbogenfrakturen** (Hangman's fracture) sind oftmals Folge eines Hyperextensionstraumas. Typische Frakturlokalisation ist der Isthmusbereich. Verbleibt beim Abrutschen des 2. Wirbelkörpers ein Fragment an typischer Stelle, so resultiert eine scheinbare sagittale Verlängerung des Wirbelkörpers. Dieses Zeichen ist in der Literatur auch als ▶ „fat-C2-Zeichen“ bekannt.

Nach dem Unfallhergang sind Flexionstraumen am häufigsten (ca. 60%), gefolgt von Extensionstraumen (ca. 30%) und Rotationstraumen (ca. 10%).

▶ **Flexionstraumen** führen zu Densfrakturen, Wirbelkörperkompressionsfrakturen (Abb. 7), unteren ▶ **Tear-drop-Frakturen** (Absprengung eines vorderen unteren Wirbelkörperkantenfragments), anterioren Luxationen und Subluxationen (Abb. 8), Erniedrigung des Zwischenwirbelraumes und Dornfortsatzfrakturen. Zum besseren Verständnis ist ein typischer Unfallhergang in Abb. 9 gezeigt.

▶ **Extensionstraumen** verursachen Wirbelbogenfrakturen, obere Tear-drop-Frakturen, posteriore Luxationen oder Subluxationen, eine Aufweitung des Zwischenwirbelraumes und einen verminderten Dornfortsatzabstand.

▶ **Rotationstraumen** führen zu einseitigen Gelenkluxationen, isolierten Frakturen der Massae laterales oder des Processus uncinatus mit oder ohne begleitende laterale Wirbelkörperkompressionsfraktur.

▶ **Flexionstraumen** (Typ A-Verletzungen) sind die häufigste Form des HWS-Traumata und oftmals die Folge einer unterschiedlich starken Beugung (Flexion) nach vorn oder einer Kompressionskraft. Wichtig ist, dass die dorsalen Strukturen völlig intakt sind. Dieser Verletzungstyp, der also nur den Wirbelkörper umfasst, ist fast immer als stabil einzustufen (Ausnahmen bestätigen die Regel: z. B. schwere Trümmerfrakturen sind zwar Typ-A-Verletzungen, aber dennoch als instabil einzustufen!). Zu Beginn der vertikalen Krafteinwirkung werden die Deck- und Bodenplatte komprimiert und bei Übersteigen der physiologischen Belastbarkeit frakturiert. Bei weiter ansteigenden Kräften wird zusätzlich der Wirbelkörper komprimiert, es kommt zur Kompressions- oder Berstungsfraktur.

Flexionsverletzungen kommen als isoliertes Ereignis vor, beteiligen nicht die hintere Säule und sind häufig stabile Frakturen, aber nicht zwingend als stabil einzustufen.

Extensionsverletzungen sind meist instabil.

Rotationstraumen (Typ-C-Verletzungen) der HWS sind eher selten und eigentlich immer instabil.

Die Frage der Stabilität ist nicht immer konklusiv anhand der radiologischen Bilder zu beurteilen und manchmal erst intraoperativ zu entscheiden.

► Anomalien



Abb. 9 ◀ Mechanismus und typischer Unfallhergang einer Flexionsverletzung. Eine Flexion bedingt eine Bewegung um eine Drehachse durch die Wirbelkörpermitte. Tritt noch eine axiale Krafteinwirkung dazu, frakturieren die entsprechenden Wirbelkörper. Gleichzeitig geraten bei zunehmender Flexion die dorsalen Strukturen unter Zug und zerreißen. Ein typischer Mechanismus ist ein nicht angeschnallter Autofahrer, wobei der Kopf nach vorne tritt und Kontakt zur Windschutzscheibe hat

Flexionsverletzungen kommen als isoliertes Ereignis vor und beteiligen nicht die hintere Säule und sind häufig stabile Frakturen.

Extensionsverletzungen oder Distractionstraumen (Typ-B-Verletzung) sind in der HWS relativ häufig. Sie sind zumeist das Ergebnis einer Distraction der hinteren Säule (seltener auch der vorderen Säule), und ihr Kennzeichen ist die Aufweitung des interspinalen Abstandes und/oder die Subluxation in den Facettengelenken (seltener auch Aufweitung der vorderen Säule).

Extensionsverletzungen sind meist instabil, da zusätzlich zur vorderen Säule auch die hintere Säule betroffen ist. Sowohl für Flexions- als auch Extensionsverletzungen gilt, dass die A. vertebralis mit verletzt sein kann. Die MR-Angiographie ist besonders zum sensitiven Nachweis einer Gefäßläsion geeignet (Abb. 10).

Rotationstraumen (Typ-C-Verletzungen) der HWS sind eher selten und eigentlich immer instabil, da diese die Folge von schwersten Traumen sind. Neben der Vorwärtsbewegung trägt eine Kraft um die Längsachse der Wirbelsäule zum Unfallmechanismus bei. Diese Verletzungen betreffen häufig den thorakolumbalen Übergang und werden dort näher beschrieben.

Trotz dieser einfachen und praktischen Klassifikation für Wirbelsäulen-Verletzungen ist die Frage der Stabilität nicht immer konklusiv anhand der radiologischen Bilder zu beurteilen und manchmal erst intraoperativ zu entscheiden! Weiterhin gibt es noch eine Reihe von Subtypen [2], deren Nennung aber den Rahmen dieses Artikels sprengen würde. Diese detaillierteren Subklassifikationen spielen im Alltag nur eine untergeordnete Rolle, nicht aber bei wissenschaftlichen Vergleichstudien.

Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule

Anatomische Betrachtungen und Anomalien

Wie in der HWS sind auch in der thorakolumbalen Wirbelsäule die Wirbelkörper durch 2 Bänder untereinander in vertikaler Richtung verbunden, dem vorderen und hinteren Längsband. Am thorakolumbalen und lumbosakralen Übergang kommen eine Reihe von ► Anomalien vor. Zu diesen zählen das Fehlen der 12. Rippe, eine Zusatzrippe am 1. lumbalen Wirbelkörper, ein sakralisierter Lumbalwirbel oder ein lumbalisierter Sakralwirbel. Diese Anomalien werfen dann Schwierigkeiten auf, wenn die Verletzungsfolge für die Operation genau zu definieren ist.

Nach unserer Erfahrung können 3 Methoden zur relativ exakten Höhenidentifikation herangezogen werden:



Abb. 10a,b ◀ Sturz vom Apfelbaum (4 m Höhe) mit Kompressionsfraktur von C5/6/7 (nicht abgebildet). Kontrastverstärkte MR-Angiographie der A. vertebralis mit traumatischem Verschluss der linken A. vertebralis. a Regelrechte Darstellung der rechten A. vertebralis (Pfeil). b Die linke A. vertebralis kommt posttraumatisch nicht zur Darstellung (Pfeil)

1. Man greift zu einer evtl. vorhandenen Thoraxaufnahme oder Brustwirbelaufnahme. Das Abzählen sollte dann problemlos möglich sein.
2. Sind solche Aufnahmen nicht vorhanden, kann eine gedachte Linie zwischen den beiden Darmbeinkämmen gezogen werden. Diese Linie trifft dann häufig durch den Zwischenwirbelraum von L4/L5.
3. Der Querfortsatz von L3 verläuft am ehesten horizontal und ist meist am längsten.

Eine sichere Höhenangabe kann aber nach unsere Meinung nur von kranial, also von der HWS aus, nach kaudal durch eine kontinuierliche Zählung erfolgen.

Lokalisation

Die Übergangsregion zwischen der relativ starren thorakalen und der beweglicheren lumbalen Wirbelsäule ist prädisponiert für Frakturen. 60% der Frakturen liegen zwischen Th12 und L2, ca. 90% zwischen Th11 und L4.

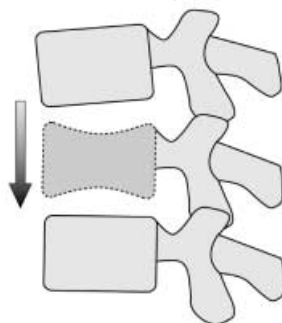
Bildanalyse

Wie bereits erwähnt, hat sich die Klassifikation nach Magerl (Flexions-, Extensions- und Rotationsverletzung) insbesondere in der thorakolumbalen Wirbelsäule durchgesetzt. Auf folgende frakturtypische Veränderungen sollte bei der radiologischen Bildanalyse geachtet werden:

60% der Frakturen der thorakolumbalen Wirbelsäule liegen zwischen Th12 und L2, ca. 90% zwischen Th11 und L4.

Typ-A-Verletzung

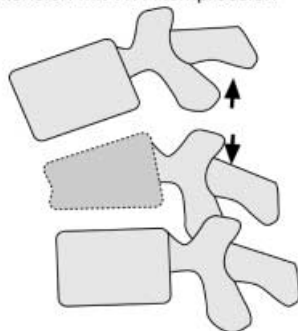
→ Flexion mit WK-Kompression



a

Typ-B-Verletzung

→ Extension mit WK-Kompression



b

Abb. 11 ◀ a Typ-A-Verletzung der thorakolumbalen Wirbelsäule (s. auch Klassifikation nach Mager!). Flexionskomponente mit unterschiedlich ausgeprägter axialer Krafteinwirkung, intakte hintere Säule. b Typ-B-Verletzung mit zunehmender Flexionskomponente, Beteiligung der hinteren Säule, Aufweitung des interspinösen Abstandes

- ▶ Höhenminderung der Wirbelkörper,
- ▶ Verformung der Wirbelkörper,
- ▶ Verbreiterung der Wirbelkörper,
- ▶ Einbruch der Wirbelkörper-Deckplatte,
- ▶ Verdichtungen der Spongiosa.
- ▶ Vergrößerter Bogenwurzelabstand.

Die Hauptaufgabe der MRT ist darüber hinaus die Beurteilung und Aufdeckung:

- ▶ von okkulten Frakturen (Spongiosafrakturen), zu deren Darstellung besonders gut T2-gewichtete MR-Sequenzen mit Fettunterdrückung geeignet sind,
- ▶ der Kontinuität der Bandstrukturen (vorderes/hinteres Längsband), des Lig. flavum, der inter -und intraspinalen Bänder sowie der Intaktheit der Zwischenwirbelscheibe,
- ▶ des Spinalkanals (Intaktheit der Hirnhäute und des Lig. flavum, Signaländerungen im Myelon),
- ▶ der angrenzenden Weichteile (Muskelgruppen) sowie des paravertebralen Raumes einschließlich der Kontinuität der Aorta.

Klassifikation der Verletzungen der thorakolumbalen Wirbelsäule

Ähnlich wie bei Verletzungen im Bereich der HWS unterscheidet man auch bei der thorakolumbalen Wirbelsäule 3 Hauptformen, nämlich Flexions-, Extensions- und Rotationsverletzungen (Abb. 11).

Sind Flexionsverletzungen mit axialer Stauchungskomponente in der thorakolumbalen Wirbelsäule häufig, treten reine Extensionsverletzungen im Gegensatz zur HWS sehr selten auf. Dieser Verletzungsmechanismus kann auftreten, wenn jemand herabfällt und rücklings auf einen Gegenstand aufschlägt. Selten können auch bei Patienten mit vorbestehenden Erkrankungen wie z. B. einem DISH-Syndrom oder einem Morbus Bechterew bereits durch leichte Extensionsbewegungen verletzt werden. Die Übersicht einer praktischen Einteilung zur Klassifikation von Verletzungen

Flexionsverletzungen mit axialer Stauchungskomponente treten im Bereich der thorakolumbalen Wirbelsäule häufig auf, reine Extensionsverletzungen sehr selten.



Abb. 12 ◀ Mögliche Klassifikation zur raschen Beurteilung von Stabilität bzw. Instabilität von Wirbelsäulenverletzungen im klinisch-radiologischen Alltag

der thorakolumbalen Wirbelsäule bzgl. der Stabilität, die von uns und unseren Wirbelsäulen-Chirurgen im klinischen Alltag eingesetzt wird, bietet Abb. 12.

Technische Aspekte der MR-Bildgebung

Eine aussagekräftige MR-Bildgebung bei Patienten mit Wirbelsäulenverletzungen hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Neben technischen Faktoren, die überwiegend die Sequenzen und Spulwahl betreffen, müssen beim frisch traumatisierten Patienten das Monitoring der Vitalfunktionen durch eine ►MR-taugliche Apparatur gewährleistet sein. Dies betrifft insbesondere die Narkoseeinheit. Daneben sollte beim sedierten Patienten die Sauerstoffsättigung mittels eines Pulsoxymeters kontrolliert werden.

Aus eigener Erfahrung können wir nur dringend raten, eine thermische Überwärmung von Patienten zu verhindern. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass spulen- oder schleifenartig angeordnete Kabel nicht vorhanden sind und Elektrodenkabel nicht direkt der Haut des oftmals sedierten Patienten anliegen!

Obwohl wissenschaftliche Studien bzgl. des optimalen Untersuchungszeitpunktes nicht vorliegen, sollte die MR-Untersuchung so früh wie möglich nach dem Trauma erfolgen. In unserem Institut werden je nach Schwere des Traumas bei den Erstversorgungen neben den obligatorischen Röntgenaufnahmen (digitale Röntgenaufnahmen und Computertomographie mit 3D-Rekonstruktion) und MR-Untersuchungen der Wirbelsäule und der einzelnen Wirbelsäulenabschnitte durchgeführt.

Bezüglich der MR-Bildparameter sind in den letzten Jahren insofern wichtige Fortschritte gemacht worden, als dass die Untersuchungszeiten erheblich verkürzt werden konnten. Diese verkürzte Untersuchungszeit hat die Akzeptanz bei den klinisch behandelnden Kollegen deutlich erhöht. Daneben helfen verkürzte Untersuchungszeiten, Bewegungsartefakte zu verringern, die gerade beim traumatisierten oder bewusstseinsgetrübten Patienten häufig auftreten.

Trotz der technischen Fortschritte haben ►Spin-Echo-Sequenzen weiterhin eine wichtige Rolle bei der Untersuchung, da sich insbesondere mit sog. schnellen T2-gewichteten Sequenzen (je nach Gerätehersteller Fast-Spin-Echo oder Turbo-Spin-Echo genannt) in der sagittalen Schnittführung das vordere und hintere Alignment und das Myelon gut beurteilen lassen. T2-gewichtete Sequenzen mit Fettunterdrückung sind für den Nachweis von ►Mikrofrakturen mit konsekutivem Knochenödem geeignet, die auf konventionellen Aufnahmen oder Computertomographie-Untersuchungen nicht zur Darstellung kommen. Hierzu sind besonders sog. ►STIR-Sequenzen geeignet (short tau inversion recovery) (Abb. 13).

Akute Myeloneinblutungen sind gut auf ►T2*-gewichteten oder Gradientenecho-Sequenzen darstellbar. Demgegenüber sind die schnellen T2-gewichteten Sequenzen aufgrund der geringeren Anfälligkeit für ►Suszeptibilitätsartefakte weniger gut zum Nachweis von Blut geeignet. Aus diesem Grund komplementieren wir unsere Wirbelsäulenuntersuchungen oft durch eine axiale Gradientenecho-Sequenz.

► MR-taugliche Apparatur

Die MR-Untersuchung sollte so früh wie möglich nach dem Trauma erfolgen.

► Spin-Echo-Sequenzen

► Mikrofrakturen

► STIR-Sequenzen

► T2*-gewichtete oder Gradientenecho-Sequenzen

► Suszeptibilitätsartefakte

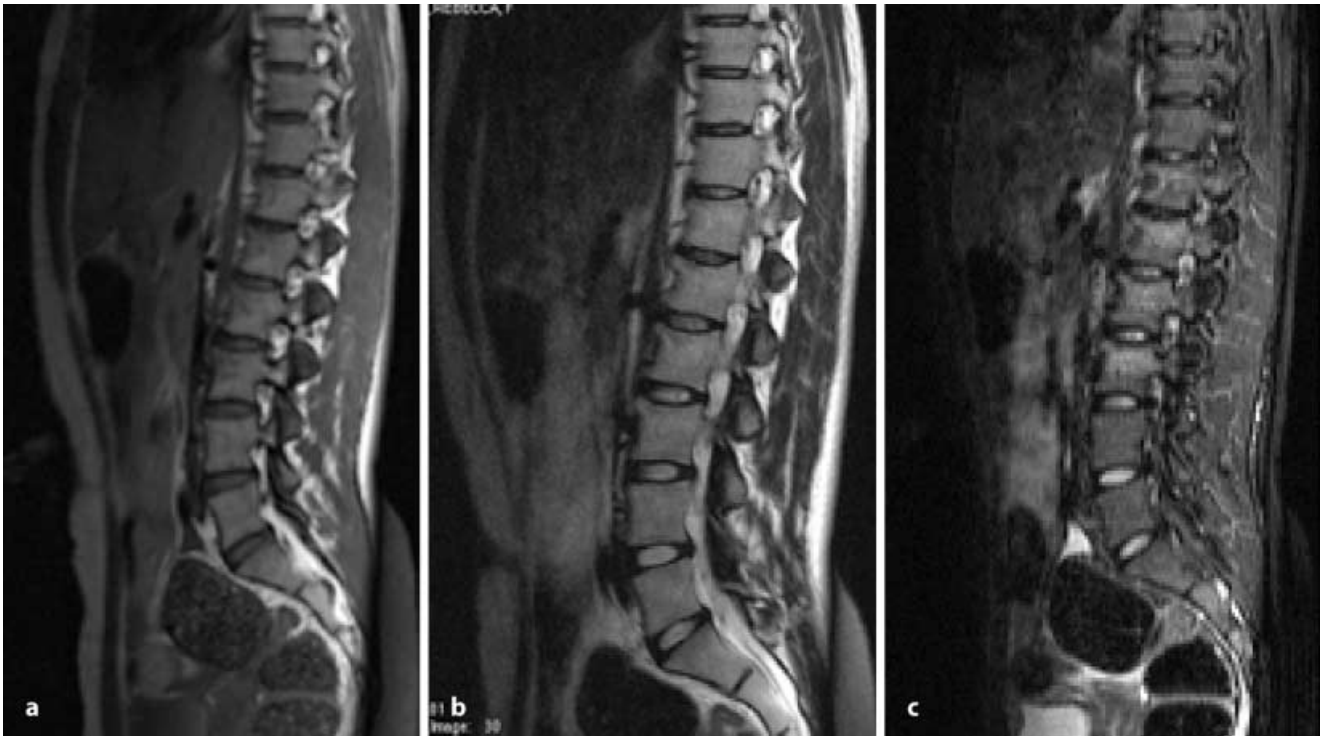


Abb. 13a–c ▲ Gleitschirmunfall. Typ-A-Verletzung. Die hintere Säule ist völlig intakt. a Sagittal T1-gewichtete Spin-Echo-Aufnahme durch die lumbale Wirbelsäule. Kein sicherer Hinweis auf Frakturen. b Sagittal T2-gewichtete Turbo-Spin-Echo-Aufnahme der LWS. Hier flauhe Signalanhebungen in den Wirbelkörpern als Hinweis auf eine Typ-A-Fraktur mit Mikrofrakturen. c Die sagittal T2-gewichtete Aufnahme (STIR-Sequenz) zeigt infolge der Fettunterdrückung sehr sensitiv die Mikrofrakturen der Höhen Th12–L3 (flächige Signalanhebungen in den Wirbelkörpern). Dieses Beispiel verdeutlicht, dass insbesondere zum Nachweis von Mikrofrakturen der Wirbelkörper fettunterdrückte T2-gewichtete Sequenzen besser als konventionelle Spin-Echo-Aufnahmen ohne Fettunterdrückung sind

► T2-gewichtete Sequenzen

Koronare Sequenzen eignen sich besonders zum Nachweis von Densfrakturen und zur Beurteilung des kranioatlantoaxialen Bandapparates, die wir häufig noch seitengetrennt entsprechend des Bandverlaufes der Ligg. alaria kippen.

Schnelle ►T2-gewichtete Sequenzen sind wegen ihrer Robustheit gegenüber Suszeptibilitätsartefakten besonders gut zur Bildgebung bei Patienten mit Metallimplanaten, wie dies häufig postoperativ der Fall ist, geeignet. Bei Patienten mit spondylodetischem Material verzichten wir deshalb grundsätzlich auf Gradienten-Echo-Sequenzen und verwenden ausschließlich Sequenzen mit einem hohen Turbofaktor in T2- und möglichst auch T1-Gewichtung.

Neben diesen Sequenzparametern ist die richtige Wahl des Gesichtsfeldes (FOV), der Bildauflösung in Frequenz- und Phasenrichtung (Matrix), Schichtdicke und Zahl der Signalmittlungen (Akquisitionen) nicht nur für die Bildbefundung wichtig, sondern auch, um einen guten Kompromiss zwischen Aufnahmezeit und Signal-Rausch-Verhalten zu erreichen. In sagittaler T2-gewichteter Schichtführung verwenden wir je nach Untersuchungsregion und Fragestellung folgende ►Sequenzparameter:

► Sequenzparameter

- TR = 3000–4500 ms,
- TE = 90–130 ms,
- FOV = 200–280 mm,
- Schichtdicke = 3 mm,
- Akquisitionen = 2–4,
- Matrix = 256×512.

► Diskoligamentäre Einheiten

Mit diesen Bildparametern sind insbesondere die ►diskoligamentären Einheiten in sagittaler Schichtführung gut zu beurteilen. Hierbei ist besonderes Augenmerk auf



Abb. 14a,b ▲ Gleitschirmunfall. Typ-B-Verletzung von Wirbelkörper L1. a Das sagittal T1-gewichtete Spin-Echo-Bild gibt den Unfallmechanismus gut wieder mit einer Flexionsbewegung (Kyphosestellung mit Höhenminderung der vorderen 2/3 der Zwischenwirbelräume Th12/L1 und L1/L2, axialer Kompressionskomponente (Burstungsfraktur von L1) und konsekutiver Aufweitung der hinteren Säule (Distraction der Ligamente und Aufweitung des interspinalen Abstandes). Zerreiung des vorderen Längsbandes (weier Pfeil), Verlagerung eines Fragementes nach intraspinal (Pfeilspitze) mit fast kompletter Verlegung des Spinalkanals in dieser Höhle. Myeloneinblutung (gestrichelter Pfeil). b Das sagittal T2-gewichtete Turbo-Spin-Echo-Bild zeigt gut die Aufweitung des interspinalen Abstandes (weier Pfeil). Abhebung bzw. Zerreiung des hinteren Längsbandes mit Einblutung (Pfeilspitze)

Da bei Wirbelsäulenverletzungen in 30% diskoligamentare Strukturen mitbetroffen sind, ist die Erkennung dieser Verletzung essentiell.

► Facettenblockade

► Facettensubluxation

das vordere und hintere Längsband, Lig. flavum und Lig. supra- und interspinosum zu achten. Bei der Diagnose ist analog zum konventionellen Röntgenbild auch eine knöcherne Fehlanordnung und eine Diskontinuität der Bänder zu beurteilen. Eine Bandruptur kann daneben alleine durch das Fehlen der Nachweisbarkeit des Bandes gekennzeichnet sein (Abb. 14). Distorsionen werden auch durch eine Verdickung des Bandes mit einer entsprechenden Signalanhebung im T2-Gewichtung charakterisiert. Diese Signalalterationen können durch eine Hyperintensität in T2-Gewichtung im paravertebralen Raum begleitet sein. Die Erkennung einer Verletzung der diskoligamentaren Strukturen ist essentiell, da die MR-Befunde die klinische Therapieentscheidung entscheidend beeinflussen können und in bis zu 30% diese ligamentären Einheiten bei Wirbelsäulenverletzungen mitbetroffen sind. Durch die Möglichkeit, langstreckige Wirbelsäulenabschnitte im MRT darzustellen, können im MRT vorhandene Bandverletzungen und Frakturen in auseinanderliegenden Segmenten aufgezeigt werden, die auf Röntgenaufnahmen oder im CT nicht vermutet werden können. Auch die Erkennung einer Koinzidenz einer ► Facettenblockade mit einer traumatischen Bandscheibenhernie ist nicht nur aus der Literatur bekannt, sondern auch für die operative Versorgung zwingend notwendig. Die Chirurgen in unserem Hause werten bereits eine asymmetrische Flüssigkeitseinlagerung in den Facettengelenken als Hinweis auf eine ► Facettensubluxation (Abb. 15), die oftmals nur im MRT nachweisbar ist und nicht nur die Trauma-Klassifikation, sondern auch die Therapieentscheidung beeinflussen kann.



Abb. 15a,b ▲ Motorradunfall. Typ-B-Verletzung. a Sagittal T2-gewichtetes Bild mit Fettunterdrückung durch die lumbale Wirbelsäule. Wichtig für die Klassifikation und die entsprechende Therapieentscheidung ist die Erkennung einer möglichen Subluxation der Facettengelenke. Diese sind in diesem Beispiel gut durch den erweiterten Gelenkspalt und die Flüssigkeitseinlagerung erkennbar (Pfeilspitze). Zum sensitiven Nachweis ist vor allem das MRT geeignet. Beachte auch die Distorsion der interspinalen Ligamente (weißer Pfeil). b Die Facettensubluxation ist auch besonders gut in der axialen T2-gewichteten Spin-Echo-Aufnahme sichtbar (weißer Pfeil)

Eine komplementäre MR-Bildgebung an einem spezialisierten Institut erscheint neben konventionellen Röntgenuntersuchungen und Computertomographie bei der Erstuntersuchung von Patienten mit einem signifikanten Wirbelsäulentrauma essentiell.

- ▶ MR-Angiographie-Bilder
- ▶ Bolus-Transitzeit

▶ Myelonschwellung

Aus diesem Grund halten wir eine komplementäre MR-Bildgebung neben konventionellen Röntgenuntersuchungen und Computertomographie bei der Erstuntersuchung von Patienten mit einem signifikanten Wirbelsäulentrauma an einem spezialisiertem Institut für essentiell. Auch aus forensischen Gründen kann solch ein Vorgehen wichtig sein, gerade wenn sich postoperativ die Neurologie des Patienten verschlechtert und eine möglicherweise bereits präoperativ vorhandene Myelonschädigung nicht mehr nachweisbar ist.

Bei Patienten mit möglichen Verletzungen der A. vertebralis sollten kontrastverstärkte ▶MR-Angiographie-Bilder angefertigt werden. Hier empfehlen wir, die ▶Bolus-Transitzeit zwischen venösem Zugangsweg und Ankunft im Gefäß zu ermitteln, um eine optimale Kontrastierung des Gefäßes zu erreichen. Diese Bolus-Transitzeit-Bestimmung, wie sie standardmäßig z. B. bei Untersuchungen der Nierenarterien angewendet wird, verbessert nach unserer Meinung signifikant die Kontrastierung der Vertebral-Gefäße, ohne die Untersuchungszeit wesentlich zu verlängern. Für die MR-Angiographie sollten Sequenzen mit zentraler k-Raum-Abtastung und möglichst kurzen TR- und TE-Zeiten gewählt werden, wie z. B.:

- ▶ TR = 4,2 ms,
- ▶ TE = 1,8 ms,
- ▶ FOV = 200 mm,
- ▶ Schichtdicke = 1 mm (96 3D-Partitionen),
- ▶ Akquisitionen = 1,
- ▶ Matrix = 256×512.

Bezüglich intraaxialer Verletzungen kann ein Spektrum von Myelonveränderungen beobachtet werden. Hierzu zählen Schwellung mit Ödem, Einblutungen (Abb. 14) und Durchtrennung des Myelons. Die ▶Myelonschwellung mit Ödem beinhaltet oftmals eine Konturvergrößerung des Myelonsignals und ist gut in T2-Gewichtung als umschriebene Signalanhebung erkennbar.



Abb. 16 ◀ Skiunfall. Typ-B-Verletzung mit Subluxationsfraktur von Th8, Kompressionsfraktur von Th6 und Mikrofrakturen von Th3 und Th4. Das sagittal T2-gewichtete Bild mit Fettunterdrückung zeigt eine Hyperkyphose der BWS, Subluxationsfraktur von Th8 mit Einblutungen in den Zwischenwirbelraum Th7/8 (weißer Pfeil) und prä- und postvertebralen Blutungen. Darüber hinaus Kompressionsfraktur von Th6 (weißer gepunkteter Pfeil), Zerreiung des Lig. flavum (Pfeilspitze) und subkutane Weichteileinblutungen (schwarzer Pfeil). Beachte auch Signalanhebungen als Zeichen von Mikrofrakturen von Th3 und Th4 (weißer langer Pfeil)

► Blutungen

Auch ► **Blutungen** gehen mit Signalveränderungen einher. Akute Blutungen sind auf T2*-gewichteten Sequenzen als Signalmindernng abgrenzbar (Desoxyhämoglobineffekt). Nach ca. 24–36 h tritt ein verkürzender T1-Effekt durch das Methämoglobin auf. Diese Signaländerungen sind dann gut durch umschriebene signalangehobene Veränderungen in T1-gewichteten Sequenzen nachweisbar.

Komplette Rückenmarksdurchtrennungen sind das Ergebnis schwerer Luxationsfrakturen (Abb. 16) und meist durch entsprechende Kontinuitätsunterbrechungen und Myeloneinblutungen nachweisbar.

► **MR-Verlaufskontrollen** geben wichtige Informationen bei chronischen Rückenmarksschäden bzw. bei Patienten mit neurologischer Verschlechterung. Hier ist gerade die Abklärung der intramedullären Zystenbildung wichtig, können diese doch Ursache neurologischer Verschlechterung sein. Hierbei sollte eine Myelomalazie oder Myelogliose von einer zystischen Myelopathie abgegrenzt werden. Die zystische Myelomalazie ist häufig durch ihr liquorisointenses Signalverhalten in T1- und T2-gewichteten Sequenzen charakterisiert und sollte bei Progression operativ angegangen werden.

► MR-Verlaufskontrollen

Literatur

1. Roaf RA (1960) A study of the mechanics of spinal injury. *J Bone Joint Surg* 42:810–823
2. Magerl F, Aebi A, Gertzbin SD, Harms J, Nazarian S (1994) A comprehensive classification of the thoracic and lumbar injuries. *Eur Spine J* 3:184–201
3. Denis F (1983) The three-column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spine injuries. *Spine* 8:817–831
4. Galanski M, Wippermann (1999) *Kompndium der traumatologischen Röntgendiagnostik*. Springer, Berlin Heidelberg New York