

Development of innovative training solutions in the field of functional evaluation aimed at updating of the curricula of health sciences schools



MODUL BIOMECHANIK DER WIRBELSÄULE

Didaktische Einheit B

Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule



B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

- Einführung
- Ziele
- Schulungsinhalte
- Zusammenfassung
- Konzeptuelle Karten
- Bibliographie.

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

Teil 1. Ziele

1. ZIELE

Die Ziele dieser didaktischen Einheit sind:

- Erlernen der Biomechanik hinter den wichtigsten Pathologien der Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule.
- Die Biomechanik im Zusammenhang mit den konservativen Techniken und der Behandlung der wichtigsten Wirbelsäulenpathologien kennen.
- Die Biomechanik im Zusammenhang mit dem chirurgischen Eingriff der wichtigsten Wirbelsäulenpathologien kennen.

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

Teil 2. Biomechanik der wichtigsten Pathologien der Halswirbelsäule

2.1. EINLEITUNG

Es gibt eine Vielzahl von reproduzierbaren Verletzungsmustern, die auf der Richtung und Größe der auf das höchste Segment der Wirbelsäule ausgeübten Kraft basieren:

- Beugung
- Seitliche Beugung
- Erweiterung
- Komprimierung
- Scheren
- Drehung

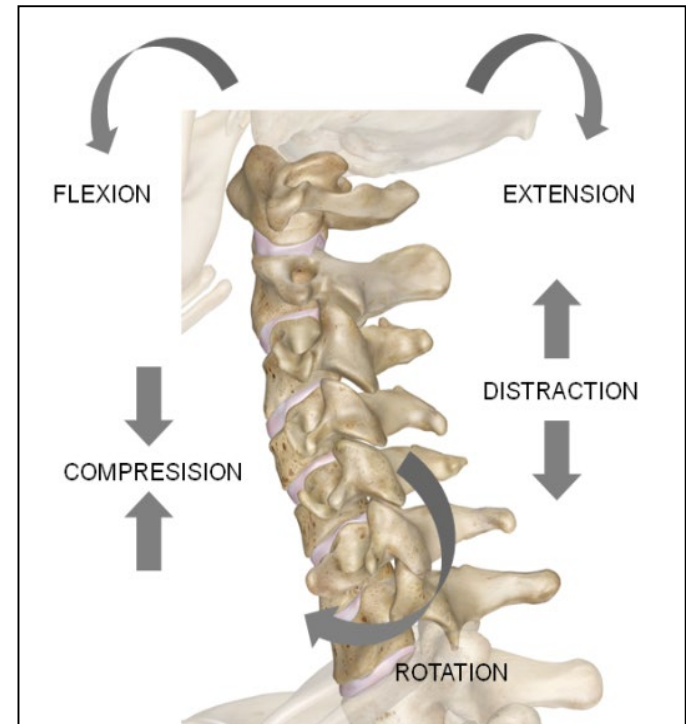
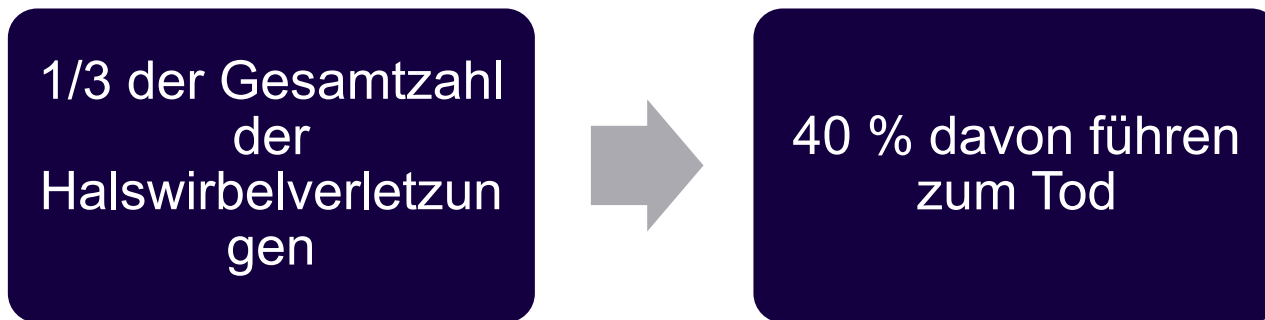


Abbildung 1. Verletzungsmechanismen der Halswirbelsäule (entnommen aus www.innerbody.com)

2.2. VERLETZUNGEN DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE



Verletzungsebene der Halswirbelsäule

Frakturen der Kondylen des Hinterhauptbeins

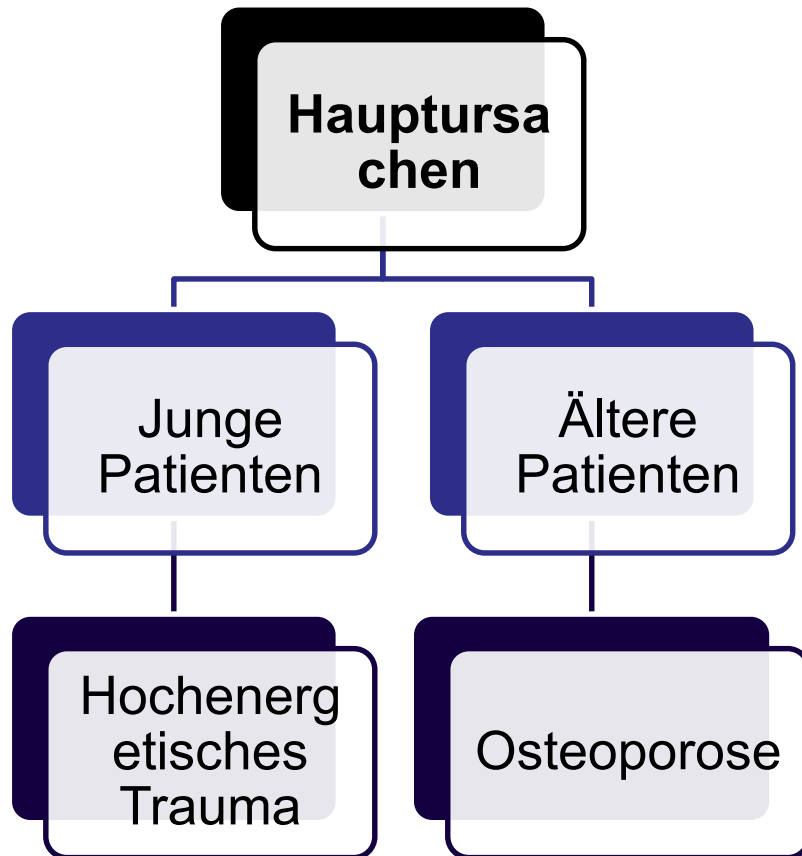
Atlantookipitale Dislokation

Frakturen des Atlas


Atlantoaxiale Dislokation

Frakturen der Achse

2.2. VERLETZUNGEN DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE



Hauptmechanismus der Verletzung

- 
- Hiperflexion
- Hüftstreckung
- Latero-Flexion
- Drehung
- Kombination aus allen

2.2.1. FRAKTUREN DER KONDYLEN DES HINTERHAUPTBEINS

Okzipitale Kondylenfrakturen (OCFs)



- Seltene traumatische Verletzung
- Assoziiert mit Instabilität
- Okzipitoatlantoaxialer Gelenkkomplex
- Unter Röntgenbildern leicht unerkant, aber mit CT-Scan erkannt.

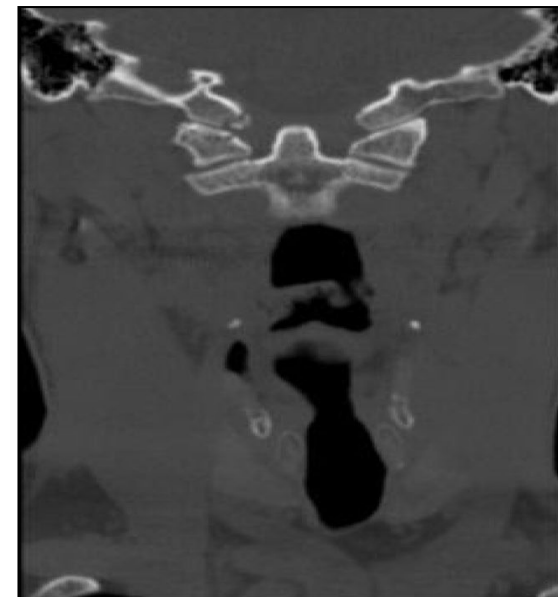


Abbildung 2. CT-Scan einer minimal verschobenen Fraktur des rechten inferioren medialen Okzipitalkondylus. (aus Muhammad Waseem *et al.* 2014)

2.2.1. FRAKTUREN DER KONDYLEN DES HINTERHAUPTBEINS

Tabelle 1: Anderson und Montesano (1988) Klassifizierung von OCF

Typ	Beschreibung	Biomechanik	Stabilität
I	Impaktion	Resultiert aus axialer Belastung; das ipsilaterale Alarband kann beeinträchtigt sein, aber die Stabilität wird durch das kontralaterale Alarband und die tectoriaie Membran aufrechterhalten	Stabile Fraktur
II	Verlängerung der Schädelbasis	Erstreckt sich vom Hinterhauptbein über den Kondylus zum Eintritt in das Foramen magnum; die Stabilität wird durch intakte Alarbands und die Tektorialmembran aufrechterhalten	Stabile Fraktur
III	Avulsion	Vermittelt über die Spannung des Alarbands; die damit verbundene Disruption der Tektorialmembran und des kontralateralen Alarbands kann Instabilität verursachen	Instabile Fraktur

2.2.1. FRAKTUREN DER KONDYLEN DES HINTERHAUPTBEINS

Anderson and Montesano classification		Tuli et al. classification	
I	II	1	Nondisplaced - Stable
		2A	Displaced - Stable; no radiographic, CT, or MR imaging evidence of occipitoatlantoaxial instability or ligamentous disruption
	III	2B	Displaced - Unstable; positive radiographic, CT, or MR imaging evidence of occipitoatlantoaxial instability or ligamentous disruption

Abbildung 3. Tuli et al. (1997) Klassifizierung von Okzipitalkondylenfrakturen. Aus Hanson J. et al. 2002

2.2.2. ATLANTOOCIPITALE DISLOKATION

Atlantooccipitale Dislokation (AOD) oder Occipitale Dissoziation (OCD)



- Dissoziation des Hinterhauptes von der Halswirbelsäule
- Produziert in Distraction und extension Kräfte, die auf occiput in Bezug auf den Atlas.
- Verletzungsmechanismus bei schnellen Abbremsungen.
- AOD häufig bei Kindern:
 - Aufgrund seiner Relation Kopf-Körper-Masse.
 - Aufgrund seiner okzipitalen Kondylen sind kleiner.
 - Aufgrund seiner atlantooccipitalen Bänder sind laxer.
 - Aufgrund seiner craniovertebralen Übergänge sind mehr horizontal.

2.2.2. ATLANTOOCIPITALE DISLOKATION

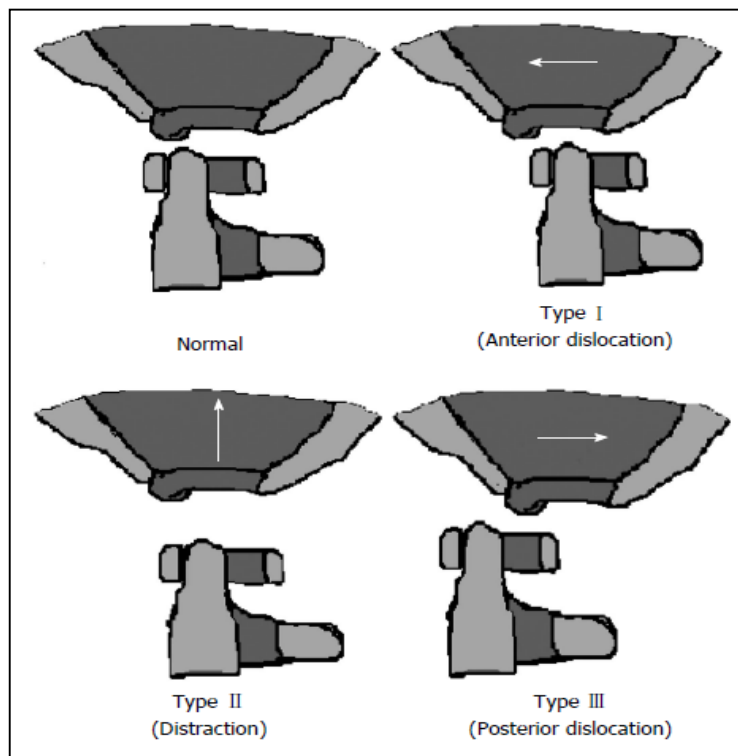


Abbildung 4. Die Traynelis-Klassifikation für die Atlantooccipitale Dislokation (aus Hall GC. et al. 2015)

2.2.3. FRAKTUR DES ATLASSES

Frakturen des Atlas



- Traumatische axiale Belastung durch das Okziput
- Wird auch durch Extensions-, Flexions- und Rotationskräfte erzeugt.
- Abhängig von der unterschiedlichen Kräftekombination kann es zu einer vorderen oder hinteren Bogenfraktur oder zu einer einseitigen Massenfraktur kommen.

2.2.3. FRAKTUR DES ATLASSES

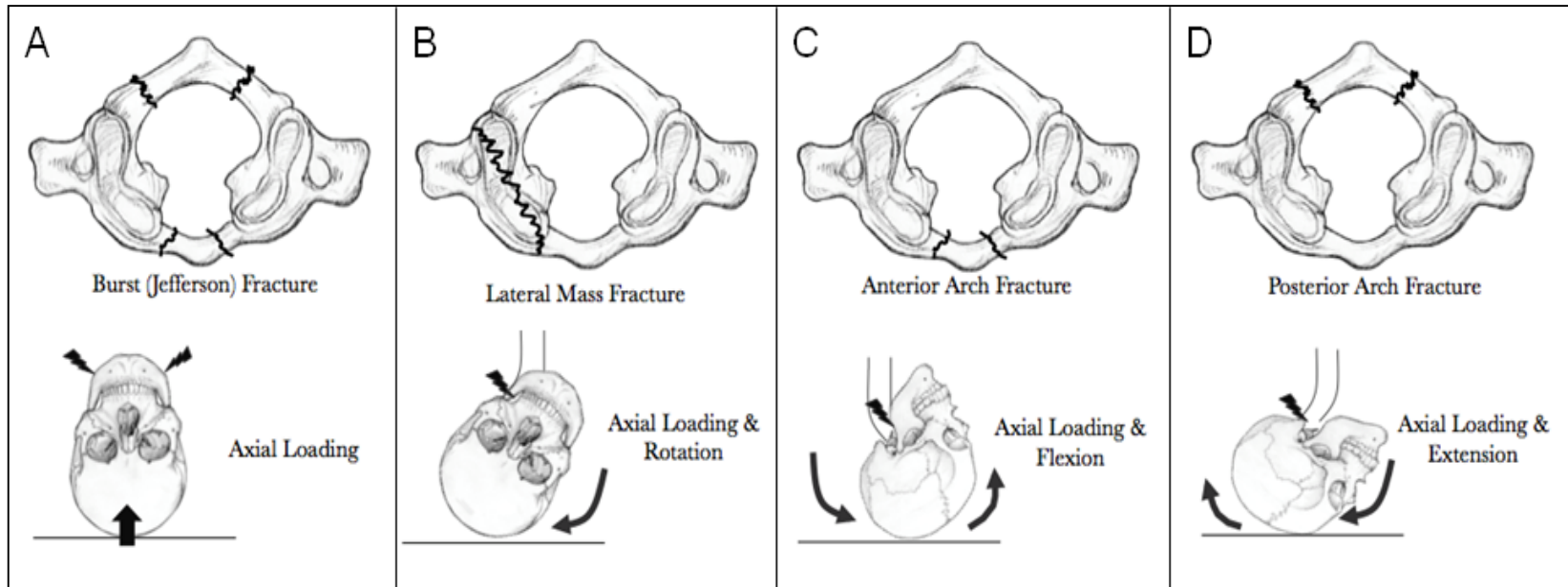


Abbildung 5. Atlas-Wirbelfrakturen (Bild aus: www.ebconsult.com)

2.2.4. ATLANTO-AXIALE DISLOKATION

Atlantoaxiale Dislokation



- Bezogen auf die Instabilität zwischen Atlas und Achse (C1-2)
- Traumatische, entzündliche, idiopathische oder angeborene Anomalien können Instabilität erzeugen.
- Äußerst seltene Verletzung durch Trauma, wenn keine Vorschädigung vorliegt .
- Disruption des transversalen Ligaments des Atlas.
- Auch eine seltene Verletzung der alaren und apikalen Bänder durch eine Verletzung des transversalen Bandes kann entstehen.

2.2.4. ATLANTO-AXIALE DISLOKATION

Tabelle 2: Klinische Anzeichen einer atlantoaxialen Dislokation (Yang et al. 2014)

Weniger ernste Anzeichen	Mäßige Anzeichen	Schwerste Anzeichen
<ul style="list-style-type: none"> • Ungefähr 50 % der Patienten haben Nackenschmerzen und/oder eine Einschränkung der Nackenbewegung • 70 % der Patienten weisen Schwäche und/oder Taubheit auf • 90 % der Patienten weisen pyramidale Symptome auf 	<ul style="list-style-type: none"> • Sphinkter-Störungen • Dysfunktion des unteren Hirnnervs • Atembeschwerden 	<ul style="list-style-type: none"> • Myelopathie • Atmungsausfall • Dissektion der Arteria vertebralis • Neurologischer Kompromiss • Selten Tetraplegie • Tod, wenn unbehandelt

2.2.4. ATLANTO-AXIALE DISLOKATION

Atlantodentales Intervall (ADI)

Kleiner schlitzförmiger Raum zwischen dem hinteren Aspekt des vorderen Atlasrings und dem vorderen Aspekt des Warzenfortsatzes

Gemessen durch Beugung und Streckung Röntgenbild des Halses.

Messung der sagittalen Röntgenaufnahme. Von einer nach oben projizierten Linie entlang der vorderen Grenze zum Achskörper bis zum vorderen Bogen des Atlas

ADI ist bei Kopfbewegungen konstant. Normalerweise 3 mm bei Erwachsenen, 5 mm bei Kindern.

70% der atlantoaxialen Kliniken sind auf eine anteriore Luxation zurückzuführen.

2.2.4. ATLANTO-AXIALE DISLOKATION



Abbildung 6. ADI während der Flexo-Extensió-Bewegung der Halswirbelsäule (aus Yang et al. 2014)

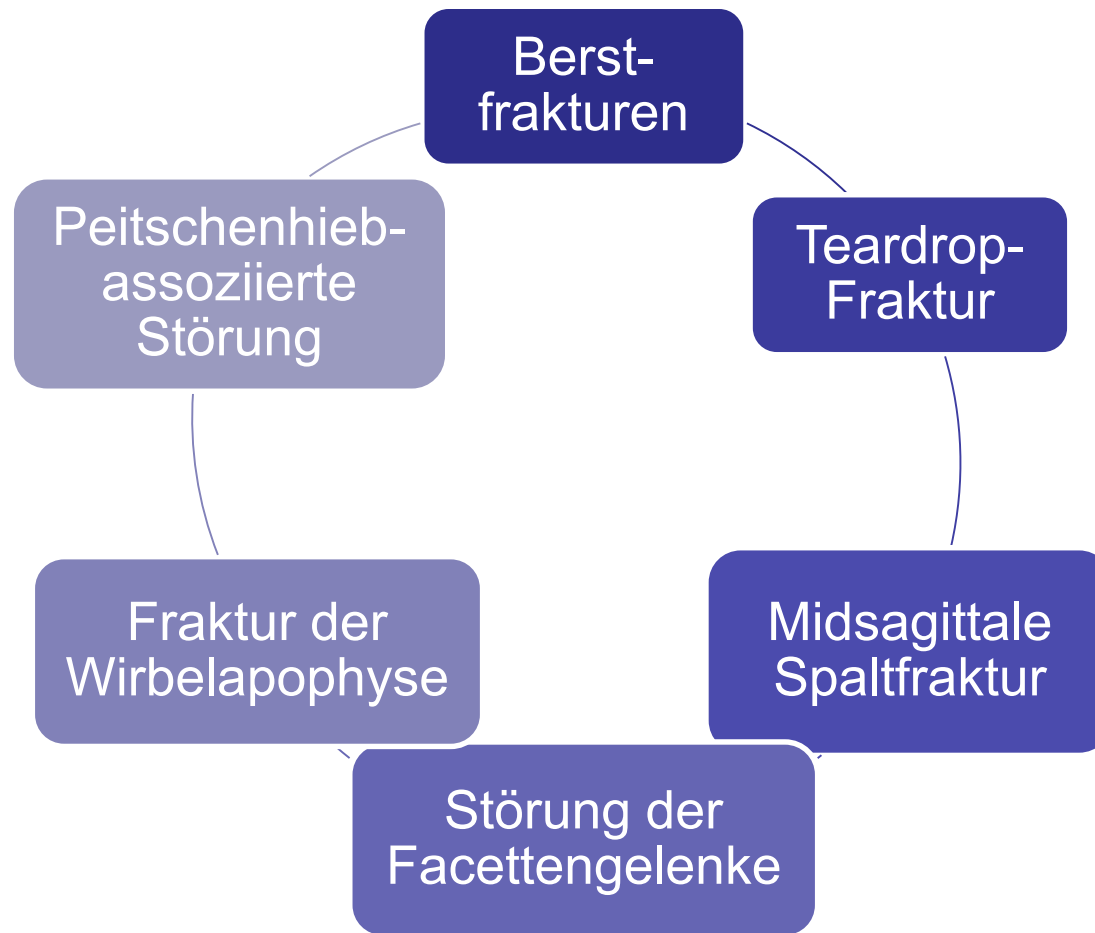
2.2.5. BRUCH DER ACHSE

Bruch der Achse



- Die häufigste Fraktur der Wirbelsäule (10 % aller Wirbelsäulenverletzungen).
- Klinisch stumm, sofern sie keine Rückenmarkskompression verursachen.
- Eine Odontoidfraktur kann sowohl durch Extensions- als auch durch Flexionskräfte verursacht werden.
- Die Verletzung der alaren, transversalen, anterioren und posterioren Längsbänder kann zu einem instabilen C1-2-Komplex führen.
- Die traumatische Spondylolisthesis des Axis erzeugt eine dramatische Instabilität.
- Die untere Halswirbelsäule kompensiert die veränderte sagitale Balance der oberen Halswirbelsäule.

2.3. VERLETZUNGEN DER UNTEREN HALSWIRBELSÄULE



2.3.1. SPRENGBRÜCHE

Axiale
Belastungskraft in
der Halswirbelsäule

Nackenposition in
Neutralstellung.
Keine Flexionskraft
angewendet.

Kompressions-
fraktur

Wirbelkörper von
C3 bis T1 können
verletzt sein

Posteriorer
Bandkomplex bleibt
intakt

Kraft kann den
Wirbelkörper
retropulsieren und
eine Verletzung des
Rückenmarks



Abbildung 7. Sagittales CT zeigt C5-6 Berstungsfraktur mit beeinträchtigtem Rückenmarkskanal (von Neupsykey.com)

2.3.2. TRÄNENFRAKTUR

Erzeugt bei gemischten axialen Kompressions- und Flexionskräften

Hinterer Teil des Wirbelkörpers retropulsiert in den Kanal.

Posteriore Subluxation des Wirbelkörpers

Akute Kyphose

Unterbrechung des vorderen und hinteren Längsbandes

Hohe Inzidenz von Tetraplegie.

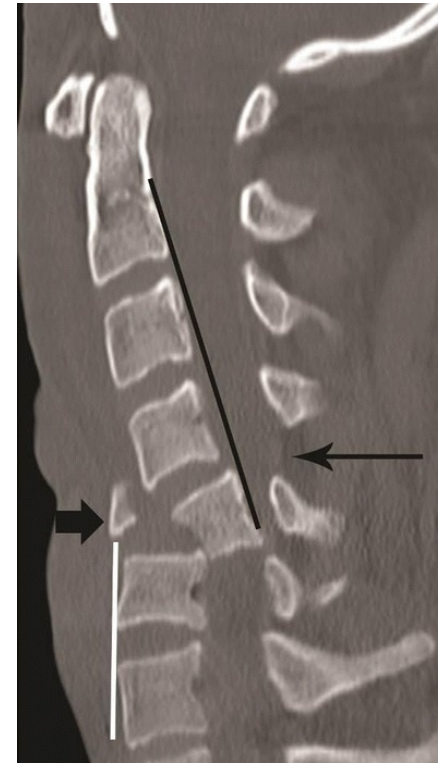


Abbildung 8. Sagittal-CT Teardrop-Fraktur bei junger Patientin (von ResearchGate.com)

2.3.3. MIDSAGITTALE SPALTFRAKTUR

Variation des Berstbruchs.

Normalerweise in der unteren Halswirbelsäule (C4-5-6) gesehen

Die geschlossene knöcherne Ringform C4-5-6 bestimmt diese Fraktur.

Fraktur in der Lamelle und Facettengelenkstörung durch Wirbelkörperfraktur.

Hoch und glänzend instabile Verletzung.

Knöcherne Körperteile stoßen oft auf das Rückenmark.

2.3.4. STÖRUNG DER FACETTENGELLENKE

Flexions-/Extensionskräfte gemischt mit Rotationskräften können zu einer Facettenluxation führen.

Meist sind die Ebenen C4-5 oder C5-6 betroffen.

Inferiore Facetten des oberen Wirbels gleiten über den unteren Wirbel

Kann eine Fraktur in einer oder beiden Wirbelfacetten beinhalten.

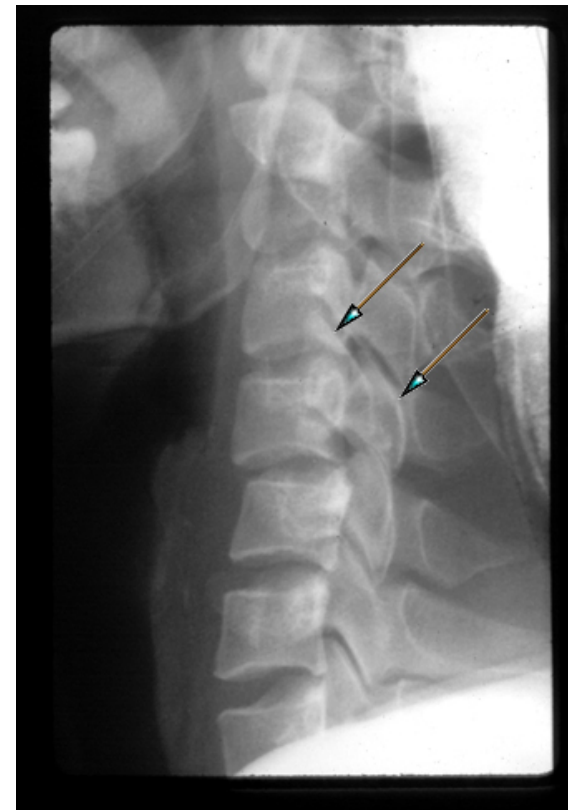
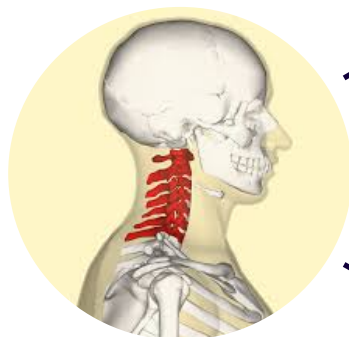


Abbildung 9. Bilaterale Facettenluxation (von Orthobullets.com)

2.3.4. STÖRUNG DER FACETTENGELLENKE



Unilaterale
Facettenver-
schiebung

Beidseitige
Facettenver-
schiebung

- Die wirkenden Kräfte sind meist flexionell und rotatorisch.
- Häufig Monoradikulopathie-Symptom
- Die wirkenden Kräfte sind meist Flexion/Distraktion.
- Geringere rotatorische Kräfte als bei einseitiger Luxation.
- Die einwirkenden Kräfte lassen die obere Halswirbelsäule nach anterior über die untere Halswirbelsäule verrutschen.

2.3.5. FRAKTUR DER DORNAPOPHYSE

Ruptur eines oder mehrerer zervikaler Dornfortsätze.

Meist als "Baggerbruch" bezeichnet

Hohe Kraftübertragung vom Schultergürtel auf die Dornfortsatzapophyse

Die Fraktur befindet sich in der Regel in C6-7 aufgrund seiner längeren Dornfortsätze

Dornfortsätze sind nicht in der Lage, ein hohes Beugemoment zu ertragen

Fraktur nahe am Wirbelkörper

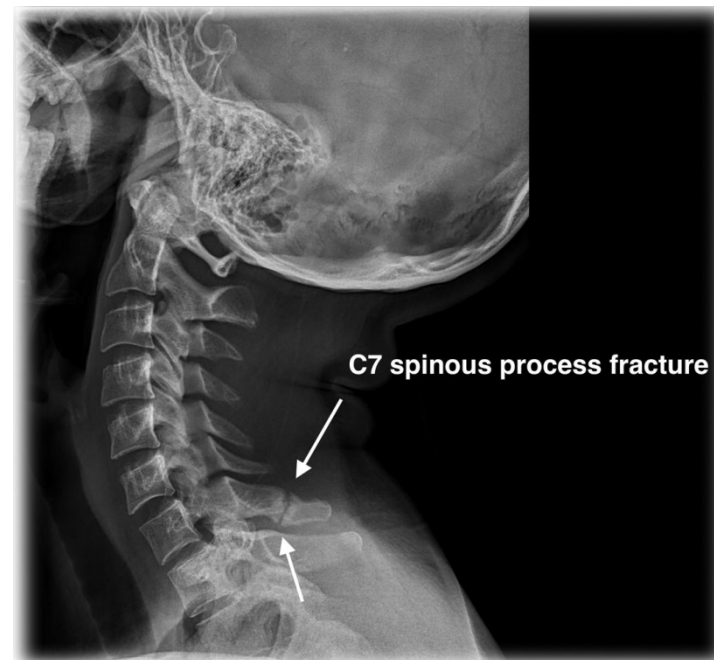


Abbildung 10. Fraktur des Dornfortsatzes von C7 (aus earthlab.com)

2.3.6. PEITSCHENHIEB-ASSOZIIERTE STÖRUNG

Begriff zur Beschreibung der klinischen Manifestationen eines Schleudertraumas

Mechanismus der Beschleunigung/Verzögerung der Energieübertragung auf den Hals

Hergestellt aus Heck- oder Seitenaufprall-Kraftfahrzeugkollisionen

Wird auch bei Tauchaktivitäten erzeugt.

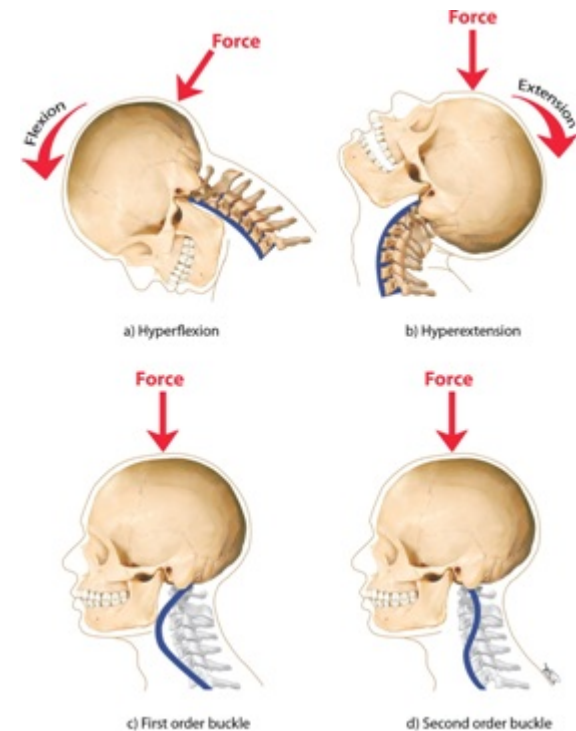


Abbildung 11. Schleudertrauma-Mechanismus und aufgebrachte Vektorkraft (aus activephysiotherapy.com)

2.3.6. PEITSCHENHIEB-ASSOZIIERTE STÖRUNG

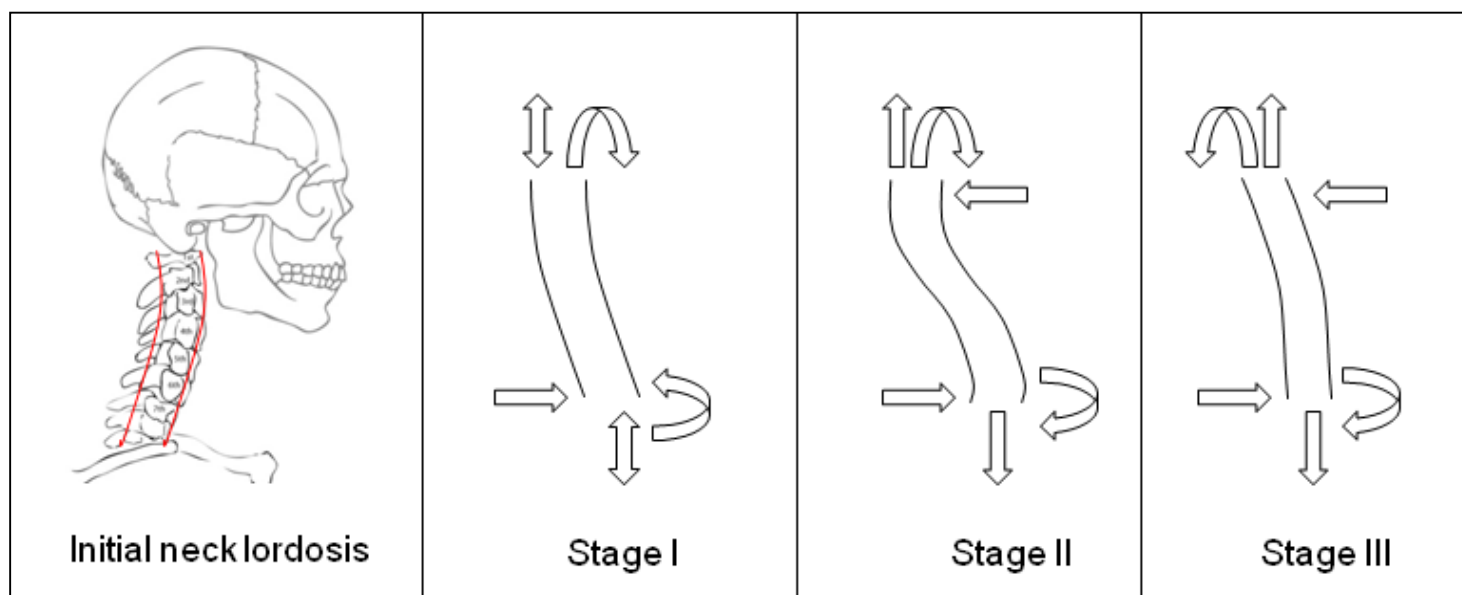


Abbildung 12. Modelle der Halsverformung sowie Kraft- und Momentendiagramme in drei Stadien eines Heckaufpralls (aus Luan F. et al. 2009)

2.3.6. PEITSCHENHIEB-ASSOZIIERTE STÖRUNG

Tabelle 3: Phasen und kinematische Ereignisse während eines Heckaufpralls (Kaneoka

Phase 1: Schlittenbewegung	Phase 2: Nacken-Axialkraft	Phase 3: Axial- und Querkraft	Phase 4: Vollauszug
0-40 ms	40-100 ms	100-160 ms	150-220 ms
a. Der Sitz beginnt auf den Rücken des Probanden zu drücken	a. Der Oberkörper bewegt sich nach vorne - gedrückt von der Rückenlehne	a. Der Schlitten bremst den Rumpf ab und bewegt sich vorwärts mit einer gewissen Rückwärtsrotation	a. Der Rumpf bewegt sich nach vorne und nach unten
b. Die Wirbelsäule beginnt sich zu begradigen	b. Der Rumpf bewegt sich parallel zur Sitzneigung nach oben und verursacht durch die Trägheit des Kopfes eine axiale Kompression der Halswirbelsäule, die ein Maximum erreicht	b. Die Axialkraft auf den Hals nimmt ab, während die Scherkraft auf den Hals bei etwa 120 ms einen Spitzenwert erreicht	b. Die Kopf- und Halsdrehung erreicht die volle Ausdehnung
c. Die zervikale Bewegung ist nicht erfolgt	c. Der Kopf bleibt aufgrund der Trägheit stationär, mit einer leichten Anfangsbeugung	c. Der Kopf beginnt, sich in die Verlängerung zu drehen	c. Scher- und Axialkräfte im Hals nehmen ab
d. Keine muskuläre Reaktion im Nacken	d. C6 rotiert früher in die Extension als die oberen Wirbelsegmente (C3, C4 und C5)	d. Die Halswirbelsäule bewegt sich in der Verlängerung in die richtige Richtung	d. Die muskuläre Entladung ist um ca. 220 ms beendet
	e. Die Halswirbel nehmen eine "S"-Form an, wobei der obere Bereich in Flexion und der untere Bereich in Extension ist	e. Das EMG des Sternocleidomastoideus entlädt sich ab ca. 115 ms	
	f. Keine muskuläre Reaktion im Nacken		

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

Teil 3. Biomechanische Veränderung der Brust- und Lendenwirbelsäule

3.1. ENDPLATTENFRAKTUREN

Hauptsächlich in der Brust- und oberen Lendenwirbelsäule lokalisiert

Erzeugt durch axiale Druck-, Biegekräfte oder eine Mischung aus beidem

Frakturen, die im zentralen Bereich, im peripheren Bereich oder quer zur Endplatte liegen

Es spielt eine primäre Rolle bei der Berstungsfraktur

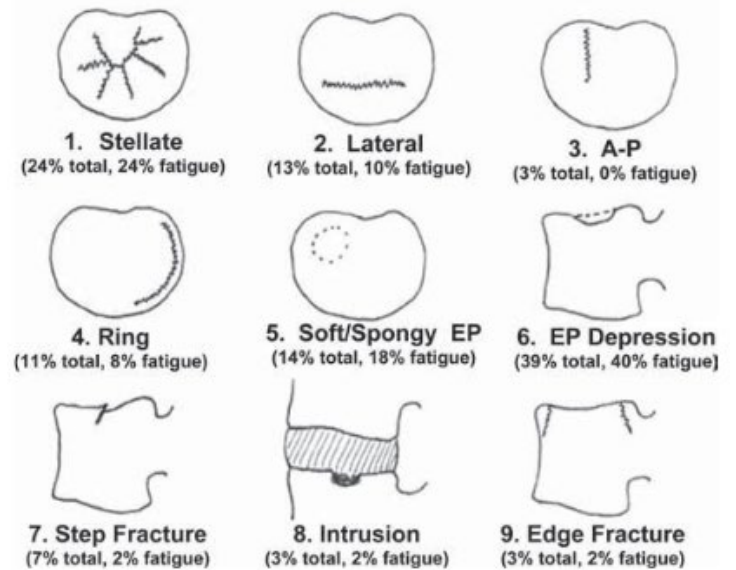


Abbildung 12. Klassifizierungssystem für vertebrale Endplattenfrakturen (aus Gallagher S. et al. 2005)

3.2. BERSTFRAKTUREN

Erzeugt durch Druckkräfte hoher Größe.

Anteriorer und posteriorer Wirbelkörperausfall, Körperhöhenverlust und Retropulsión.

T11 bis L2 ist biomechanisch das schwächste Segment gegen diese Fraktur

Geringere neurologische Anzeichen als bei HWS-Burstfrakturen

Kann durch das hintere Längsband stabilisiert werden

Klassifiziert als mechanisch, neurologisch oder kombiniert

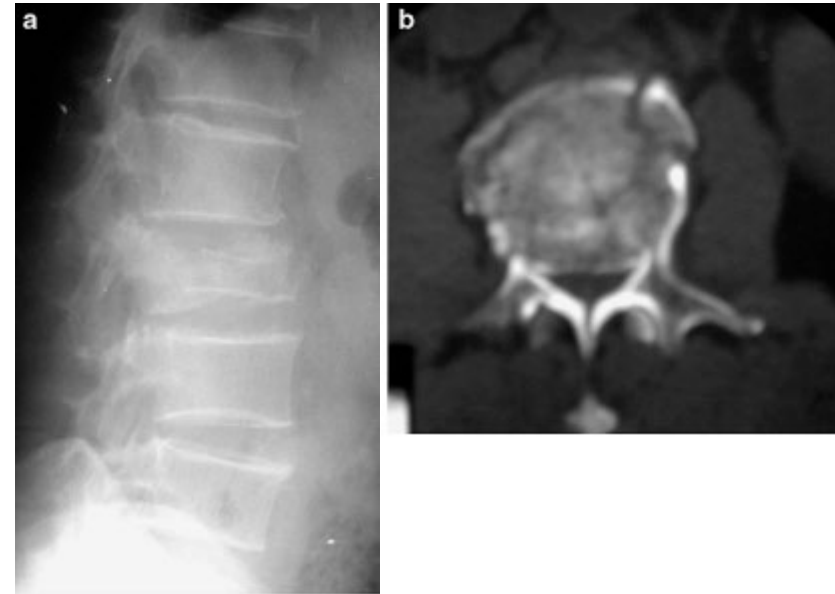


Abbildung 13. a) Das laterale Röntgenbild zeigt eine L2-Burstfraktur bei einem 59-jährigen Mann. b) Das axiale CT-Bild zeigt eine 70%ige Kanalbeeinträchtigung. Bild aus Altay M. et al. 2007.

3.3. KEILFRAKTUREN

Erzeugt durch eine axiale Druckkraft in Kombination mit einem Biegemoment

Mechanisches Versagen im vorderen Bereich des Wirbelkörpers

Die Wirkungslinie der Druckkraft liegt anterior des Wirbelkörpers

Meist Schädigung der hinteren Bänder

Häufige Frakturen bei Osteoporose-Patienten

T12-L1 hat die höchste Frakturinzidenz aufgrund der erhöhten Belastung



Abbildung 14. Kompressionskeilfraktur aus sagittaler multiplanarer Rekonstruktion. Die Injurie hat keine Beteiligung der hinteren Elemente. Bild aus González-Montané J.L. 2014.

3.4. VERLETZUNGEN DURCH DEN SICHERHEITSGURT

Häufige Läsion im Bereich des thorakolumbalen Überganges

Fraktur Ergebnis einer Hyperflexion gemischt mit einer Distraktionskraft

Folgen wie Bänderverletzung, Knochenbruch oder Knochenbruch-Dislokation

Bandaurisse mit Facettenversetzung sind instabil

3.4. VERLETZUNGEN DURCH DEN SICHERHEITSGURT

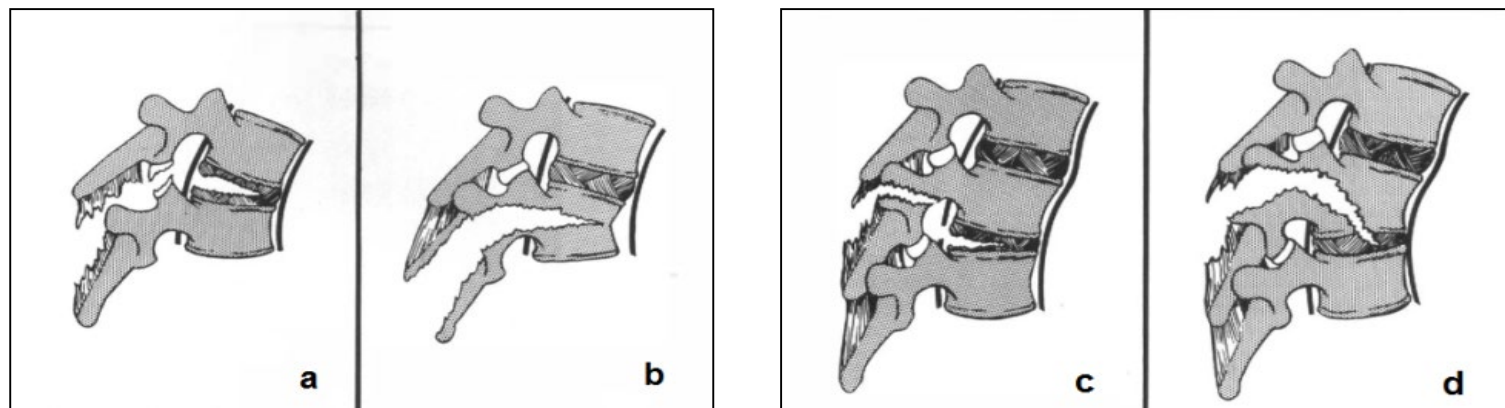


Abbildung 15. Klassifizierung von Anschnallfrakturen. a: reine Bandzerreißung mit Facettenverschiebung. b: Zufallsfraktur mit horizontaler Spaltung des Knochens. c: Verletzung des posterioren Bandkomplexes, des Pedikels und der Bandscheibe. d: Verletzung des hinteren Bandkomplexes, Pedikel, Körper und Bandscheibe. a und b sind Verletzungen in einer Ebene. c und d sind Verletzungen in zwei Ebenen. Bild aus Yu WY. et al. 1986

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

Teil 4. Biomechanische Überlegungen nach Wirbelsäuleneingriff

4.1. INTERVENTION AN DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE

Okziput-C1-C2-Komplex

- Der beweglichste Teil der Halswirbelsäule
- Sie leistet den größten Beitrag zur Flexion-Extension

C1-C2-Komplex

- Axiale Rotation als Hauptbewegungsbeitrag

4.1. INTERVENTION AN DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE

Okzipitozervikale Fusion

- Hauptindikation für dieses Verfahren: Instabilität des kraniozervikalen Übergangs.
- Erkrankungen wie Trauma, Malignität, rheumatoide Arthritis, angeborene Anomalien oder Infektionskrankheiten.

Verhindert

- Komprimierung der neuralen Strukturen.
- Zervikale Deformitäten.
- Reduktion von Schmerzen.

Komplikationen

- Einschränkung der zervikalen Beweglichkeit.
- Dysnea oder Dysphagie.

4.1. INTERVENTION AN DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE

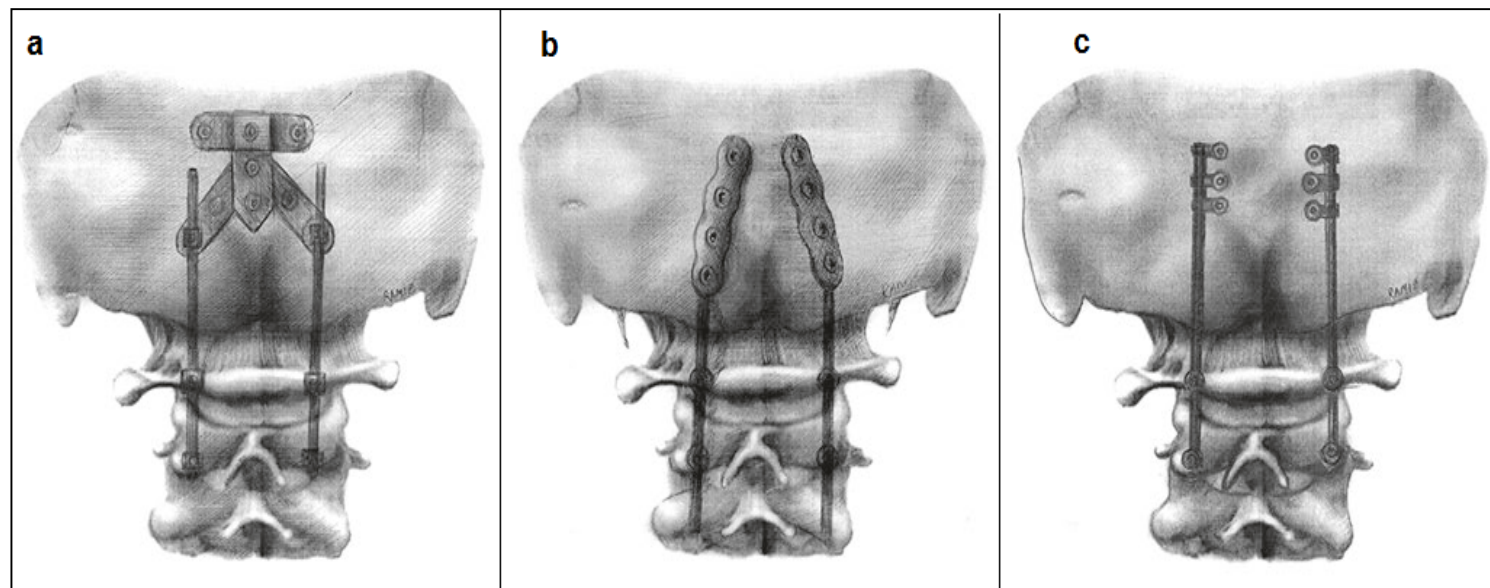


Abbildung 16. Die gebräuchlichsten schraubenbasierten Konstruktionen. (a) Okzipitalplatte. (b) Gelenkstangen mit integriertem Okzipitalplattenende. (c) Ösenverbinder nach medial gerichtet. Bild aus Ashafai NS. et al. 2019.

4.2. UNTERER ZERVIKALER EINGRIFF

Immobilisierung oder Gelenkersatz

- Kann sich aufgrund biomechanischer Veränderungen auf benachbarte Ebenen auswirken.

Erfahrungen aus der Forschung

- Es wurde kein durchschnittlicher Unterschied in der segmentalen Bewegung zwischen den Interventionen beobachtet (Nabhan A. et al)
- 25,6 % der Patienten mit anteriorer zervikaler Fusion würden innerhalb von 10 Jahren eine neue symptomatische Erkrankung in benachbarten Segmenten entwickeln.

4.2. UNTERER ZERVIKALER EINGRIFF

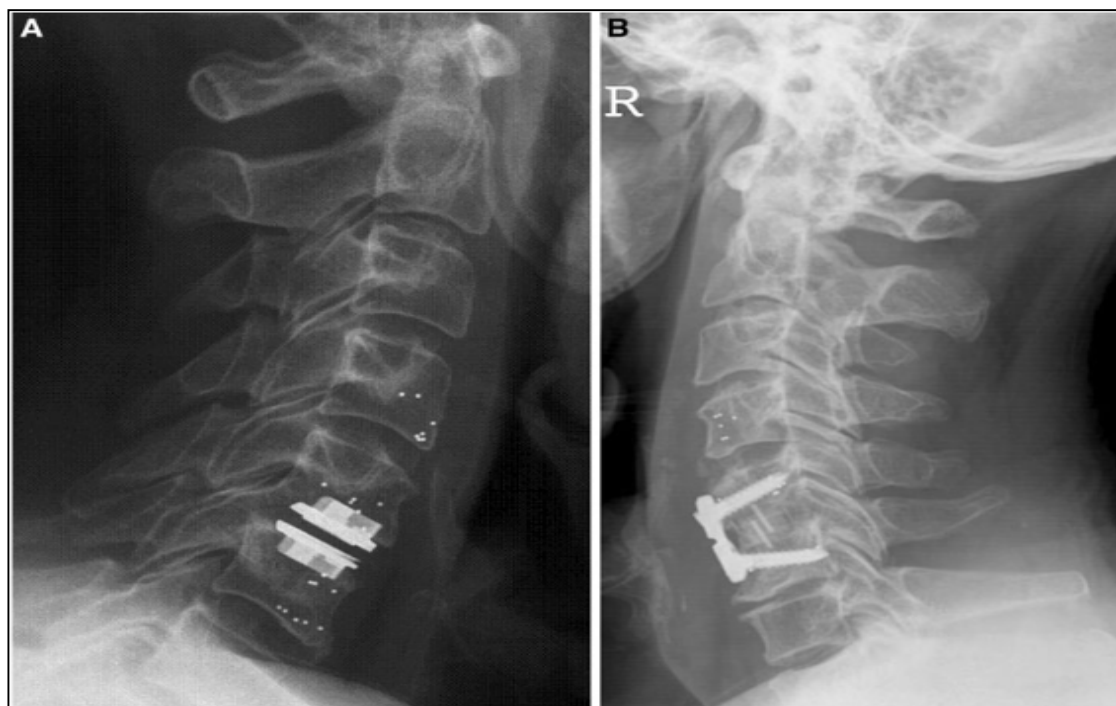


Abbildung 17. Seitliche Röntgenaufnahme der Halswirbelsäule mit Darstellung der Tantalmarker der Wirbelkörper C4, C5 und C6. a - Eingearbeitete Tantalmarker nach Bandscheibenersatz. b - Dasselbe mit Titanplattenfixierung. Bild aus der Studie von Nabhan A. et al (2011).

4.3. THORAKALER UND LUMBALER EINGRIFF

Wirbelsäulenversteifung

- Die T12-L1-Ebene ist die häufigste Eingriffszone.
- Zufriedenstellende Kurzzeittechnik.
- Langfristige Schwierigkeiten in benachbarten Ebenen.
- Syntomatische Degeneration ist einer der häufigsten Gründe für eine weitere Operation.

Ausrichtung der Wirbelsäule und des Beckens

- Beeinflusst die Belastung der Wirbelsäule.
- Der Zusammenhang mit der Bandscheibendegeneration und der Degeneration benachbarter Segmente wird intensiv diskutiert.
- Lumbale Hypolordose ist ein unabhängiger Risikofaktor für das Fortschreiten der Bandscheibendegeneration.

4.3. THORAKALER UND LUMBALER EINGRIFF

Erfahrungen aus der Forschung

- Die Studie von Se Jin Choi et al. (2018) legt nahe, dass L4-5 und L5-S1 zur spinalen Extensions- und Lateralflexions-ROM beitragen, aber keine signifikante Rolle bei spinalen Flexionsbewegungen spielen.
- Obid P. et al. (2017) Studie bestimmt den Verlust der Mobilität Segment für Segment in drei Systemen der Instrumentierung für Lendenwirbelsäule fusion von T11 bis L5.
- Es ist nicht bewiesen, dass Hybridkonstruktionen das ROM stärker einschränken als starre Instrumentierungen.

4.3. THORAKALER UND LUMBALER EINGRIFF

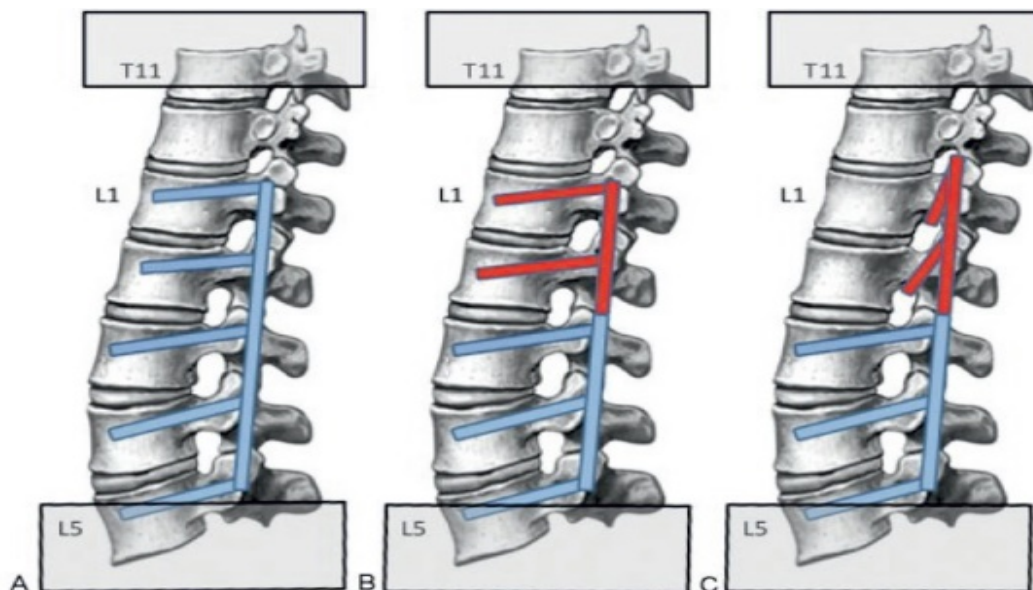


Abbildung 18. Schematische Übersicht mit dem Aufbau der drei Testgruppen aus der Studie von Obid P. et al. (2017). (A) Gruppe R: vierstufige starre Instrumentierung; (B) Gruppe D: zweistufige starre Instrumentierung (L3-L5) kombiniert mit dem Elaspine-System (Spinelab AG, Winterthur, Schweiz) (L1-L3); und (C) Gruppe H: zweistufige starre Instrumentierung (L3-L5) kombiniert mit Laminarhaken (L1-L3).

5. SCHLÜSSELIDEEN

- Es gibt verschiedene Arten von Verletzungen an der Halswirbelsäule, abhängig von der Richtung und Größe der Kraft, die auf die Wirbelsäule einwirkt: Flexion, Extension, Kompression, Distraction, Rotation.
- Die Verletzungen der oberen Halswirbelsäule führen häufig zum Tod (ca. 40 %), da die Art der Verletzung wichtige Bereiche des zentralen Nervensystems schädigen kann. Die in der Literatur am häufigsten referenzierten Verletzungen sind: Frakturen der Kondylen des Hinterhauptbeins, Atlantooccipitale Dislokation, Frakturen des Atlas, Atlantoaxiale Dislokation und Achsenfrakturen.
- Verletzungen der unteren Halswirbelsäule stellen ein breites Spektrum an Verletzungsmustern und Instabilitätsgraden dar, wobei die häufigsten sind: die Berstungsfrakturen, die Teardrop-Frakturen, die Midsagittalspaltfraktur, die Disruption der Facettengelenke, die Wirbelapophysenfraktur und die Peitschenschlag-assoziierte Störung.

5. SCHLÜSSELIDEEN

- Der große Unterschied zwischen der Halswirbelsäule und den Bereichen der Brust- und Lendenwirbelsäule besteht darin, dass letztere eine Steifigkeit hat, die die Halswirbelsäule nicht hat, so dass die Verletzungsmechanismen zwischen ihnen sehr unterschiedlich sind.
- Im thorakalen und lumbalen Bereich sind die häufigsten Verletzungen in der Regel: die Endplattenfrakturen, die Berstungsfrakturen, die Keilfrakturen und die für den thorakolumbalen Übergang typischen Sitzgurtverletzungen.
- Medizinische Behandlungen, die bei Wirbelsäulenverletzungen angewandt werden, können in der Regel konservativ oder chirurgisch sein, abhängig von der Schwere der Verletzung und der Stabilität des beschädigten Wirbelsäulensegments. Verschiedene medizinische Entscheidungen können einen wichtigen Einfluss auf die Funktionalität haben, da sie biomechanische Veränderungen der Wirbelfunktion bewirken, um die Läsion zu reparieren oder zu stabilisieren.

5. SCHLÜSSELIDEEN

- An der oberen Halswirbelsäule können Immobilisierungstechniken eine Einschränkung der zervikalen Mobilität bis zu 40 % der gesamten zervikalen Flexion-Extension erreichen, und wenn Okziput-C1 und C2 betroffen sind, kann die Einschränkung 60 % der gesamten zervikalen Rotation und 10 % der gesamten lateralen Biegung erreichen.
- In der unteren Halswirbelsäule bringen schwerwiegendere Eingriffe wie die Fusion die Erkrankung des angrenzenden Segments mit sich und induzieren Stress, Belastung und intradiskalen Druck in den an die Fusionsstelle angrenzenden Ebenen.
- In der Brust- und Lendenwirbelsäule schränken schwerere Eingriffe ebenfalls die Beweglichkeit ein. Kritische Fusionsstellen für Funktionsverlust sind T11-L5, L4-L5 und L5-S1.

6. BIBLIOGRAPHIE

1. Anderson P.A., and P.X. Montesano. Morphology and Treatment of Occipital Condyle Fractures. Spine (Phila Pa 1976). 1988 Jul; 13(7):731-6.
2. Altay M., Ozkurt B., Aktekin CN., Ozturk AM., Dogan O., Tabak A.Y. Treatment of unstable thoracolumbar junction burst fractures with short- or long-segment posterior fixation in magerl type a fractures. Eur Spine J. 2007 Aug; 16(8): 1145–1155.
3. Ashafai NS., Visocchi M., Wasik N. Occipitocervical Fusion: an updated review. Acta Neurochir Suppl 2019;125:247-252.
4. Bensch FV, Koivikko MP, Kiuru MJ, Koskinen SK. The incidence and distribution of burst fractures. Emerg Radiol. 2006;12:124–9.
5. Boughton OR, Bernard J, Szarko M (2015). Odontoid process fractures: the role of the ligaments in maintaining stability. A biomechanical, cadaveric study. SICOT J. 1: 11.
6. Cahueque M., Cobar A., Zuñiga C., Caldera G. Management of burst fractures in the thoracolumbar spine. Journal of Orthopaedics 13 (2016) 278–281.
7. Christiansen BA., Bouxsein ML. Biomechanics of Vertebral Fractures and the VertebralFracture Cascade. Curr Osteoporos Rep (2010) 8:198–204.
8. Comín M., Prat J., Soler-G C. et al. (1995) Biomecánica del Raquis y Sistemas reparación. 1º Edición, Instituto de Biomecánica de Valencia, España.
9. Curry WH., Pintar F.A., Doan N.B, Nguyen H.S., Eckardt G., Baisden J.L., Maiman D.J., Paskoff G.R., Shender B.S., Stemper B.D. Lumbar spine endplate fractures: Biomechanical evaluation and clinical considerations through experimental induction of injury. J Orthop Res. 2016 Jun;34(6):1084-91.

6. BIBLIOGRAPHIE

10. Cusick J.F. and Yoganandan N. Biomechanics of the cervical spine 4: Major Injuries. *Clinical Biomechanics* Vol 17, Issue 1 January 2002, Pages 1-20.
11. Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine*. 1983;8:817–31.
12. Dickman C.A., Greene K.A., Sonntag V.K. Injuries Involving the transverse atlantal ligament: Classification and treatment guidelines based upon experience with 39 injuries. *Neurosurgery* 1996 Jan; 38(1):44-50.
13. Dowdell J., Kim J., Overley S., Hecht A. Biomechanics and common mechanisms of injury of the cervical spine. *Hand Clin Neurol* 2018;158:337-344.
14. Ghobrial GM., Lavelle W.F., Florman J.E., Riew K.D., Levi A.D. Symptomatic adjacent level disease requiring surgery: analysis of 10-year results from a prospective randomized, clinical trial comparing cervical disc arthroplasty to anterior cervical fusion. *Neurosurgery* 2019 Feb 1;84(2):347-354.
15. Gonzáles-Montané J.L. What can CT and MRI add to the assessment of symptomatic vertebral compression fracture in osteoporotic patients? From Congress ECR 2014, Number of poster C-0960. DOI: 10.1594/ecr2014/C-0960.
16. Hall GC., Kinsman MJ., Nazar RG., Hruska RT., Mansfield KJ., Boakye M., Rahme R. Atlanto-occipital dislocation. *World J Orthop*. 2015 Mar 18;6(2):236-43.
17. Heary R.F., Sanjeev K. Decision-making in burst fractures of the thoracolumbar and lumbar spine. *Indian J Orthop*. 2007 Oct-Dec; 41 (4): 268-276.

6. BIBLIOGRAPHIE

18. Hilibrand A.S., Carlson G.D., Palumbo M.A., Jones P.K., Bohlman H.H. Radiculopathy and myelopathy at segments adjacent to the site of a previous anterior cervical arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am.* 1999 Apr;81(4):519-28.
19. Izeki M., Neo M., Takemoto M., Fujibayashi S., Ito H., Nagal K., Matsuda S. The O-C2 angle established at occipito-cervical fusion dictates the patient's destiny in terms of postoperative dyspnea and/or dysphagia. *Eur Spine J* (2014) 23:328-336.
20. Kaneoka K, Ono K, Inami S, et al. The human cervical spine motion during rear impact collisions: a proposed cervical facet injury mechanism during whiplash trauma. *J Whipl Relat Disord* 2002; 1(1): 85-97.
21. Lei Li, Wen-Fei Liu, Hong-Kun Jiang, Yun-Peng Li. Biomechanical evaluation of four different posterior screw and rod fixation techniques for the treatment of the odontoid fractures. *Int J Clin Exp Med.* 2015;8(6):8571-8580.
22. Luan F, Yang KH, Deng B, et al. Qualitative analysis of neck kinematics during low-speed rear-end impact. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2000;15(9):649-657.
23. Martín-Ferrer S. High cervical spine injuries: classification, therapeutic indications, and surgical approaches: 286 consecutive cases. *Neurocirugia (Astur).* 2006 Oct;17(5):391-419.
24. Miyata M., Neo M., Fujibayashi S., Ito H. Takemoto M., Nakamura T. O-C2 angle as a predictor of dyspnea and/or dysphagia after occipitocervical fusion. *Spine (Phila Pa 1976).* 2009 Jan 15;34(2):184-8.

6. BIBLIOGRAPHIE

25. Nabhan A., Ishak B., Steudel W.L., Ramadhan S., Steimer O. Assessment of adjacent-segment mobility after cervical disc replacement versus fusion: RCT with 1 year's results. *Eur Spine J* (2011) 20:934-941.
26. Nightingale, R, Myers, BS, and Yoganandan, N, *Biomechanical Aspects of Cervical Spine Trauma, in Accidental Injury: Biomechanics and Prevention*, N. Yoganandan, A. Naham, and J.W. Melvin, Editors. 2014, Springer: New York, NY.
27. Obid P., Danyali R., Kueny R., Huber G., Reichl M., Richter A., Niemeyer T., Morlock M., Püschel K., Übeyli H. Hybrid Instrumentation in Lumbar Spinal Fusion: A Biomechanical Evaluation of three different instrumentation techniques. *Global Spine J*. 2017 Feb;7(1):47-53.
28. Pertersilge CA., Emery SE. Thoracolumbar burst fracture: Evaluating stability. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI* Volume 17, Issue 2, April 1996, Pages 105-113.
29. Pryputniewicz D.M. and Hadley M.N. Axis Fractures. *Neurosurgery* 2010 Mar;66(3 Suppl):68-82.
30. Rihn JA, Fisher C, Harrop J et al. (2010). Assessment of the posterior ligamentous complex following acute cervical spine trauma. *J Bone Joint Surg Am*. 92: 583–589.
31. Ryba L., Cienciala J., Chaloupka R., Repko M., Vyskocil R. Injury of Upper Cervical Spine. *Soud. Lek* 2016;61(2):20-5.
32. Se Jin Choi, Ji Won Moon, Dalsung Ryu, Chang Hyun Oh, Seung Hwan Yoon. Range of Motion According to the fusion level after lumbar spine fusion: A retrospective study. *Nerve*. 2018;4(2):55-59.

6. BIBLIOGRAPHIE

33. Spitzer WO, Skovron ML, Salmi LR, et al. Scientific mono-graph of the Quebec Task Force on Whiplash-Associated Disorders:redefining “whiplash” and its management. Spine 1995; 20(8Suppl): 1S-73S.
34. Torreti J.A. nd Sengupta D.K. Cervical Spine Trauma. Indian J Orthop 2007 Oct;41(4):255-67.
35. Traynelis, V.C., Marano, G.D., Dunker, R.O., Kaufman,H.H.: Taumatic atlanto-occipital dislocation: Case report. J Neurosurg 1986; 65: 863-870.
36. Tuli S., Charles H.T., Fehlings M.G., Mackay M. Occipital Condyle Fractures. Neurosurgery, Volume 41, Issue 2, August 1997, Pages 368–377.
37. Waseem M., Upadhyay R., Al-Husayni H., and Agyare S. Occipital condyle fracture in a patient with neck pain. Int J Emerg Med. 2014; 7:5.
38. Wenning KE. and Hoffmann M.F. Does isolated atlantoaxial fusion resul in better clinical outcome compared to occipitocervical fusion? Journal of Orthoedic Surgery and Research (2020) 15:8.
39. Yang S.Y., Boniello A.J., Poorman C.E., Chang A.L., Wang S., Passias P.G. A review of the diagnosis and treatment of atlantoaxial dislocations. Global Spine J. 2014 Aug; 4(3): 197–210.
40. Yu WY, Siu CM. Seat belt injuries of the lumbar spine--stable or unstable? Paraplegia. 1989 Dec;27(6):450-6.



Die Unterstützung der Europäischen Kommission für die Erstellung dieser Veröffentlichung stellt keine Billigung des Inhalts dar, welcher nur die Ansichten der Verfasser wiedergibt, und die Kommission kann nicht für eine etwaige Verwendung der darin enthaltenen Informationen haftbar gemacht werden.

