

# 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

Thema: Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule



## Index

1. ZIELE2	
2. BIOMECHANIK DER WICHTIGSTEN VERLETZUNGEN DER HALSWIRBELSÄULE	3
2.1 Verletzungen der oberen Halswirbelsäule	3
2.1.1. Frakturen der Kondylen des Hinterhauptbeins	4
2.1.2 Atlantooccipitale Verrenkung	5
2.1.3. Frakturen des Atlas	6
2.1.4. Atlantoaxiale Dislokation	7
2.1.5. Brüche der Achse	9
2.2 Verletzungen der unteren Halswirbelsäule	10
2.2.1 Berstfrakturen	10
2.2.2 Teardrop-Fraktur	10
2.2.3 Midsagittale Spaltfraktur	11
2.2.4 Störung der Facettengelenke	11
2.2.5 Wirbelapophysenfraktur	11
2.2.6 Peitschenschlag-assoziierte Dirsorder	12
3. BIOMECHANIK DER WICHTIGSTEN VERLETZUNGEN DER BRUST- UND LENDENWIRBELSÄULE	15
3.1 Endplattenfrakturen	15
3.2 Berstfrakturen	15
3.3 Keilfrakturen	16
3.4 Verletzungen durch Sicherheitsgurte	17
4. BIOMECHANISCHE ÜBERLEGUNGEN IM ZUSAMMENHANG MIT EINGRIFFEN AN DER WIRBELSÄULE	19
4.1 Kopfgelenkiger Eingriff	19
4.2 Eingriff an der unteren Halswirbelsäule	20
4.3 Thorakaler und lumbaler Eingriff	21
5. SCHLÜSSELIDEEN	24
6. REFERENZEN	25

## 1. Ziele

---

In dieser Lehreinheit wird der Lernende mit den theoretischen Aspekten der Biomechanik der verschiedenen Wirbelsäulensegmente in Übereinstimmung mit den Hauptpathologien und möglichen chirurgischen Eingriffen und Behandlungsverfahren vertraut gemacht.

Die Ziele dieser didaktischen Einheit sind:

1. Erlernen der Biomechanik hinter den wichtigsten Pathologien der Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule.
2. Kenntnis der biomechanischen Überlegungen im Zusammenhang mit den wichtigsten Interventionstechniken bei Wirbelsäulenverletzungen.

## 2. Biomechanik der wichtigsten Verletzungen der Halswirbelsäule

Es gibt eine Vielzahl von reproduzierbaren Verletzungsmustern, die auf der Richtung und Größe der auf das höchste Segment der Wirbelsäule einwirkenden Kraft basieren. Flexion (und Lateralflexion), Extension, Kompression, Scherung und Rotation (Abbildung 1) sind die primären äußeren Kräfte, die auf die Halswirbelsäule einwirken können. Aufgrund der Funktion dieses Segments selbst (Positionierung des Kopfes bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Stabilität und Schutz des Rückenmarks) können die Läsionen der Halswirbelsäule von leichten bis hin zu lebensbedrohlichen Läsionen reichen.

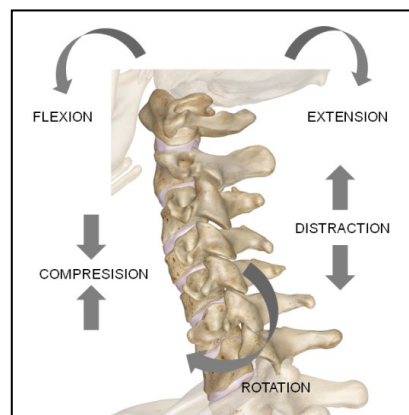


Abbildung 1 - Verletzungsmechanismen der Halswirbelsäule. (Wiedergegeben aus Cusick JF, Yoganandan N (2002) Biomechanics of the cervical spine 4: major injuries. Clin Biomech (Bristol, Avon) 17: 1-20.) Zeichnung entnommen aus [www. innerbody.com](http://www.innerbody.com).

### 2.1 Verletzungen der oberen Halswirbelsäule

Diese Art von Verletzungen machen 1/3 aller Verletzungen der Halswirbelsäule aus und führen in ca. 40% zum Tod. Die Ebenen der Halswirbelsäule, die verletzt werden können, sind:

- Frakturen der Kondylen des Hinterhauptbeins
- Atlantookipitale Dislokation
- Frakturen des Atlas
- Atlantoaxiale Dislokation
- Frakturen der Achse.

Die meisten Fälle bei jüngeren Patienten werden durch hochenergetische Traumata verursacht, während bei älteren Menschen, wegen der Osteoporose, viel weniger Energie benötigt wird und selbst einfache Stürze die Verletzung der Halswirbelsäule verursachen können. Deshalb kann die Ätiologie der Verletzungen unterschiedlich sein. Bei jüngeren Patienten sind vor allem durch Autounfälle, Motorrad- und Fahrradunfälle und Fußgänger Stürze mit dem Auto und in der älteren Bevölkerung sind der Hauptgrund fällt verursacht.

Der Mechanismus der Verletzung ist axiale Kraft, Hyperflexion, Hyperextension, Lateroflexion, Rotation und eine Kombination aus allen. Die klinischen Symptome können von Nackenschmerzen, eingeschränktem Bewegungsumfang, antalgischer Stellung des Kopfes, Verletzung der Hirnnerven und verschiedenen neurologischen Symptomen von der Nervenreizung bis zur Tetraplegie reichen.

### Erinnerung

Eine Luxation ist definiert als "Verschiebung eines Knochens aus seiner natürlichen Position im Gelenk". Dies ist der Fall, wenn sich die beiden Knochen, die ein Gelenk bilden, vollständig voneinander trennen.

Eine Subluxation ist grundsätzlich als "Teilverschiebung" definiert. Sie kann nicht weniger schmerzhaft sein als eine vollständige Verrenkung, aber die beiden Knochen, die das Gelenk bilden, sind immer noch teilweise in Kontakt miteinander.

## 2.1.1. Frakturen der Kondylen des Hinterhauptbeins

Okzipitalkondylenfrakturen (OCFs) sind seltene traumatische Verletzungen und wichtig, da sie mit einer Instabilität des okzipitoatlanto-axialen Gelenkkomplexes einhergehen können. Die OCFs können aufgrund der variablen Präsentation und der Unfähigkeit, sie mit einfachen Röntgenbildern zu diagnostizieren, leicht unerkannt bleiben. Sie werden jedoch mit der Computertomographie (CT) erkannt, die der Goldstandard ist, um jede Verschiebung (Abbildung 2) von Blutungen im betroffenen Bereich zu identifizieren.



Abbildung 2 - Minimal verschobene Fraktur des rechten inferioren medialen Okzipitalkondylus. Spiral-CT-Scan der Halswirbelsäule wurde von der Schädelbasis bis hinunter zum Thoraxeingang bei einer Schichtdicke von 2,5 mm durchgeführt. Bild von Muhammad Waseem *et al.* 2014.

Die am häufigsten verwendete Klassifizierung von OCFs stammt von Anderson und Montesano (1988), die die Morphologie der Fraktur, die dazugehörige Anatomie und die Biomechanik berücksichtigten (Tabelle 1). 1997 schlugen Tuli *et al.* ein neues

Klassifizierungssystem vor, das die Bildgebung zur Erkennung von Verletzungen der Bänder berücksichtigt. Diese zweite Klassifizierung gruppiert die verschiedenen Frakturtypen von Anderson und Montesano neu (Abbildung 3) und schlägt eine neue Kategorie für verschobene Frakturen vor.

Tabelle 1 - Anderson und Montesano (1988) Klassifizierung von Okzipitalkondylenfrakturen

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 tectoriale 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

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

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

## 2.1.2 Atlantooccipitale Dislokation

Die atlantooccipitale Dislokation (AOD) oder okzipitozervikale Dissoziation (OCD) beinhaltet die Dissoziation des Hinterhauptes von der Halswirbelsäule. Dies geschieht hauptsächlich,

wenn Distraktions- und Extensionskräfte auf das Okziput in Bezug auf den Atlas einwirken, obwohl die Verletzung auch durch Hyperflexion, Lateralflexion oder eine Kombination aus all dem auftreten kann. Dieser Verletzungsmechanismus kann bei schnellen Abbremsungen im Kraftfahrzeug auftreten und ist eine häufige Todesursache bei Autounfällen aufgrund der Durchtrennung des Hirnstamms oder der Vertebralarterien, die der AOD verursachen kann. Der ODA tritt bei Kindern häufiger auf, da das unterschiedliche Verhältnis zwischen Kopf und Körper im Kindesalter die traumatische Trägheit verstärkt, die notwendig ist, um diese Art von Verletzung zu erzeugen. Die Okzipitalkondylen von Kindern sind kleiner, ihre Köpfe sind im Verhältnis zu ihren Körpern größer, die atlantookzipitalen Bänder sind laxer und die Gelenkebenen der craniovertebralen Übergänge sind im Vergleich zu Erwachsenen horizontaler, was sich darin zusammenfasst, dass die craniovertebralen Übergänge bei Kindern weniger stabil sind als die von Erwachsenen.

Der AOD wurde von Traynelis et al. 1986 in drei Verletzungstypen klassifiziert (Abbildung 4). Typ I ist eine anteriore Verschiebung des Hinterhauptes relativ zum Atlas, Typ II ist eine Distraktion des Hinterhauptes vom Atlas und Typ III ist eine posteriore Verschiebung des Hinterhauptes relativ zum Atlas.

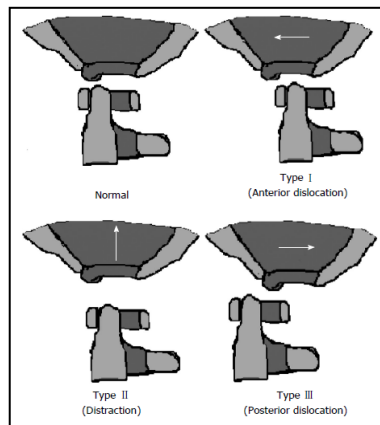


Abbildung 4 - Die Traynelis-Klassifikation für die atlantooccipitale Dislokation. Bild aus Hall GC. et al.

### 2.1.3. Frakturen des Atlas

Atlasfrakturen machen 3-13 % aller Verletzungen der Halswirbelsäule aus und sind mit einer traumatischen axialen Belastung des Kopfes durch das Hinterhaupt auf die seitlichen Massen von C1 verbunden. Allerdings können auch andere Kräfte eine Fraktur des Atlas verursachen, einschließlich Extensions-, Flexions- und Rotationskräfte. Während diese Frakturen häufig als Jefferson-Frakturen bezeichnet werden, bezieht sich die Jefferson-Fraktur eigentlich auf eine bestimmte vierteilige Fraktur des Atlas, die mit bilateralen Frakturen der vorderen und hinteren Bögen des Atlas einhergeht (Abbildung 5.A). Abhängig von den verschiedenen Kombinationen von Kräften, die gleichzeitig mit der axialen Kompression einwirken, kann eine isolierte anteriore (Abbildung 5.C) oder posteriore Bogenfraktur (Abbildung 5.D) oder eine einseitige laterale Massenfraktur (Abbildung 5.B) auftreten. In Verbindung mit der Fraktur des Atlas kann es zu einer Querbandverletzung kommen, die eine übermäßige Beweglichkeit von C1-C2 ermöglicht.

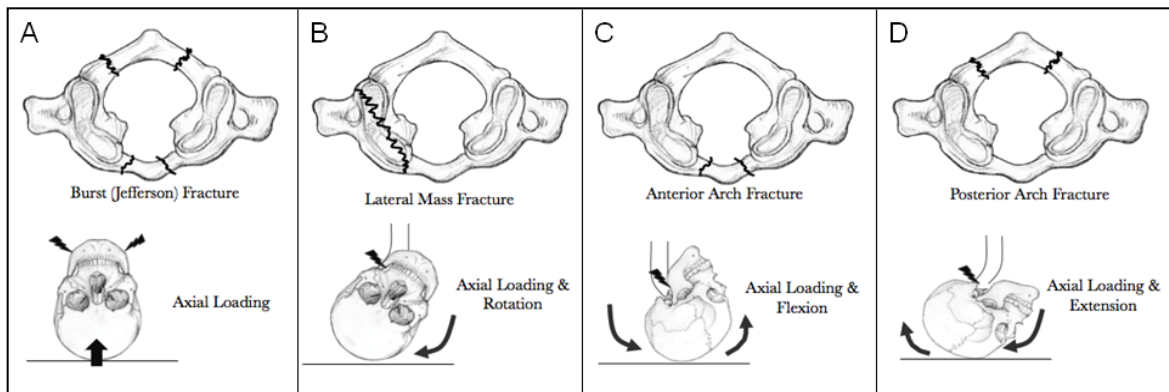


Abbildung 5 - Atlaswirbelfrakturen. A: Jefferson-Fraktur, erzeugt durch axiale Kraft. B: Laterale Massenfraktur, erzeugt durch axiale Belastung und Rotation. C: Vordere Bogenfraktur, erzeugt durch axiale und Flexionskraft. D: Posteriore Bogenfraktur, erzeugt durch axiale und Extensionskraft. Bild aus: [www.ebconsult.com](http://www.ebconsult.com).

#### 2.1.4. Atlantoaxiale Dislokation

Die atlanto-axiale Dislokation bezieht sich auf einen Stabilitätsverlust zwischen Atlas und Axis (C1-C2), was zum Verlust der normalen Artikulation führt. Die atlantoaxialen Gelenke können die stabile Artikulation durch traumatische, entzündliche, idiopathische oder angeborene Anomalien verlieren. Verursacht durch ein traumatisches Ereignis ohne vorbestehende Verletzung ist eine extrem seltene pathologische Entität. Sie entsteht durch eine Flexions-/Schubkraft, die eine Disruption des transversalen Ligaments des Atlas verursacht. In seltenen Fällen kann eine Verletzung des Querbandes auch eine gleichzeitige Disruption des alaren und apikalen Bandes nach sich ziehen. Bei diesen ligamentären Dislokationen verliert der Atlas die Artikulation mit dem Dens, und der vordere Atlasbogen kann sich bei erheblicher Schädigung der Bänder vollständig nach superior und posterior verschieben.

Die Präsentation der atlantoaxialen Dislokation kann von leichten axialen Nackenschmerzen bis hin zum Tod reichen. Tabelle 2 zeigt die von dieser Läsion abgeleiteten klinischen Zeichen.



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

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

Diese Läsion kann durch röntgenologische Messungen der atlantoaxialen Gelenkartikulation mit Hilfe des atlantodentalen Intervalls (ADI) definiert werden. Das ADI ist ein kleiner schlitzförmiger Raum (horizontaler Abstand) zwischen dem vorderen Bogen des Atlas und dem Dens der Achse. Flexions- und Extensionsröntgenaufnahmen des Halses ermöglichen die Messung des ADI und die Feststellung, ob sich das atlanto-axiale Gelenk in diesen Positionen reduziert. Der ADI wird von einer Linie gemessen, die entlang des vorderen Randes des Achskörpers nach oben zum vorderen Atlasbogen projiziert wird (Abbildung 6).

Die ADI ist normalerweise konstant im Abstand während der Bewegung des Kopfes und überschreitet im Allgemeinen nicht 3 mm bei Erwachsenen und 5 mm bei Kindern. Die Mehrheit (70 %) der klinischen Präsentationen einer atlantoaxialen Luxation sind auf anteriore Luxationen zurückzuführen. Eine anteriore Dislokation erhöht den ADI und verringert den für das Rückenmark verfügbaren Raum, der vom hinteren Aspekt des Dens bis zum vorderen Aspekt des hinteren Atlasrings gemessen wird.<sup>41</sup> Eine Verringerung des für das Rückenmark verfügbaren Raums erhöht das Risiko einer Rückenmarkskompression sowie neurologischer Folgeerscheinungen. Bemerkenswert ist, dass ein für das Rückenmark verfügbarer Raum von weniger als 14 mm die Entwicklung einer Lähmung vorhersagt und nachweislich mit dem Schweregrad der Lähmung korreliert.



Abbildung 6 - Neutrale (links), Extensions- (Mitte) und Flexions- (rechts) laterale Röntgenaufnahmen zeigen das atlantodentale Intervall (ADI) anterior des Odontoidfortsatzes und den für das Rückenmark verfügbaren Raum posterior. Das ADI liegt über dem Durchschnitt für Erwachsene von 3 mm und ist in Extension leicht reduziert, in Flexion jedoch stark vergrößert. Wenn sich der für das Rückenmark verfügbare Raum (SAC) bei diesem Patienten auf unter 14 mm verringert, besteht die Gefahr einer Lähmung. Bild aus Yang *et al.* 2014.

### 2.1.5. Brüche der Achse

Odontoidfrakturen gehören zu den häufigsten Frakturen der Halswirbelsäule und machen etwa 10 % aller Halswirbelsäulenverletzungen aus. Diese Verletzungen neigen dazu, klinisch eher unauffällig zu sein, es sei denn, sie verursachen eine Kompression des Rückenmarks, was aufgrund des relativ großen SAC in dieser Ebene der Halswirbelsäule selten ist. Odontoidfrakturen können sowohl durch Extensions- als auch durch Flexionskräfte verursacht werden. Wenn eine Flexions-/Schubkraft die Ursache für eine Odontoidfraktur ist, kommt es zu einer anterioren Verschiebung von C1 auf C2, obwohl dies auch als Folge einer Extensionsverletzung gesehen werden kann. Odontoidfrakturen werden nach der Klassifikation von Anderson und D'Alonzo eingeteilt:

- Typ-1-Frakturen treten an der Spitze des Odontoids auf und werden typischerweise nicht-operativ behandelt.
- Typ-2-Frakturen verlaufen durch die Taille des Processus odontoideus. Diese Frakturen haben eine hohe Rate an Nonunion aufgrund einer schlechten Gefäßversorgung. Typ-2-Frakturen werden in der Regel chirurgisch behandelt (Halo versus C1-C2-Posteriorenfusion), es sei denn, sie treten bei einem älteren Patienten mit Komorbiditäten auf, die eine Operation verhindern.
- Frakturen vom Typ 3 reichen bis in den C2-Körper und können in der Regel nicht-chirurgisch behandelt werden.

Darüber hinaus macht der Odontoidfortsatz etwa 37 % der Steifigkeit des C1-C2-Komplexes aus; die umliegenden Bänder (Ligamentum alare, Ligamentum transversum, Ligamentum longitudinale anteriores und posteriores) sind für die restliche Steifigkeit verantwortlich. Zeigt sich in der Magnetresonanztomographie (MRT) zusätzlich zur Odontoidfraktur eine Verletzung dieser Bänder, könnte dies auf einen instabilen C1-C2-Komplex hinweisen; diese Situation kann eine Operation erforderlich machen.

Eine weitere Klasse von C2-Verletzungen ist die traumatische Achsenspondylolisthesis, die eine Fraktur der verlängerten Pars interarticulares des hinteren Bogens des zweiten Halswirbels beschreibt. Sie wird historisch auf Hyperextension und Distraction (Anspannung und Rückwärtsdrehung des Kopfes) zurückgeführt, die durch Schläge auf Gesicht und Kinn oder durch richterliches Hängen entstehen können. Zur traumatischen Achsenspondylolisthesis wird die Hangman's Fracture gezählt. Die Ruptur der C2-C3-Bandscheibe geht mit der Parsfraktur einher und führt bei den schwereren Formen der Verletzung zu einer dramatischen Instabilität. Autounfälle haben das Hängen als häufigste Ursache für diese oft tödlichen Verletzungen abgelöst.

Wenn die obere Halswirbelsäule destabilisiert und das sagittale Gleichgewicht beeinträchtigt ist, kompensiert die untere Halswirbelsäule, was zu subaxialer Pathologie und Deformitäten führen kann. Wenn die atlantoaxiale Dislokation eine verminderte Lordose im C0-C2-Segment verursacht, kompensiert die subaxiale Halswirbelsäulenregion mit einer verstärkten Lordose, um das Gleichgewicht zu erhalten. Einige Patienten mit Veränderungen im Endstadium können eine Kyphose am okzipitoaxialen Segment zusammen mit einer extremen subaxialen Hyperlordose entwickeln, was zu einer Schwanenhalsdeformität führt.

## 2.2 Verletzungen der unteren Halswirbelsäule

Subaxiale Verletzungen der Halswirbelsäule oder der unteren Halswirbelsäule repräsentieren ein breites Spektrum an Verletzungsmustern und Instabilitätsgraden zwischen den Ebenen C3 und T1. In diesem Abschnitt werden die in der Literatur am häufigsten referenzierten Läsionen und die Biomechanik hinter jeder Läsion beschrieben.

### 2.2.1 Berstfrakturen

Eine axiale Belastung der Halswirbelsäule mit dem Hals in neutraler Position führt zu einer Kompressionsfraktur oder einer Berstungsfraktur des Wirbelkörpers und kann im unteren Halswirbelbereich von C3 bis T1 auftreten. Es wird keine Flexionskraft ausgeübt, so dass der hintere Bandkomplex intakt sein sollte. Da die axiale Kompression durch den Wirbelkörper übertragen wird, entsteht eine anteriore Keilformität des Wirbelkörpers. Hält diese Kraft an, wird der hintere Teil des Wirbelkörpers in den Kanal retropulsiert, was zu einer Verletzung des Rückenmarks führen kann.

### 2.2.2 Teardrop-Fraktur

Teardrop-Frakturen entstehen, wenn eine Kombination aus Flexions- und axialen Kompressionskräften gleichzeitig auf die Wirbelsäule einwirkt. Am häufigsten kann diese

Verletzung auftreten, wenn eine Person mit dem Kopf voran in ein flaches Schwimmbecken taucht. Die vordere Säule der Halswirbelsäule versagt bei der Kompression und der hintere Teil des Wirbelkörpers wird in den Kanal zurückgeschleudert. In der subaxialen Halswirbelsäule steht dem Rückenmark weniger Platz zur Verfügung, was häufig zu einer Kompression des Rückenmarks und einer Rückenmarksverletzung führt. Das schwerste Muster führt zu einer hinteren Subluxation des hinteren Wirbelkörpers in den Kanal, zu einer akuten Kyphose und zu einer Disruption des vorderen und hinteren Längsbandes, daher sind die Teardrops schwere Verletzungen, die mit einer hohen Inzidenz von Tetraplegien verbunden sind.

### 2.2.3 Midsagittale Spaltfraktur

Eine Variante von Berstungsfrakturen ist eine midsagittale Spaltfraktur. Die häufigsten Stellen dieser Frakturen an der unteren Halswirbelsäule sind C4, C5 und C6. Da es sich bei den Wirbeln um einen geschlossenen knöchernen Ring handelt, geht ein vollständiger Bruch durch die vordere und hintere Kortikalis des Wirbelkörpers oft mit Brüchen der Lamina und einer Zerrüttung der Facettengelenke einher. Es handelt sich um grob instabile Verletzungen, bei denen knöcherne Fragmente, oft trapezförmig, nach hinten verschoben werden und auf das Rückenmark auftreffen.

### 2.2.4 Störung der Facettengelenke

Eine Facettenluxation tritt auf, wenn eine Flexions-/Distractionskraft kombiniert mit Rotationskräften auf die Halswirbelsäule einwirkt. Sie betrifft meist die Ebenen C4-C5 oder C5-C6. Die untere Gelenkfacette der höheren zervikalen Ebene bewegt sich über die obere Gelenkfacette der unteren zervikalen Ebene. Dies kann ein- oder beidseitig auftreten und kann auch eine Fraktur einer oder beider Facetten und/oder lateraler Massen beinhalten:

- Bei unilateralen Facettenluxationen sind die auf die Halswirbelsäule einwirkenden Kräfte meist flexorischer und rotatorischer Natur. Das präsentierende Symptom ist häufig eine Monoradikulopathie der Exitus-Nervenwurzel.
- Bei beidseitigen Facettenluxationen wirkt auf die Halswirbelsäule weniger eine Rotationskraft und mehr eine pure Flexions/Distractionskraft. Dadurch kann sich die untere Gelenkfacette der oberen Halswirbelsäule über die obere Gelenkfacette der unteren Halswirbelsäule bilateral nach vorne verlagern.

### 2.2.5 Wirbelapophysenfraktur

Sie besteht aus dem Bruch eines oder mehrerer Dornfortsätze im Bereich der unteren Halswirbelsäule. Sie wird meist als Baggerfraktur bezeichnet, da sie bei Menschen auftritt, die diese Tätigkeit ausüben. Der Verletzungsmechanismus besteht aus einer hochgradigen Kraft, die vom Schultergürtel über die Muskeln auf die Dornfortsätze übertragen wird. Sie kann auch aufgrund von Muskelermüdung auftreten. Der resultierende Vektor der auf die Dornfortsatzapophyse übertragenen Kraft ist horizontal, was zunächst zur Befestigung des Schultergürtels an der Wirbelsäule und am Brustkorb führt.

Die meisten dieser Frakturen befinden sich in den Ebenen C6 und C7, da dies die Wirbel mit den längsten Dornfortsätzen sind und daher nicht in der Lage sind, den durch die horizontalen Kräfte erzeugten hohen Flektormomenten standzuhalten, was zu einer Fraktur der Dornfortsätze in der Nähe des Wirbelkörpers führt.

## 2.2.6 Peitschenschlag-assozierte Dirsorder

Der Begriff "Schleudertrauma-assozierte Störung" wird verwendet, um die klinischen Manifestationen eines Schleudertraumas zu beschreiben. Das Schleudertrauma ist ein Beschleunigungs-Abbrems-Mechanismus der Energieübertragung auf den Nacken. Es kann durch Auffahr- oder Seitenaufprall-Kraftfahrzeugkollisionen entstehen, kann aber auch beim Tauchen oder anderen Unfällen auftreten.

Luan F. et al. (2000) stellten fest, dass die kinematische Sequenz, die im Kopf- und Halsbereich nach einem Aufprall auftritt, wie folgt aussieht (Abbildung 7):

- 1) In der ersten Phase (0-100 ms nach Beginn des Aufpralls) wird eine Biegeverformung des Halses zusammen mit einem Verlust der zervikalen Lordose beobachtet. Der anfängliche lordotische Hals bei 20 ms wird gerade. Nach 50 ms werden sowohl die obere als auch die untere Halswirbelsäule einem Flexionsmoment unterworfen. Die Scherkraft wird zunächst durch die unteren Ebenen und schließlich durch die oberen Ebenen übertragen, erreicht aber nicht das obere Ende der Halswirbelsäule. Die axiale Kraft wechselt dann etwa bei 60 ms von Druck- auf Zugkraft.
- 2) In der zweiten Phase (100-130 ms) nimmt die Halswirbelsäule eine S-förmige Krümmung an, da die unteren Wirbel beginnen, sich zu strecken und allmählich eine Streckung der oberen Wirbel bewirken. Schließlich wird der gestreckte Hals wieder lordotisch. An den unteren Wirbeln tritt ein Streckmoment auf, während in den oberen Ebenen ein Beugemoment wirkt. Auf allen Ebenen wirken Scherkräfte sowie eine axiale Zugkraft.
- 3) In der Endphase (nach 130 ms) befindet sich der gesamte Hals aufgrund von Streckmomenten an beiden Enden in Streckung. Scherkräfte und axiale Zugkräfte wirken weiterhin auf allen Ebenen. Die Scherkräfte während der gesamten Belastungsphase können die unteren FJCs einer übermäßigen Dehnung aussetzen, während die anfängliche Kompression der Halswirbelsäule dazu führen kann, dass die Facettengelenkkapseln lokal komprimiert werden und entlang des Gelenks gleiten. Die hinteren Bereiche des Gelenks werden stärker komprimiert als die vorderen Bereiche, wodurch ein "Kneifmechanismus" entsteht. Eine übermäßige Kompression/Gleitbewegung des Gelenks kann auch Schmerzen auslösen, wenn diese Gelenke schmerzempfindliche Strukturen enthalten.

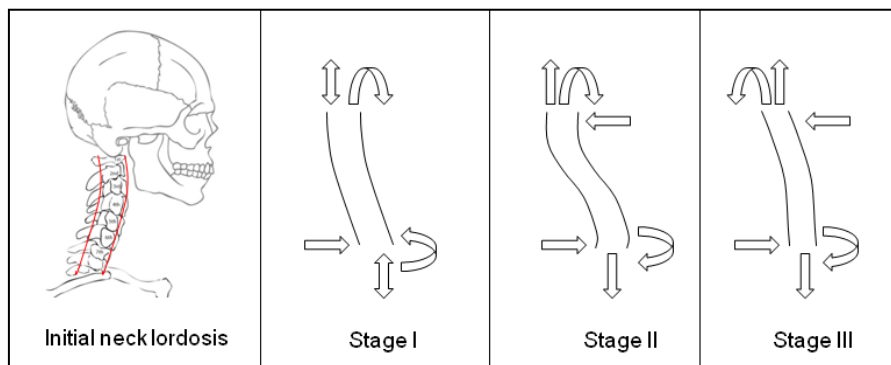


Abbildung 7 - Modelle der Nackenverformung sowie Kraft- und Momentendiagramme in drei Stadien eines Heckaufpralls. Abbildung reproduziert aus Luan F. et al. 2009.

In ähnlicher Weise testeten Kaneoka K. et al. (2002) an freiwilligen Probanden, die auf einem Schlitten saßen, um die Aufprallbeschleunigung eines Autos zu simulieren (Abb.3). Eine Aufprallgeschwindigkeit von 8 km/h wurde verwendet, um die Kopf-Hals-Rumpf-Kinematik und die Reaktionen der Halswirbelsäule zu untersuchen. Die Autoren unterteilten die Reaktionen in vier Phasen: 1) Schlittenbewegung (0-40 ms): keine Bewegung der Halswirbelsäule, 2) Axialkraft des Halses (40-100 ms): .

Tabelle 3 - Phasen und kinematische Ereignisse des Halses, der Halswirbelsäule und des Rumpfes während eines Heckaufpralls (Kaneoka K. et al. 2002).

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		

## 3. Biomechanik der wichtigsten Verletzungen der Brust- und Lendenwirbelsäule

---

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.

### 3.1 Endplattenfrakturen

Endplattenfrakturen werden durch Druckkräfte hervorgerufen und sind vor allem in der Brust- und oberen Lendenwirbelsäule zu finden. Sie werden durch axiale Kompressionskräfte verursacht, können aber auch durch eine Flexionskraft oder eine Kombination aus beiden auftreten. Es gibt drei Arten von Frakturen, die die Endplatten betreffen:

- Frakturen, die nur im zentralen Teil der Endplatte liegen.
- Frakturen, die im peripheren Bereich liegen, betreffen den äußeren kortikalen Knochen, der die Wirbelkörper auskleidet.
- Transversale Frakturen, die die Endplatte von Teil zu Teil durchqueren.

Das Versagen der Endplatte spielt eine primäre Rolle bei der Entstehung von Berstungsfrakturen, wodurch der Nukleus die kraniale Endplatte durchbrechen kann, was den intervertebralen Druck erhöht und zu einer nach außen gerichteten Verschiebung der Kortikalisschale mit Fragmentierung führt.

### 3.2 Berstfrakturen

Die Kräfte, die für einen Wirbelbruch (Abbildung 8) verantwortlich sind, sind Kompressionskräfte hoher Größe, die am häufigsten bei Stürzen und Verkehrsunfällen auftreten. Die Folgen einer Berstfraktur sind ein Versagen des vorderen und hinteren Wirbelkörpers, ein Höhenverlust des Wirbelkörpers und eine Retropulsion des hinteren Teils des Wirbelkörpers in den Spinalkanal. Besonders anfällig für diese Art von Frakturen ist der thorakolumbale Bereich, d. h. von T11 bis L2. Tatsächlich gilt er biomechanisch als der schwächste Punkt der Wirbelsäule, da diese Region die Übergangszone von einem starren Segment zu einem beweglichen Segment, lordotischer Haltung und mehr sagittal orientierten Facettengelenken darstellt. Die Stabilität in dieser Zone hängt von der Integrität der Bänder und knöchernen Komponenten ab.

Das neurologische Defizit ist bei Frakturen des thorakolumbalen Übergangs am geringsten im Vergleich zur Halswirbelsäule, wo die neurologischen Schäden bei Patienten mit Berstungsfrakturen unabhängig vom Unfallmechanismus am höchsten sind. Die Berstungsfraktur kann stabil oder instabil sein, zum Teil in Abhängigkeit von der Entschädigung des hinteren Längsbandes. Denis F. (1983) schlug vor, dass eine Verletzung der mittleren Säule, d.h. des hinteren Teils des Wirbelkörpers, des hinteren Längsbandes und der hinteren Bandscheibe ausreicht, um Instabilität zu erzeugen. Es ist weithin anerkannt, dass die hinteren Bänder wahrscheinlich versagt haben, wenn mehr als 30° Kyphose und/oder 50 % Höhenverlust des Wirbelkörpers auf einfachen Röntgenbildern



vorliegen (Heary RF. et al. 2007). Denis F. (1983) klassifizierte instabile Frakturen ebenfalls in drei Typen: mechanisch (1. Grad), neurologisch (2. Grad) oder kombiniert mechanisch/neurologisch (3. Grad).

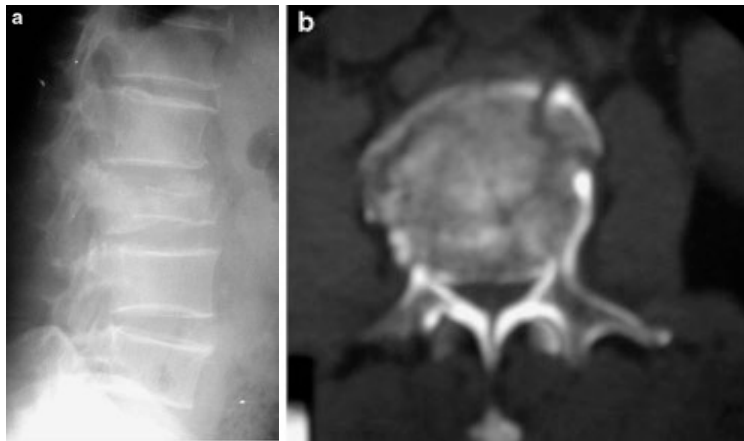


Abbildung 8 - a) Laterales Röntgenbild zeigt eine L2-Burstfraktur bei einem 59-jährigen Mann. b) Axiales CT-Bild zeigt eine 70%ige Kanalbeeinträchtigung. Bild aus Altay M. et al. 2007.

### 3.3 Keilfrakturen

Keilfrakturen der Wirbelkörper sind eine Verletzung, die durch eine axiale Druckkraft auf den Wirbelkörper in Kombination mit einem Beugemoment entsteht, das ein mechanisches Versagen des vorderen Bereichs des Wirbelkörpers bewirkt. Sie werden auch als Kompressionsfrakturen bezeichnet. Damit es zu dieser Art von Frakturen kommt, muss die Wirkungslinie der Druckkraft anterior zur Mitte des Wirbelkörpers liegen. Oft geht diese Art von Frakturen mit einer Schädigung der hinteren Bänder einher, die auch die Beugemomente auffangen müssen, die durch die axiale Kraft entstehen, die auf den vorderen Bereich des Wirbels einwirkt.

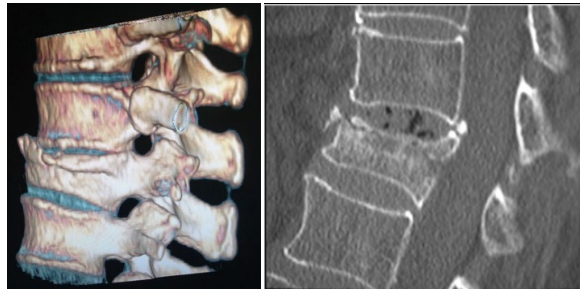


Abbildung 9 - Kompressionskeilfraktur aus sagittaler multiplanarer Rekonstruktion. Die Verletzung hat keine Beteiligung an den hinteren Elementen. Bild aus González-Montané J.L. 2014.

Diese Art von Läsionen ist häufig bei Menschen mit Osteoporose. Bei dieser Art von Patienten treten Wirbelsäulenfrakturen häufiger in der mittleren thorakalen (T7-T8) und thorakolumbalen (T11-L1) Region auf als an anderen Stellen der Wirbelsäule. Die Gründe für diese bimodale Verteilung sind wahrscheinlich auf die Variationen in der Krümmung der Wirbelsäule zurückzuführen, wobei die maximale thorakale Kyphose um T7-T8 auftritt, was zu größeren anterioren Biegemomenten führen kann und das Risiko für anteriore Keilfrakturen in dieser Region erhöht. Am thorakolumbalen Übergang ist die höhere Inzidenz von Frakturen bei T12-L1 auf eine erhöhte Belastung der Wirbelkörper zurückzuführen, da der Brustkorb nicht mehr dazu beiträgt, superinkrete Lasten auf diesen Wirbelsäulenstufen abzustützen.

### 3.4 Verletzungen durch den Sicherheitsgurt

Sicherheitsgurtverletzungen sind typische Läsionen des thorakolumbalen Übergangs als Folge einer Hyperflexion, die in diesem Bereich zentriert ist und gleichzeitig eine Distraktionskraft aus dem hintersten Bereich des Wirbels verursacht. Der Verletzungsmechanismus ist eine schnelle Abbremsung einer in einem Fahrzeug reisenden Person, deren vorherige Bewegung durch den Sicherheitsgurt zurückgehalten wird. Die Folgen dieser Verletzung können von der Beschädigung von Bandstrukturen bis hin zum Bruch von Knochenelementen oder der Kombination Bruch-Luxation reichen.

Denis (1985) klassifizierte die Gurtfrakturen in vier Typen (Abbildung 10). Der erste Typ ist eine reine Bandverletzung mit Facettenverschiebung; der zweite Typ ist die klassische Chance-Fraktur mit horizontaler Spaltung des Knochens; der dritte Typ ist eine zweistufige - Verletzung durch den hinteren Bandkomplex, Pedikel und Bandscheibe und der vierte Typ ist eine zweistufige Verletzung durch den hinteren Bandkomplex, Pedikel, Körper und Bandscheibe. Während allgemeines Einverständnis darüber besteht, dass eine reine Bandverletzung mit einer Facettenluxation vom Typ der Gurtfraktur instabil ist, besteht weniger Einverständnis über die Stabilität der anderen Arten von Gurtverletzungen.

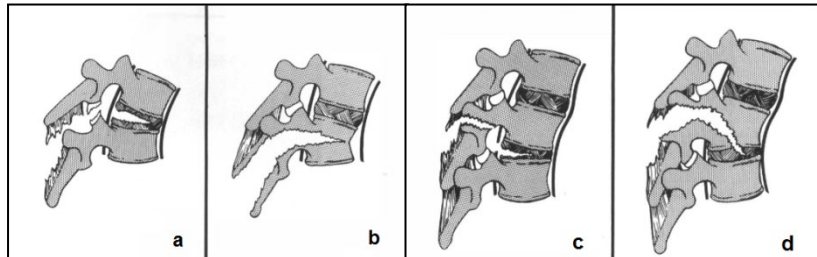


Abbildung 10 - Klassifizierung von Anschnallfrakturen. a: reine Bandzerreiung mit Facettenverschiebung. b: Zufallsfraktur mit horizontaler Spaltung des Knochens. c: Verletzung des posterioren Bandkomplexes, des Pedikels und der Bandscheibe. d: Verletzung des hinteren Bandkomplexes, Pedikel, Körper und Bandscheibe. a und b sind Verletzungen in einer Ebene. c und d sind Verletzungen in zwei Ebenen. Bild aus Yu WY. et al. 1986.

## 4. Biomechanische Überlegungen im Zusammenhang mit Eingriffen an der Wirbelsäule

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. In diesem Kapitel werden wir die möglichen biomechanischen Folgen der schwersten Eingriffe in den verletzungsanfälligsten Wirbelsäulensegmenten überprüfen.

### 4.1 Kopfgelenkiger Eingriff

Der Okziput-C1-C2-Komplex ist der beweglichste Teil der Halswirbelsäule. Das Okziput-C1-Bewegungssegment leistet den größten Beitrag zur Flexion ( $21^\circ$ ) und Extension ( $3,5^\circ$ ), während die Hauptbewegung des C1-C2-Bewegungssegments die axiale Rotation ist ( $23,3-38,8^\circ$  pro Seite). Die Hauptindikation zur okzipitovervikalen Fusion ist die Instabilität des kraniozervikalen Übergangs. Viele Erkrankungen können eine Instabilität dieses Komplexes verursachen, wie z.B. Trauma (Atlanto-okzipitale Dislokation, Okzipitalkondylenfraktur, Atlas- und Achsenfrakturen), Malignität, rheumatoide Arthritis, angeborene Anomalien oder - Infektionskrankheiten. Die posteriore interne Stabilisierung verhindert die Kompression der neuralen Strukturen, ermöglicht die Korrektur der zervikalen Deformität und reduziert die Schmerzen. Derzeit sind schraubenbasierte Konstrukte die beliebteste Option (Abbildung 11).

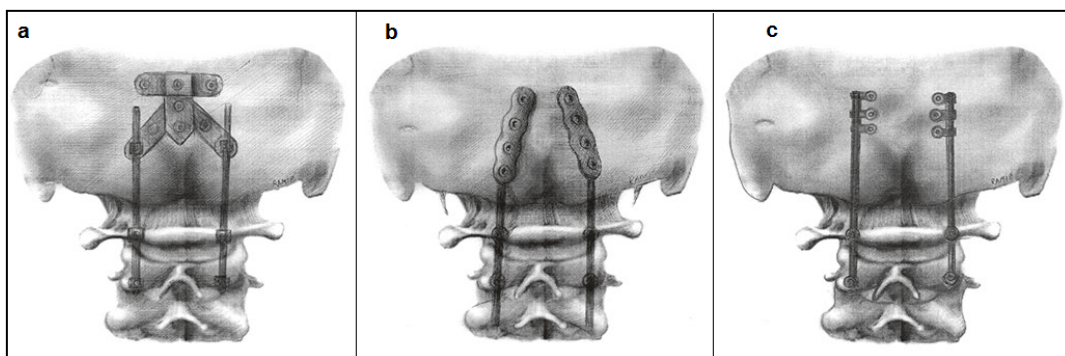


Abbildung 11 - Die gängigsten schraubenbasierten Konstrukte. (a) Okzipitalplatte. (b) Gelenkstangen mit integriertem Okzipitalplattenende. (c) Ösenverbinder nach medial gerichtet. Bild aus Ashafai NS. et al. 2019.

Die kinematischen Komplikationen der okzipitovervikalen Fusion bestehen darin, dass die Technik die zervikale Mobilität bis zu 40 % der gesamten zervikalen Flexion-Extension, 60 %

der gesamten zervikalen Rotation und 10 % der gesamten zervikalen lateralen Biegung einschränken kann, wenn das Okziput-C1 und C2 beteiligt sind. Außerdem führt die übermäßige Beugung dazu, dass der Patient eine eingeschränkte Blickrichtung und Schluckbeschwerden hat. Postoperative Dyspnoe und/oder Dysphagie nach okzipitozervikaler Fusion sind selten, stellen aber ein Hindernis für Aktivitäten des täglichen Lebens dar und sind gelegentlich lebensbedrohlich. Obwohl man davon ausgeht, dass die zervikale Flexionsausrichtung ein Hauptfaktor für Dyspnoe und/oder Dysphagie ist, trägt auch die mechanische Stenose des Oropharynxraums zu diesem Problem nach der Operation einer okzipitozervikalen Fusion bei. Eine Verringerung des O-C2-Winkels um 10° führt zu einer Verengung des oropharyngealen Atemwegsraums in der neutralen Position um etwa 37 %.

Kürzlich wurden in einer Studie die Verfahren der posterioren Fixation des atlantoaxialen gegenüber dem okzipitozervikalen Gelenk verglichen. Die atlantoaxiale ist das anspruchsvollere Verfahren im Vergleich zur okzipitozervikalen Fusion, bietet aber einen größeren Bewegungsumfang durch den Erhalt des C0/C1-Bewegungssegments. Die okzipitozervikale Fusion führt zu einer weiteren und erheblichen Bewegungseinschränkung im Vergleich zur atlantoaxialen Fusion allein. Nach der okzipitozervikalen Fusion ist praktisch keine Extension, Flexion und Rotation der oberen Halswirbelsäule möglich.

## 4.2 Eingriff an der unteren Halswirbelsäule

Im Bereich der unteren Halswirbelsäule sind verschiedene Überlegungen zu berücksichtigen. Eine Immobilisierung oder ein Gelenkersatz kann sich aufgrund der biomechanischen Veränderungen, die nach dem Eingriff auftreten, auf benachbarte Ebenen auswirken. Nabhan A. et al. (2011) analysieren die möglichen Auswirkungen auf die an den Gelenkscheibenersatz angrenzenden Ebenen im Vergleich zur anterioren zervikalen Diskektomie und Fusion (Abbildung 12) bei Personen mit symptomatischer degenerativer zervikaler Bandscheibenerkrankung. In dieser Studie gab es bei einer mittleren Nachbeobachtungszeit von 12 Monaten keine Veränderung der durchschnittlichen segmentalen Bewegung unmittelbar kranial der Bandscheibenprothese, während es eine Zunahme der durchschnittlichen segmentalen Bewegung unmittelbar kranial der Fusion gab, jedoch ohne signifikanten Unterschied.

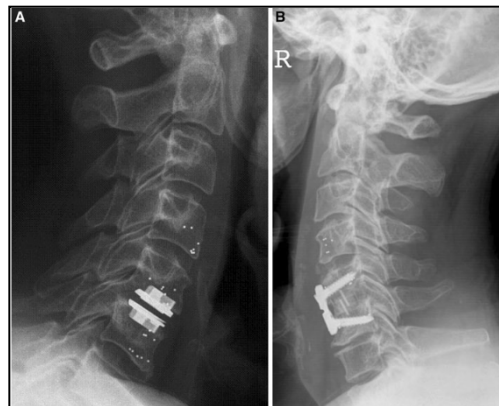


Abbildung 12 - Laterale Röntgenaufnahme der Halswirbelsäule mit den Tantalmarkern der Wirbelkörper C4, C5 und C6. a - Eingearbeitete Tantalmarker nach Bandscheibenersatz. b - Dasselbe mit Titanplattenfixierung. Bild aus der Studie von Nabhan A. et al (2011).

Es wird vermutet, dass das Vorhandensein einer Fusion die Belastung und den segmentalen Bewegungsumfang auf benachbarten Ebenen erhöhen und ein lokales Trauma mit anschließender beschleunigter Bandscheibendegeneration verursachen könnte. Es gibt viele potenziell wichtige Faktoren, die neben der erhöhten segmentalen Bewegung mit der Entwicklung einer Erkrankung des angrenzenden Segments assoziiert sind: Stress, Belastung und intradiskaler Druck auf Ebenen, die an die Fusionsstelle angrenzen. Hilibrand et al. (1999) sagten voraus, dass bei 25,6 % der Patienten, die sich einer anterioren zervikalen Fusion unterzogen, innerhalb von 10 Jahren nach der Operation eine neue symptomatische Erkrankung an einem benachbarten Segment auftreten würde.

Ähnlich wie die Studie von Nabhan A. et al. (2011) vergleichen die Autoren Ghobrial GM. et al. (2019) die Folgen auf den beiden Techniken zugrunde liegenden Ebenen, allerdings in einer prospektiven 10-Jahres-Studie. Sie begründeten, dass im Vergleich zur anterioren zervikalen Diskektomie und Fusion weniger Patienten mit zervikaler Diskusarthroplastik wegen symptomatischer Degeneration der benachbarten Ebenen operiert werden mussten, was aber keine statistische Signifikanz erreichte. Als jedoch die Daten von 2 prospektiven, randomisierten Studien mit ähnlichen Ein- und Ausschlusskriterien kombiniert wurden, um die Aussagekraft zu erhöhen, wurde ein signifikanter Unterschied in Bezug auf symptomatische Erkrankungen der benachbarten Ebenen, die eine Operation erforderten, nach 7 Jahren beobachtet.

#### 4.3 Thorakaler und lumbaler Eingriff

Die Hauptursache für Schmerzen im unteren Rückenbereich ist auf den Degenerationsprozess zurückzuführen. Gleichzeitig ist eine der wichtigsten chirurgischen Techniken, die bei dieser Pathologie eingesetzt wird, die Wirbelsäulenfusion. Obwohl das Ergebnis dieser Technik kurzfristig zufriedenstellend ist, kommt es langfristig zu

unerwünschten Ereignissen in den an die Operation angrenzenden Ebenen. Unter den Patienten, die bei späteren Untersuchungen eine weitere Operation benötigen, ist die symptomatische Degeneration des benachbarten Segments einer der häufigsten Gründe.

Es ist bekannt, dass die Ausrichtung der Wirbelsäule die Belastung der Wirbelsäule beeinflusst, und es wird zunehmend diskutiert, dass sie mit der Bandscheibendegeneration und insbesondere mit der Degeneration benachbarter Segmente in Zusammenhang steht. Es wird angenommen, dass abweichende Veränderungen in der mechanischen Belastung die Zell- und Gewebebiologie der Zwischenwirbel negativ beeinflussen und benachbarte Bandscheiben strukturellen Störungen aussetzen könnten, die eine Bandscheibendegeneration auslösen oder zu ihr beitragen. Eine kürzlich durchgeführte klinische Langzeit-Follow-up-Studie identifizierte darüber hinaus eine lumbale Hypolordose als unabhängigen Risikofaktor für ein beschleunigtes Fortschreiten der Bandscheibendegeneration, auch ohne Fusion.

Andererseits kann es je nach Grad der Verschmelzung zu einer Einschränkung der Bewegung kommen. Diese Information wird in der Studie von Se Jin Choi et al. (2018) gezeigt. In dieser Arbeit stellten sie fest, dass das ROM der lumbalen Extension durch eine Fusion auf der Ebene L4/5 oder L5/S1 statistisch beeinflusst wurde, ebenso wie das ROM der lumbalen Lateralflexion. Das ROM der lumbalen Lateralrotation wurde durch eine Fusion auf der Ebene L4/5 oder L5/S1 nicht beeinflusst. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die unteren Lumbalsegmente (L4/5 und vor allem L5/S1) zum ROM der Wirbelsäule (Extension und Lateralflexion) beitragen, aber diese Segmente allein spielen keine bedeutende Rolle bei den Bewegungen der Wirbelsäulenflexion.

Ähnlich wie die Arbeit von Jin Choi et al. (2018) ermittelt die Studie von Obid P. et al. (2017) den Verlust der Beweglichkeit segmentweise bei drei Instrumentensystemen für die Lendenwirbelsäulenfusion von T11 bis L5. Die Gruppen dieser Studie waren (Abbildung 13): (A) Starre Gruppe: starre Instrumentierung auf vier Ebenen; (B) Dynamische Gruppe: starre Instrumentierung auf zwei Ebenen (L3-L5) in Kombination mit dem Elaspine-System (Spinelab AG, Winterthur, Schweiz) (L1-L3); und (C) Hakengruppe: starre Instrumentierung auf zwei Ebenen (L3-L5) in Kombination mit Laminarhaken (L1-L3).

Die Hypothese, dass Hybridkonstrukte das ROM in den dynamisch instrumentierten Ebenen einschränken, aber mehr Bewegung zulassen als die starre Instrumentierung, konnte nicht bewiesen werden. Sowohl das Elaspine-System als auch die Laminarhaken reduzierten das ROM in den instrumentierten Ebenen nahe an das der starren Instrumentierung, was zu einer ähnlichen zunehmenden Mobilität in den an die Instrumentierung angrenzenden Segmenten führte. Somit würde ein dynamisches System die bei den Fusionen mit starren Systemen beobachteten Verletzungen der angrenzenden Ebenen nicht verhindern.

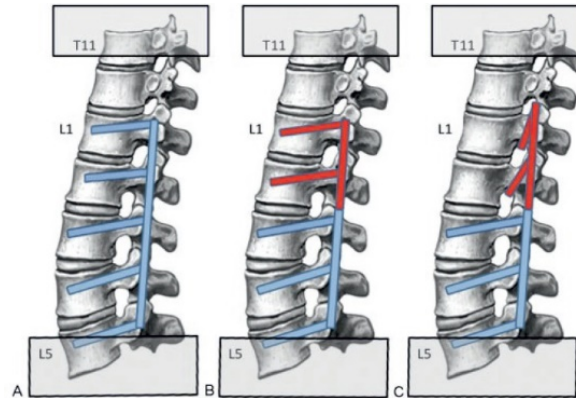


Abbildung 13 - Schematische Übersicht über den Aufbau der drei Testgruppen aus der Studie von Obid P. et al. (2017). (A) Gruppe R: vierstufige starre Instrumentierung; (B) Gruppe D: zweistufige starre Instrumentierung (L3-L5) kombiniert mit dem Elaspine-System (Spinelab AG, Winterthur, Schweiz) (L1-L3); und (C) Gruppe H: zweistufige starre Instrumentierung (L3-L5) kombiniert mit Laminarhaken (L1-L3).



## 5. Wichtige Ideen

---

- 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.
- 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.
- 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. Referenzen

- [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.
- [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]. González-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.
- [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.
- [25]. [Nichols J](#)1, [West JS](#). Traumatic atlantooccipital dislocation injury in children. [AORN J](#). 1994 Oct;60(4):544-6, 548-9, 551-4 passim.
- [26]. 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.
- [27]. 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.
- [28]. 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.
- [29]. Pertersilge CA., Emery SE. Thoracolumbar burst fracture: Evaluating stability. [Seminars in Ultrasound, CT and MRI Volume 17, Issue 2](#), April 1996, Pages 105-113.
- [30]. Pryputniewicz D.M. and Hadley M.N. Axis Fractures. *Neurosurgery* 2010 Mar;66(3 Suppl):68-82.
- [31]. 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.
- [32]. Ryba L., Cienciala J., Chaloupka R., Repko M., Vyskocil R. Injury of Upper Cervical Spine. *Soud. Lek* 2016;61(2):20-5.
- [33]. 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.
- [34]. 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.
- [35]. Torreti J.A. and Sengupta D.K. Cervical Spine Trauma. *Indian J Orthop* 2007 Oct;41(4):255-67.
- [36]. Traynelis, V.C., Marano, G.D., Dunker, R.O., Kaufman, H.H.: Traumatic atlanto-occipital dislocation: Case report. *J Neurosurg* 1986; 65: 863-870.

- [37]. Tuli S., Charles H.T., Fehlings M.G., Mackay M. Occipital Condyle Fractures. *Neurosurgery*, Volume 41, Issue 2, August 1997, Pages 368–377.
- [38]. 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.
- [39]. Wenning KE. and Hoffmann M.F. Does isolated atlantoaxial fusion result in better clinical outcome compared to occipitocervical fusion? *Journal of Orthoedic Surgery and Research* (2020) 15:8.
- [40]. 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.
- [41]. 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.

