

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 A

Thema: Biomechanik der normalen Wirbelsäule



A. Biomechanik der normalen Wirbelsäule

1. Ziele
2. Normale Biomechanik der Halswirbelsäule
3. Normale Biomechanik der Brustwirbelsäule
4. Normale Biomechanik der Lenden-, Sakral- und Steißbeinwirbelsäule
5. Welche Belastung erfährt die Wirbelsäule in den verschiedenen Ruhepositionen?
6. Wie ist die Biomechanik der Wirbelsäule, wenn wir funktionelle motorische Gesten ausführen?
7. Konzeptuelle Karten
8. Bibliographie

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

1. Ziele

1. ZIELE

Die Ziele dieser didaktischen Einheit sind:

- Die Biomechanik der verschiedenen Segmente der Wirbelsäule unter normalen Bedingungen und ihre kinematischen Möglichkeiten zu überarbeiten.
- Überprüfung der Biomechanik der Wirbelsäule im Normalzustand in den wichtigsten Ruhestellungen des Menschen.
- Überprüfung der Biomechanik der Wirbelsäule im Normalzustand bei üblichen täglichen funktionellen Bewegungen.

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

2. Normale Biomechanik der Halswirbelsäule

2. NORMALE BIOMECHANIK DER HALSWIRBELSÄULE

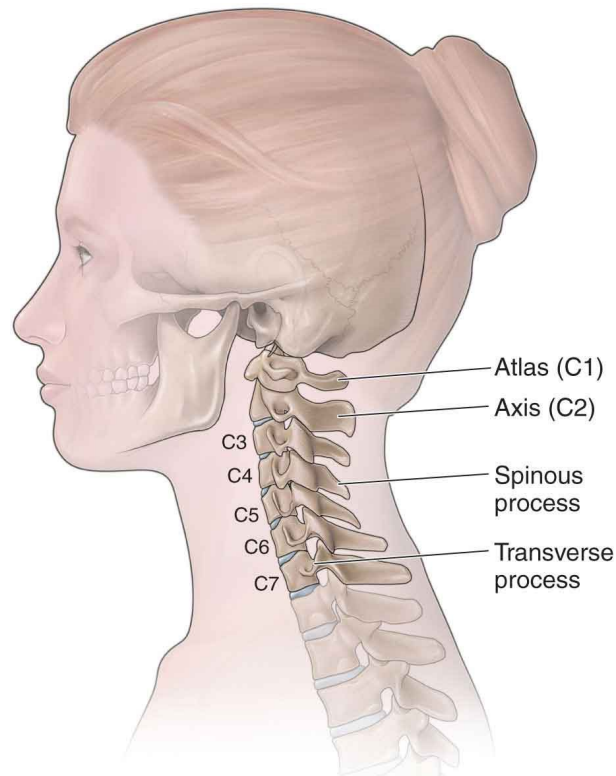


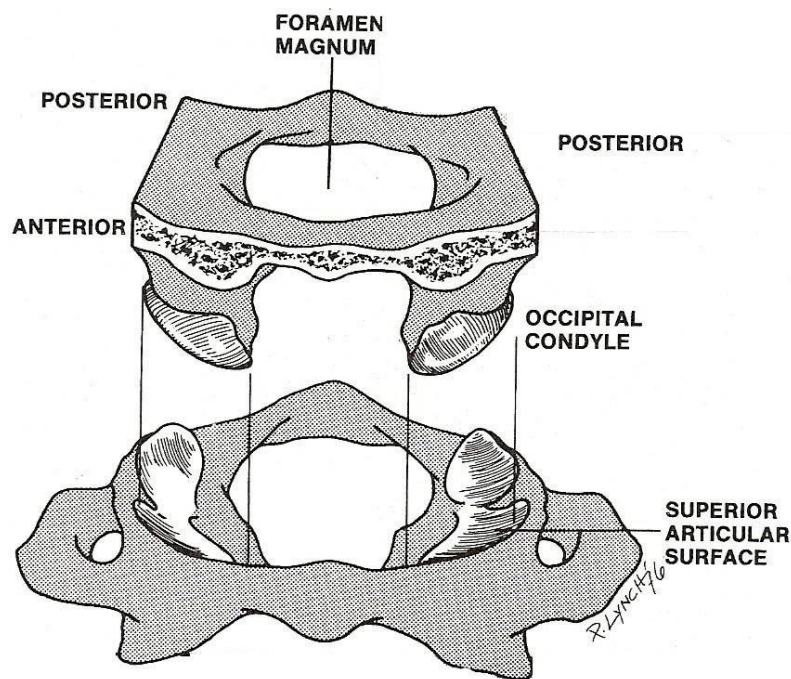
Abbildung 1. Grundstrukturen der
Halswirbelsäule

(entnommen aus www.muskuloskeletalkey.com)

- 7 Wirbel mit lordotischer Krümmung.
- Sie wird in obere Halswirbelsäule (C1-C2) und untere Halswirbelsäule (C3-C7) unterteilt.
- Es verfügt über eine eigene Functional Spine Unit (FSU), die von:
 - Zwei benachbarte Wirbel
 - Das dazwischen liegende Weichgewebe.
- FSU hat 12 mögliche Bewegungen, die in 3 Achsen aufgeteilt sind.

2.1. BIOMECHANIK DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE

ATLANTO-OCCIPITALGELENK



- Primäre Bewegungen: Flexions-, Extensions- und Wackelbewegungen.
- Bewegungseinschränkung durch:
 - Basis des Schädels.
 - Verspannung der hinteren Nackenmuskulatur.
 - Submandibulares Gewebe.
 - Kompression der suboccipitalen Muskeln.

Abbildung 2. Atlanto-okzipitales Gelenk
(entnommen aus
www.whoopracticagirona.com)

2.1. BIOMECHANIK DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE

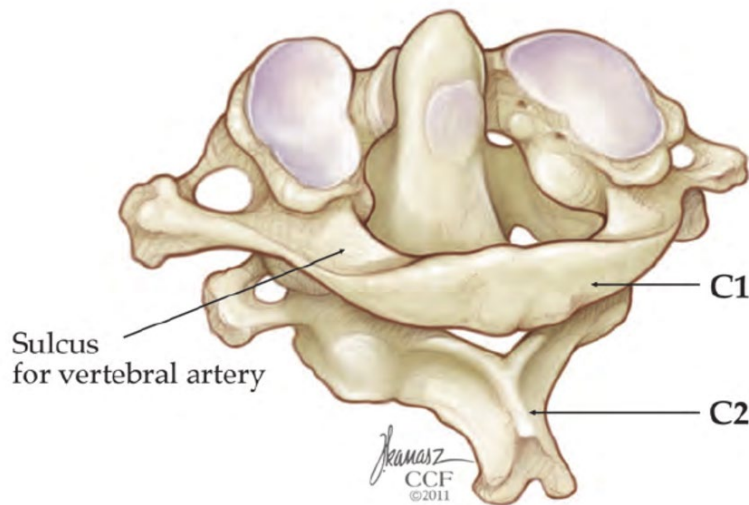
ATLANTO-OCCIPITALGELENK

DREHUNG

LATERALFLEXION

2.1. BIOMECHANIK DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE

ATLANTO-AXIALES GELENK



- Komplex zusammengestellt von:
 - Zwei seitliche Facettengelenke.
 - Die atlantodentale Artikulation.
 - Die Oberfläche des hinteren Odontoids.
 - Transversales Ligament.

Abbildung 3. Atlanto-axiales Gelenk. Bild aus Clark JG. et al. 2011.

2.1. BIOMECHANIK DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE

ATLANTO-AXIALES GELENK

Das atlanto-axiale
Mediangelen
ermöglicht das
Drehen und Gleiten
des Atlas um den
Drehpunkt.

Die Stabilisierung
des Gelenks erfolgt
durch transversale,
alare und apikale
Ligamente.

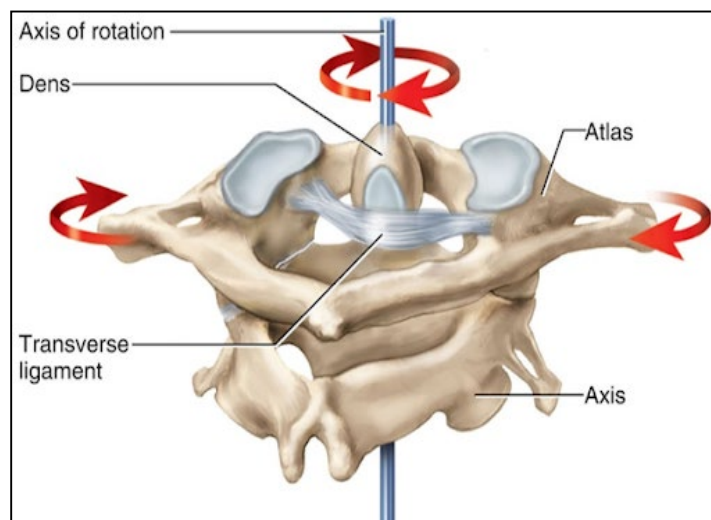


Abbildung 4. Odontoid-Drehpunkt
(entnommen aus
www.imagequiz.co.uk)

Laterale Atlanto-
Axial-Gelenke sind
ebene Gelenke.

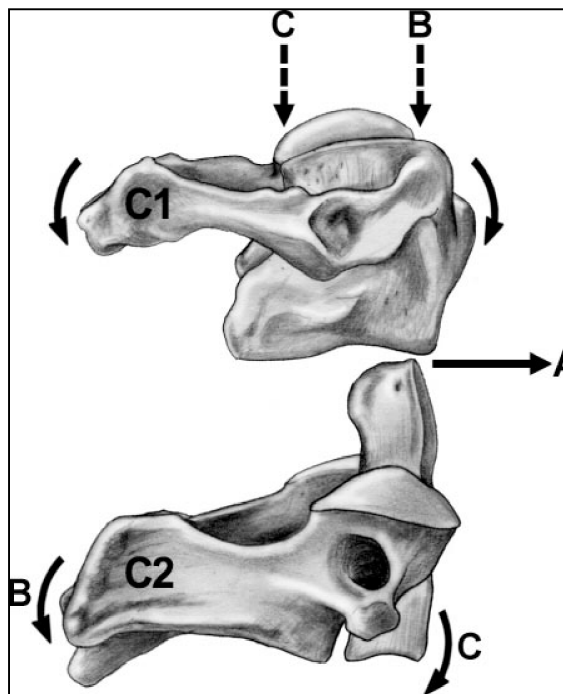
Während der
Rotation kann sich
der Atlas vorwärts
oder rückwärts
bewegen.

2.1. BIOMECHANIK DER OBEREN HALSWIRBELSÄULE

ATLANTO-AXIALES GELENK

Atlas beugt sich, wenn sich die Halswirbelsäule streckt und umgekehrt

Während der axialen Kompression beginnt C1, sich passiv zu bewegen.



durch den Processus odontoideus begrenzt. Vorwärtsbewegung durch transversale und alare Bänder

Die Tectorialmembran sorgt für Stabilität bei Rückwärtsbewegungen.

Abbildung 4. Odontoid-Drehpunkt (entnommen aus www.imagequiz.co.uk)

2.2. BIOMECHANIK DER UNTEREN HALSWIRBELSÄULE

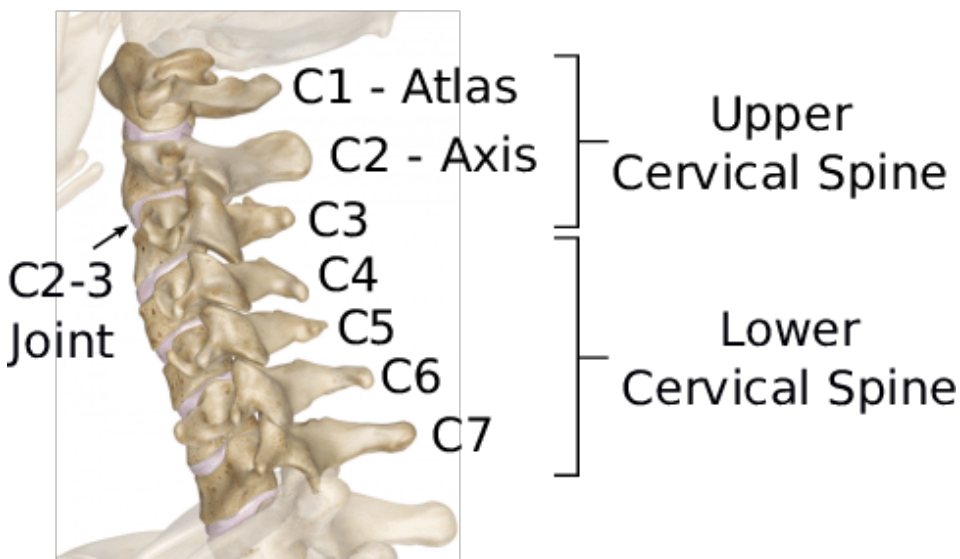


Abbildung 5. Schema der Halswirbelsäule. Bild aus Barker S. et al. 2015.

Sie wird als untere Halswirbelsäule C3 bis C7 betrachtet

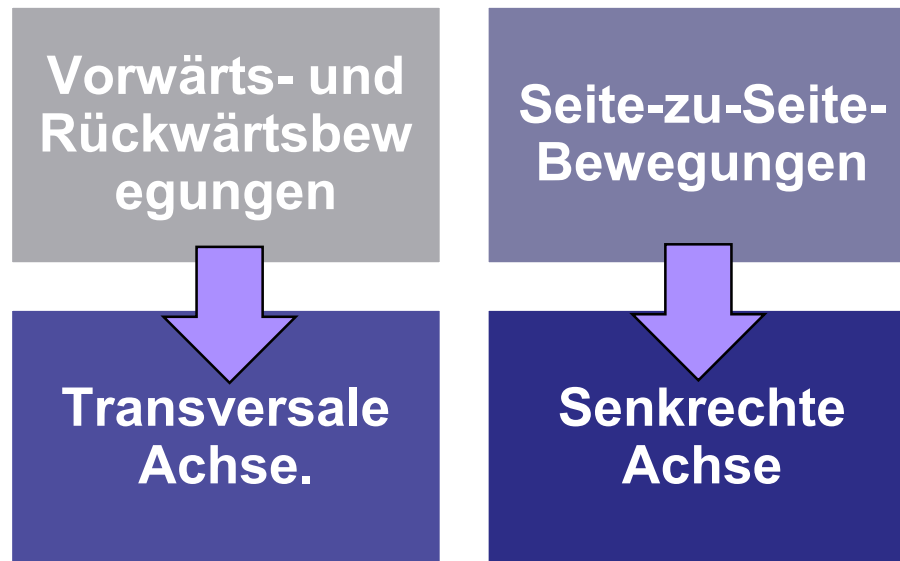
C3 obere Facetten ermöglicht mediale Bewegung

Achsenprozesse ruhen in einer Sockelform durch übergeordnete Prozesse von C3

C2-C3 führt eine entgegengesetzte seitliche Beugung aus

2.2. BIOMECHANIK DER UNTEREN HALSWIRBELSÄULE

- Die unteren Halswirbel sind durch eine Bandscheibe getrennt.
- Die Gelenkflächen sind ähnlich wie bei einem Sattelgelenk:
 - Die untere Oberfläche des Wirbelkörpers ist nach unten konkav.
 - Die obere Oberfläche des Wirbelkörpers ist nach oben konkav.



B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

3. Normale Biomechanik der Brustwirbelsäule

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

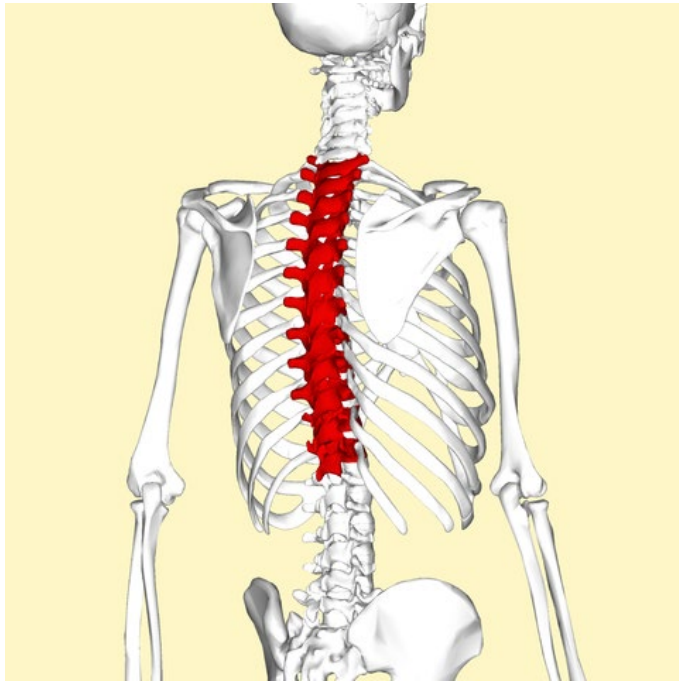
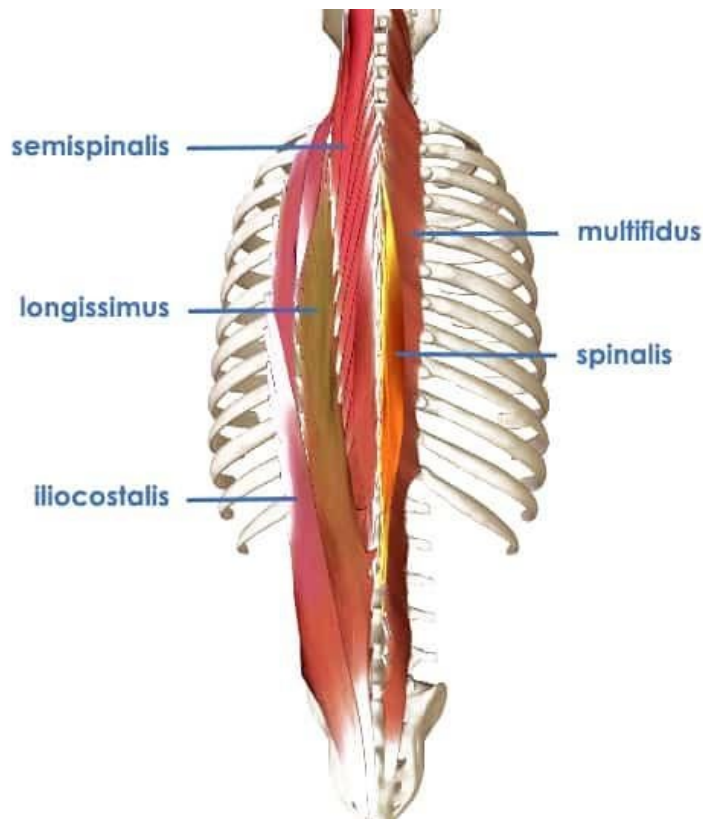


Abbildung 6. Posteriore $\frac{3}{4}$ -Ansicht
der Brustwirbelsäule (entnommen
aus www.lifeder.com)

- Sagitales Gleichgewicht der Wirbelsäule durch Erector spinae und Bauchmuskeln.
- 3 dimensionalen Bewegungen.
- 12 Wirbel (T1-T12) mit einer konkaven Krümmung, die Kyphose genannt wird.
- Kyphose normaler Winkel von 45° :
 - Bereich der Kyphose von $20-70^\circ$ asymptotisch.
- Die Kyphose wird durch die Lendenlordose und die Position der unteren Halswirbel bestimmt.

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE



- Die Brustwirbelsäule verfügt über einen Muskelkomplex, der die aufrechte Position der Wirbelsäule aufrechterhält.
- Axiale Belastungen nehmen bei größeren Thoraxwinkeln zu.
- Brustwirbel:
 - Unterstützt Druckbelastungen im vorderen Körperbereich.
 - Widerstehen Sie Zugbelastungen im hinteren Körperbereich.

Abbildung 7. Muskulärer
Brustwirbelsäulenkomplex (entnommen aus
www.precisionmovement.coach)

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

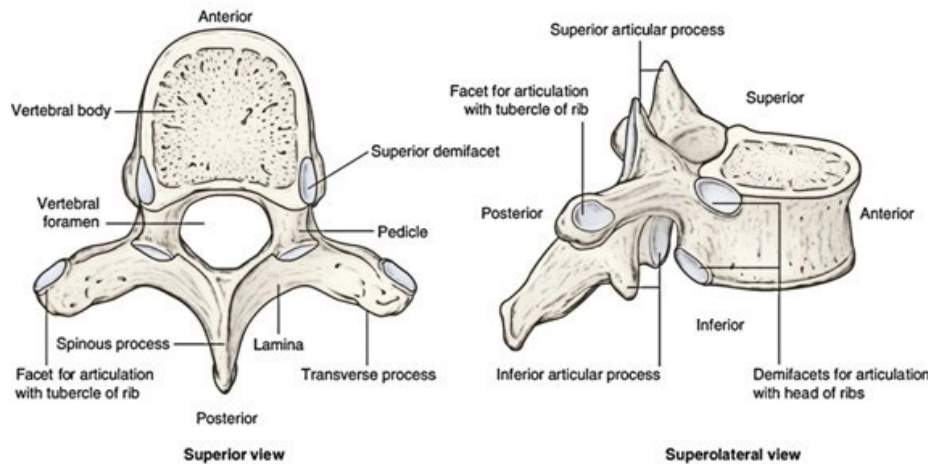


Abbildung 8. Ein Brustwirbeltyp (entnommen aus www.earthslab.coach)

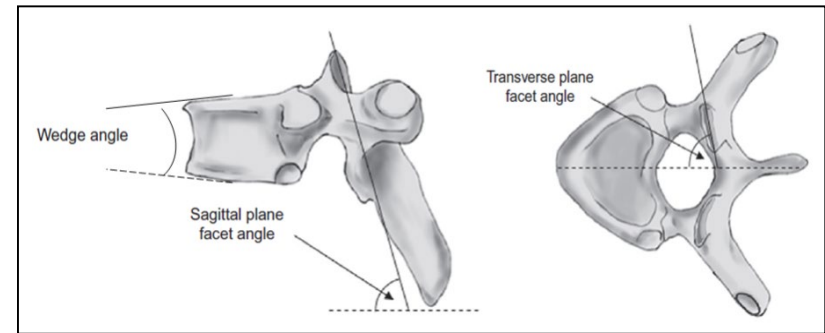


Abbildung 9. Keilwinkel und Facettengelenkwinkel der thorakalen Wirbelsäulenbewegungssegmente. Bild aus Galbusera F. et al. 2018.

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

Wirbelsäulenmor-
phologie aufgrund
von Kyphose

Keilwinkelvergrößer-
ung bis zu den
mittleren
Brustwirbelkörpern

Die Neigung der
Facetten begrenzt
F/E und Rotation

Facetten haben fast
eine koronale
Ausrichtung

Der Neigungswinkel
der Facetten nimmt
zur
Lendenwirbelsäule
hin allmählich zu

Beständigkeit gegen
Translation und
axiale Belastungen

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

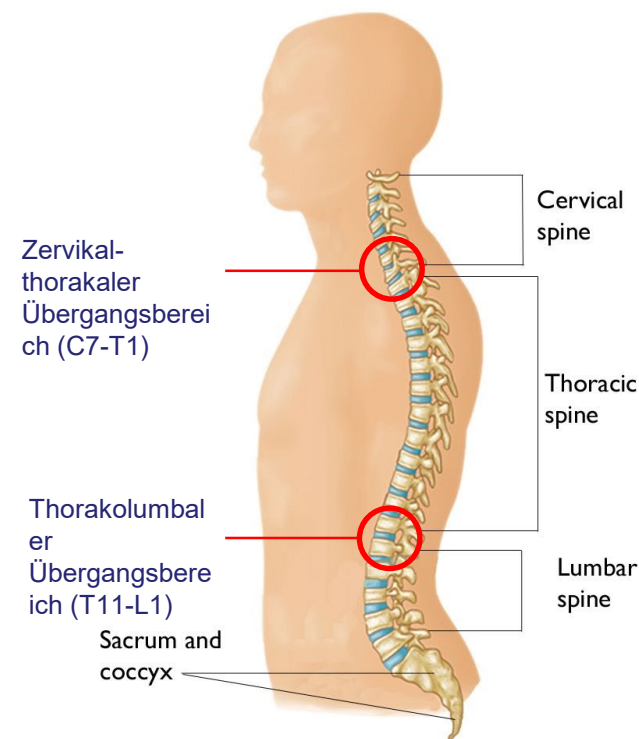
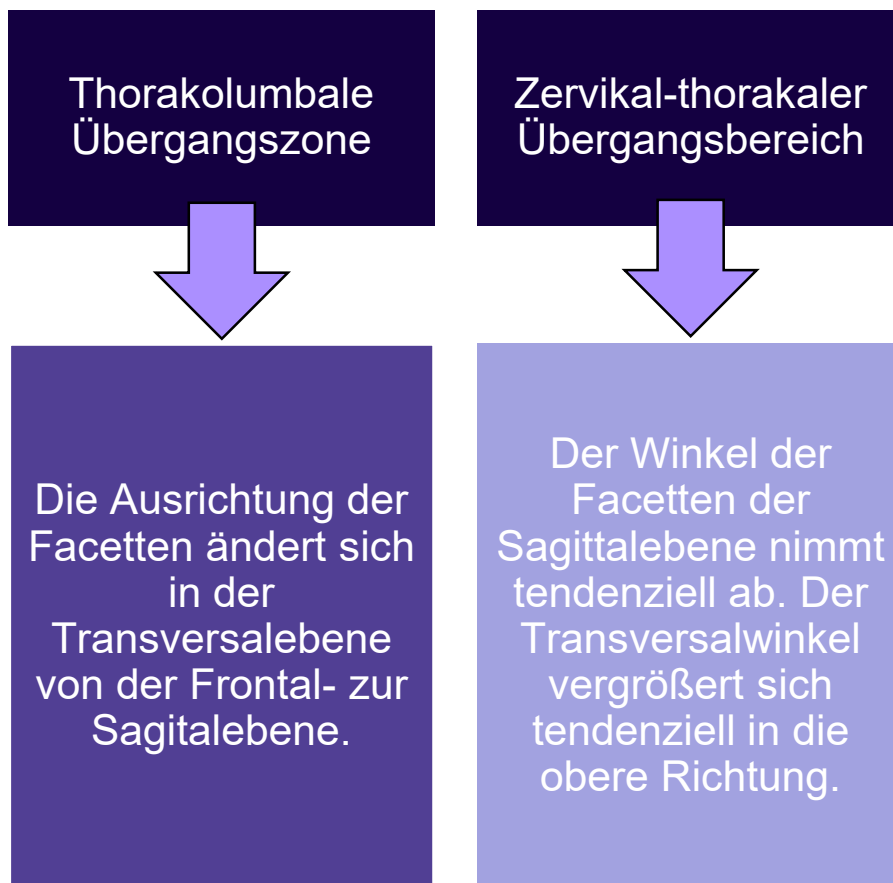


Abbildung 10. Übergangszonen der Wirbelsäule (bearbeitet von www.orthoinfor.aaos.org)

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

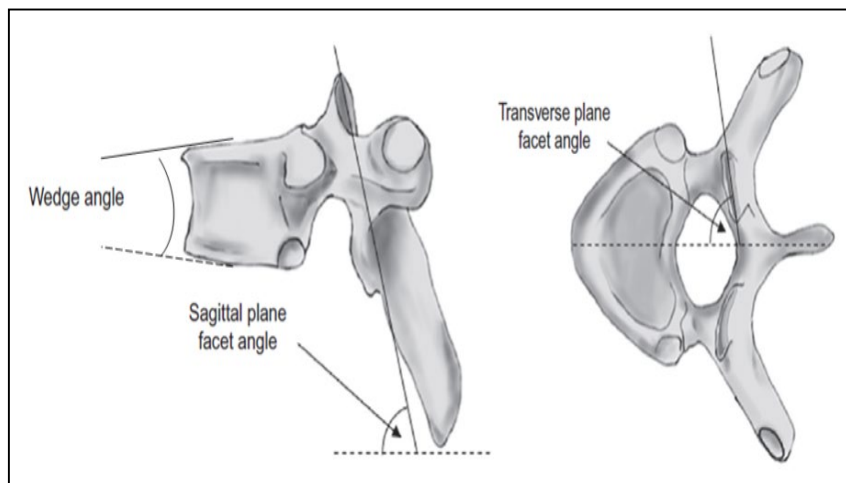


Abbildung 9. Keilwinkel und Facettengelenkwinkel der thorakalen Wirbelsäulenbewegungssegmente. Bild aus Galbusera F. et al. 2018.

Kyphose lässt Wirbelkörper eine Keilform annehmen

Präsentiert in Richtung untere Brustwirbelsäule

Die maximale Höhe der Scheibe erreicht bei T10-T11

Die Höhe der Bandscheiben nimmt ab, aber der Anulus fibrosus wird dicker und stärker

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

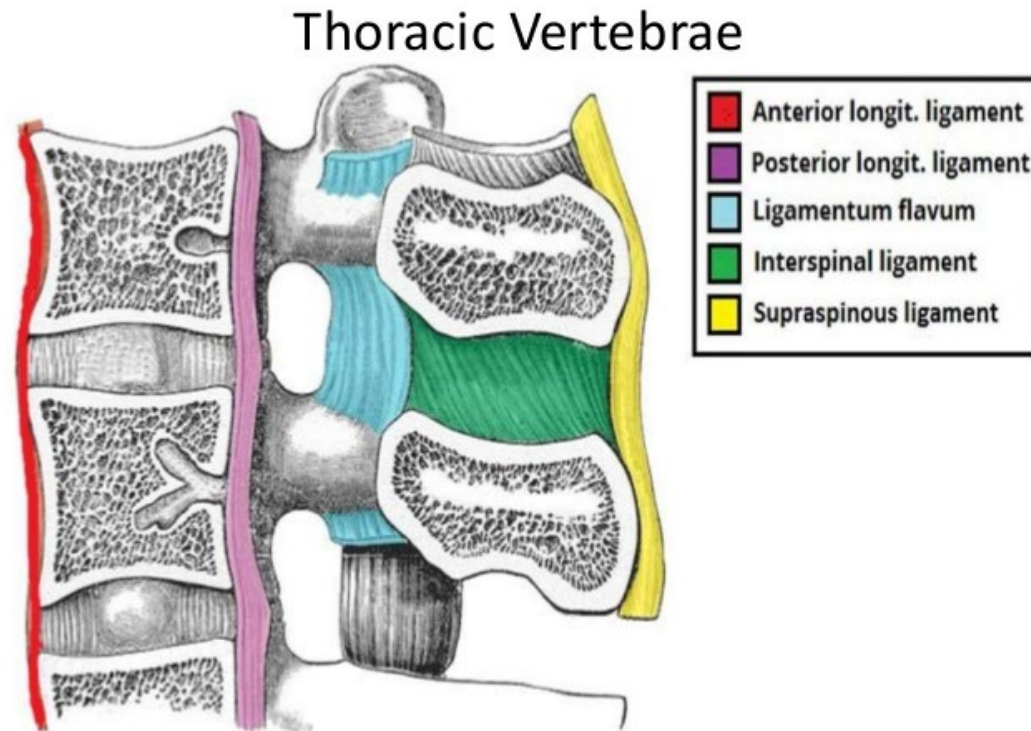


Abbildung 11. Thorakaler Bandkomplex
(entnommen aus www.slideshare.com)

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

BEWEGUNGSSEGMENT DER BRUSTWIRBELSÄULE

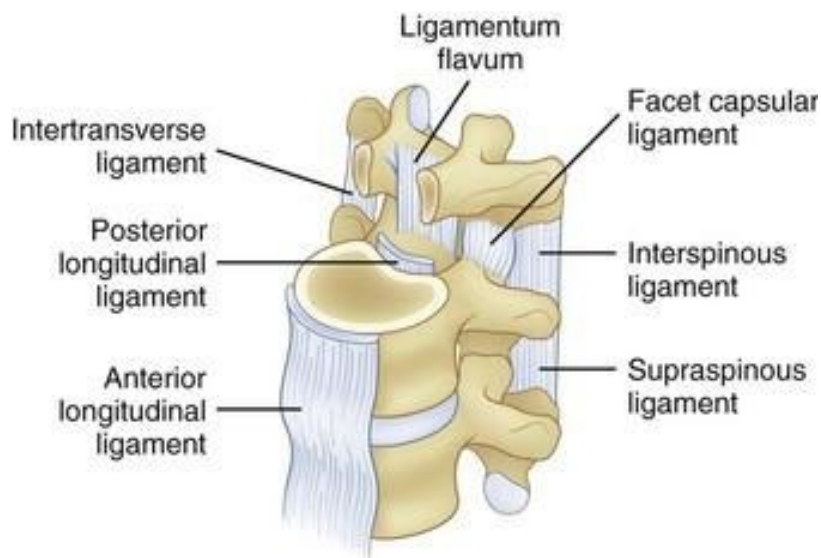


Abbildung 12. Thorakaler Bandkomplex (entnommen aus www.clinicalgate.com)

Neutrale Zone



Nahе der Neutralstellung

Knochen- und Bandstrukturen bieten minimalen Widerstand

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

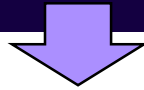
BEWEGUNGSSEGMENT DER BRUSTWIRBELSÄULE

Beim
Vorwärtsbeugen



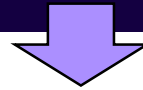
Der obere Wirbel
beugt sich relativ
zum unteren
Wirbel

Beim
Rückwärtsbiegen



Der obere Wirbel
erstreckt sich
relativ zum
unteren Wirbel

Bei seitlicher
Biegung



Der obere Wirbel
sollte sich
gegenüber dem
unteren Wirbel
seitlich beugen.
Rotation
gekoppelt in
ipsi/kontralateraler
Richtung

Bei axialer
Drehung



Der obere Wirbel
dreht sich in die
gleiche Richtung
wie die
Achsendrehung

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

BEWEGUNGSSEGMENT DER BRUSTWIRBELSÄULE

- Der Rippenkäfig beeinflusst die momentanen Rotationsachsen.
 - Bei Flexions-/Extensionsbewegungen verschiebt sich die Rotationsachse in der Sagittalebene nach posterior.
 - Bei Flexion/Extension und Lateralbeugung verlaufen die momentanen Rotationsachsen durch den unteren Wirbel,
 - Bei der axialen Rotation befindet sich die Rotationsachse in der Nähe des hinteren Teils des Wirbelkörpers.
- Die funktionelle Wirbelsäuleneinheit berücksichtigt weder die vorderen Teile der Rippen noch die costokondralen/sternochondralen Gelenke oder das Sternum.
 - Studie durch Ringeinheit.

3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE

BEWEGUNGSSEGMENT DER BRUSTWIRBELSÄULE

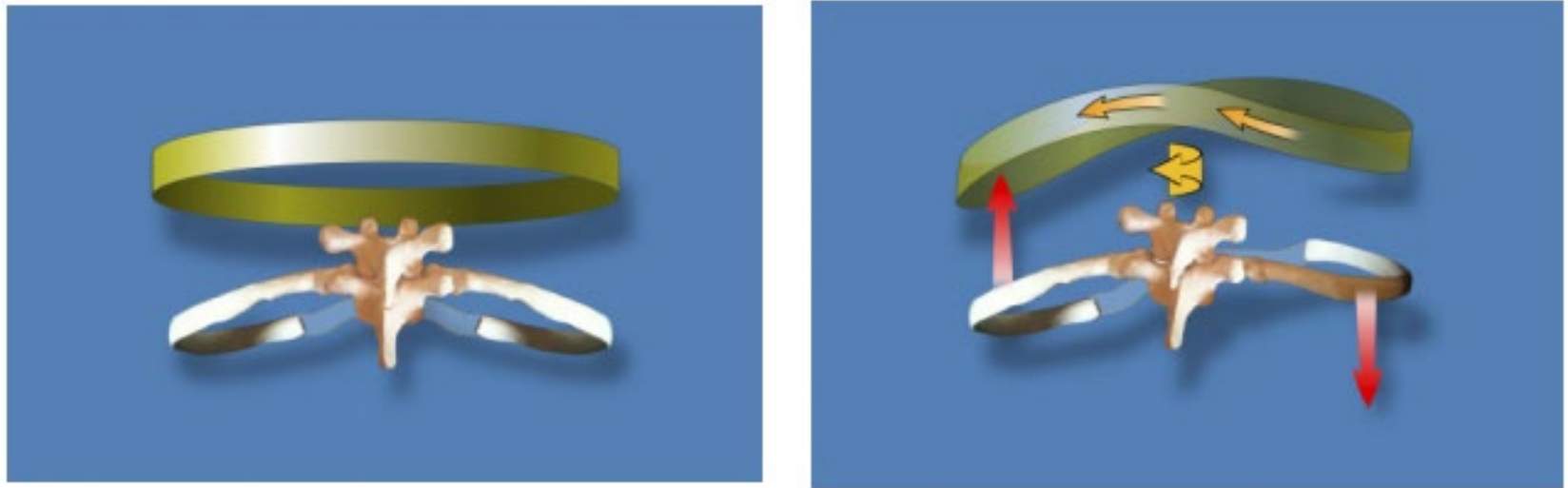
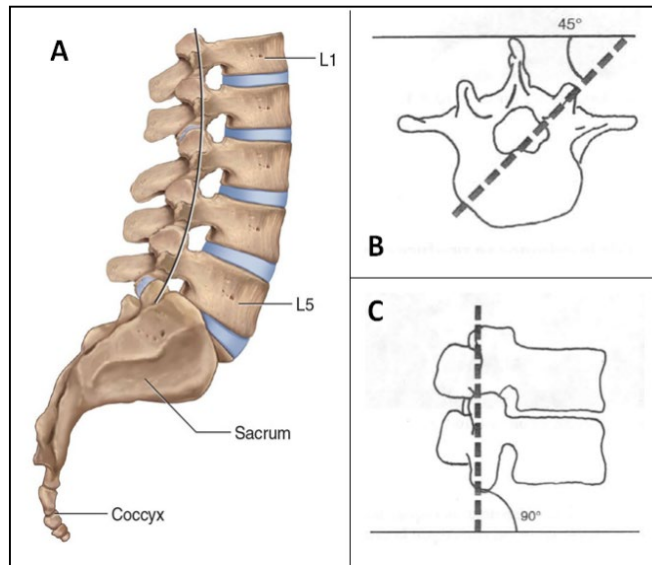


Abbildung 13. (Links) Ein typischer Thoraxring (Rechts) Kinematik eines typischen Thoraxrings. Bild aus Lee DG. et al. 2015.

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

4. Normale Biomechanik der Lenden-, Sakral- und Steißbeinwirbelsäule

4. NORMALE BIOMECHANIK DER LENDEN-, SAKRAL- UND STEISSBEINWIRBELSÄULE



- 5 Lendenwirbel, 5 verschmolzene Kreuzbeinwirbel, 4-5 Steißbeinwirbel.
- Die hintere Konkavität der Lendenwirbelsäule (Lordose), die vordere Konkavität des Kreuzbeins.
- Merkmale der Lendenwirbelsäule:
 - Breitester und größter Wirbelkörper zur Aufnahme hoher Lasten.
 - Mit endständigen knöchernen Endplatten.
 - Wirbelkörper mit unterschiedlichen Höhen je nach vorderer oder hinterer Zone.

Abbildung 14. A: Lendenwirbelsäule, Kreuzbein und Steißbein. Bild von Joseph E. Muscolino 2015. B-C: Orientierung der Lendenflächen in Bezug auf Sagital- und Transversalebene. Bild B und C aus Nordin M. 2001.

4. NORMALE BIOMECHANIK DER LENDEN-, SAKRAL- UND STEISSBEINWIRBELSÄULE

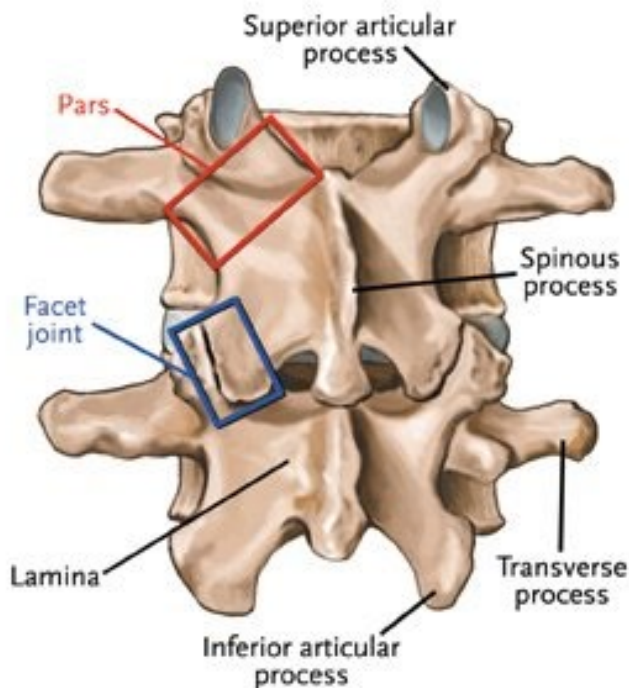


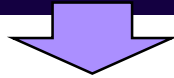
Abbildung 15. Lendenwirbelstrukturen (entnommen aus www.joint-pain-solutions.com)

- Lendenwirbelfacetten:
 - 90° und 45° Ausrichtung in der Querebene.
 - Lastverteilung mit Zwischenwirbelscheiben (IVD).
 - Ermitteln Sie hohe Widerstände bei translatorischen und rotatorischen Bewegungen.
 - Erleichtern Sie Flexions- und Extensionsbewegungen.

4. NORMALE BIOMECHANIK DER LENDEN-, SAKRAL- UND STEISSBEINWIRBELSÄULE

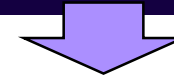
BEWEGUNGSSEGMENT DER LENDENWIRBELSÄULE

Flexionsbewegungen



- Die IVD erhöht ihre Dicke im hinteren Teil.
- Der Nucleus pulposus geht nach hinten.
- Kapsel und Bänder werden straffer.

Ausfahrbewegungen

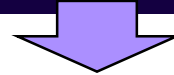


- Die IVD wird im hinteren Bereich dünner.
- Der Nucleus pulposus geht nach vorne.
- Das vordere Längsband wird gestreckt und die hinteren Bänder dehnen sich.
- Begrenzt durch Knochen und Spannung.

4. NORMALE BIOMECHANIK DER LENDEN-, SAKRAL- UND STEISSBEINWIRBELSÄULE

BEWEGUNGSSEGMENT DER LENDENWIRBELSÄULE

Seitliche Biegung



- Die IVD erhöht ihre Dicke auf der kontralateralen Seite.
- Der Nucleus pulposus verschiebt sich leicht zur ipsilateralen Seite.
- Facetten steigen auf der kontralateralen Seite an.
- Facetten fallen auf der ipsilateralen Seite ab.

4. NORMALE BIOMECHANIK DER LENDEN-, SAKRAL- UND STEISSBEINWIRBELSÄULE

BEWEGUNGSSEGMENT DER LENDENWIRBELSÄULE

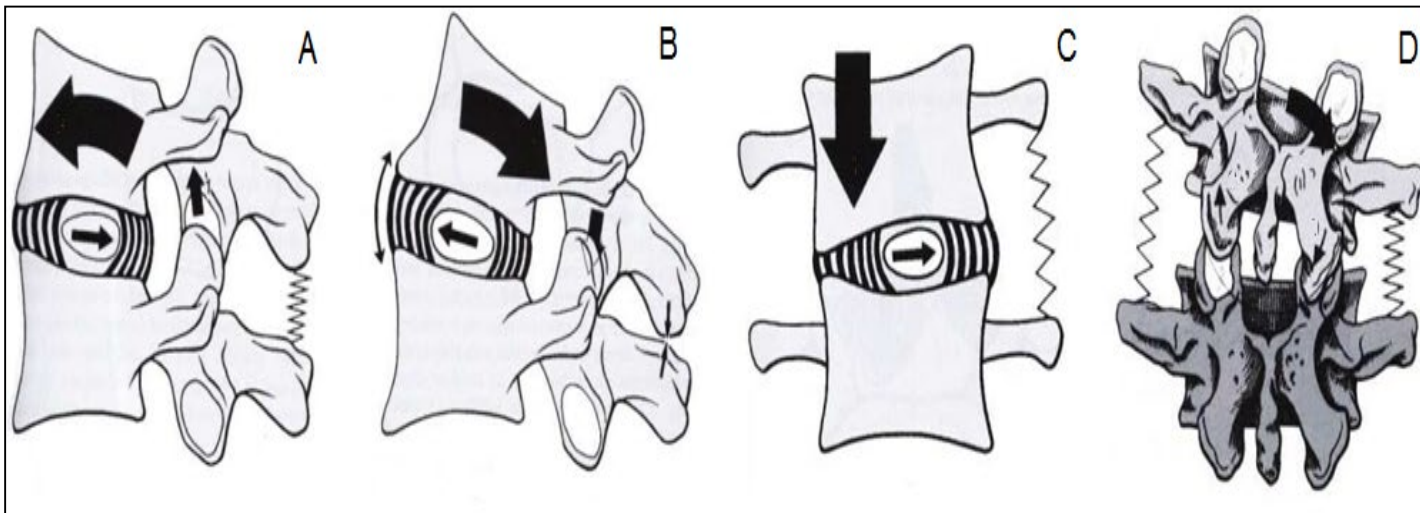
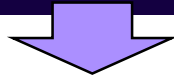


Abbildung 16. Segmentale Bewegung der Lendenwirbelsäule. A: Flexion, B: Extension, C: anteriore Ansicht der lateralen Beugung, D: posteriore Ansicht der lateralen Beugung.
Bilder aus Kapandji A.I. 1998

4. NORMALE BIOMECHANIK DER LENDEN-, SAKRAL- UND STEISSBEINWIRBELSÄULE

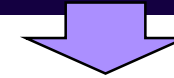
DAS KREUZBEIN UND STEISSBEIN

Kreuzbein



- Artikuliert mit 5^o Lendenwirbel, Steißbein und Beckenknochen.
- Mit Bandscheiben.
- Das Ligamentum Iliolumbarum begrenzt die Bewegung an den lumbosakralen und Iliosakralgelenken.

Steißbein



- Artikuliert mit dem Kreuzbein über ein faserig-kartilaginäres Gelenk.
- Das Ligamentum sacrococcygeale anterior und posterior, die intercornualen Bänder und das IVD begrenzen die Sacrococcygealgelenke.

4. NORMALE BIOMECHANIK DER LENDEN-, SAKRAL- UND STEISSBEINWIRBELSÄULE

DAS KREUZBEIN UND STEISSBEIN

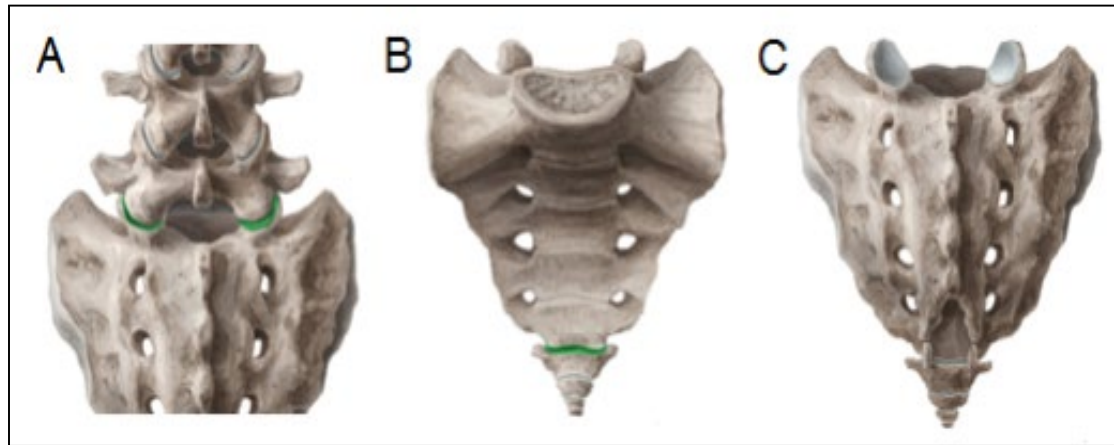


Abbildung 17. Das lumbosakrale und sacrococcygeale Gelenk. A: zygapophysiale Gelenke von der lumbosakralen Vereinigung. B: Anteriore Ansicht des Sakrococcygealgelenks. C: Posteriore Ansicht des Sakrococcygealgelenks. Bilder von der KenHub-Website.

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

5. Welche Belastung erfährt die Wirbelsäule, wenn wir uns in verschiedenen Ruhepositionen befinden?

5. WELCHE BELASTUNG ERFÄHRT DIE WIRBELSÄULE IN DEN VERSCHIEDENEN RUHEPOSITIONEN?

Stehende Position



- Gewichtsübertragung über Kreuzbein, Darmbein bis Oberschenkel.
- Entspannter Stehdruck von 0,48 bis 0,5 Mpa.



Abbildung 18. Steh- und Sitzmodell (entnommen aus www.shutterstock.com)

Sitzende Position



- Gewichtstransmission durch Kreuzbein, Darmbein bis zu den Sitzbeinhöckern.
- Die lumbale Abstützung hat den größten Einfluss auf die Lendenlordose.

5. WELCHE BELASTUNG ERFÄHRT DIE WIRBELSÄULE IN DEN VERSCHIEDENEN RUHEPOSITIONEN?

Rückenlage oder liegende
Position



- Das Beugen der Beine in liegender Position erhöht den L4-L5-Vordruck um 0,08MPa.
- Husten oder Niesen erhöhen den Vordruck in 0,38 MPa.
- Lachende Erhöhung des Vorspanndrucks in 0,15 MPa.



Abbildung 19. Liegendes
Modell (entnommen aus
www.es.dreamstime.com)

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

6. Wie ist die Biomechanik
der Wirbelsäule, wenn wir
funktionelle motorische
Gesten ausführen?

5. WIE IST DIE BIOMECHANIK DER WIRBELSÄULE, WENN WIR FUNKTIONELLE MOTORISCHE GESTEN

AUSFÜHREN?

Heben und Tragen von Gegenständen

- Hebetechniken sind wichtig, um den intradiskalen Druck zu reduzieren.
- 50% mehr Druck beim Vorwärtsbeugen.
- Mehr Lendenstabilität und Gleichgewicht beim Heben.
- Bedeutung der Facetten

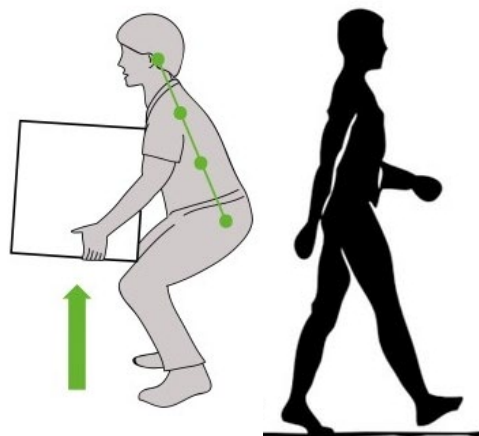


Abbildung 20. Hebe- und Gangmodell (entnommen aus www.neurospine.wellnesscenter.com & www.brightmindcenter.com)

Gangart

- Die intradiskale Belastung steigt in L3-L4 um das 0,2- bis 2,5-fache.
- Máximallast in der Startphase.
- Es besteht eine lineare Korrelation zwischen der intradiskalen Belastung und der Gehgeschwindigkeit.

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

7. Schlüsselideen

7. SCHLÜSSELIDEEN

- Die Wirbelsäule hat vier große, miteinander verbundene Funktionen: Unterstützung, Mobilität, Unterbringung und Schutz sowie Kontrolle.
- Bewegungssegment ist die "Funktionelle Wirbelsäuleneinheit" (FSU), die aus zwei benachbarten Wirbeln und den verbindenden Weichteilen ohne Muskulatur besteht. Jede FSU hat sechs Freiheitsgrade.
- Der zervikale Abschnitt besteht aus 7 Wirbeln und bildet eine von zwei Lordosen der Wirbelsäule, die den Widerstand gegen die Belastung durch axiale Kompressionen im Vergleich zu einer geradlinigen Säule stark erhöhen (bis zum Zehnfachen).
- Das Atlanto-Okzipital-Gelenk wird für den Atlas und den kondylären Teil des Hinterhauptbeins gebildet und ermöglicht die Nickbewegungen durch das Rollen und Gleiten der Hinterhauptkondylen auf der konkaven Fläche der Gelenkpfanne, die sich in der oberen Fläche der seitlichen Masse des Atlas befindet.

7. SCHLÜSSELIDEEN

- Der atlanto-axiale Komplex besteht aus zwei lateralen Facettengelenken, der einzigartigen atlantodentalen Artikulation und dem Gelenk zwischen der hinteren Fläche des Odontoids und dem Ligamentum transversum und ermöglicht es dem vorderen Bogen des Atlas, sich um den Drehpunkt zu drehen und zu gleiten, so dass Atlas und Kopf als eine Einheit von Seite zu Seite rotieren können.
- Die Brustwirbelsäule hat 12 Wirbel von T1 bis T12, die in der Sagittalebene eine konkave Krümmung nach ventral bilden, die Kyphose genannt wird. Die kyphotische Beschaffenheit der Wirbelsäule führt weiterhin zu einer primären Drucklastverteilung in anteriorer Richtung auf den Wirbelkörper, während die posterioren überwiegend Zuglasten aufnehmen müssen.
- Der distale Bereich der Wirbelsäule besteht aus dem lumbalen Abschnitt mit 5 Wirbeln, dem sakralen Abschnitt mit 5 verschmolzenen Wirbeln und dem coccygealen Abschnitt, der aus 4-5 Wirbeln besteht. Während die Lendenwirbelsäule eine posteriore konkave Lordose aufweist, hat das Kreuzbein eine anteriore Konkavität.

7. SCHLÜSSELIDEEN

- In den Bewegungen der lumbalen Extension und Flexion wird die meiste vertebrale Translation beobachtet, was die Messung der lumbalen Translation zu einem bestimmenden Faktor der Wirbelsäuleninstabilität macht.
- Die Belastung der Bandscheiben ändert sich in Abhängigkeit von der Körperposition und den ausgeführten Handlungen. In der Rückenlage liegt der intradiskale Druck in der Lendenwirbelsäule bei etwa 0,08 MPa, während der Druck im entspannten Stehen zwischen 0,48 und 0,5 MPa schwankt. In der sitzenden Position ist der Druck ähnlich wie in der zweibeinigen Position, aber die Neigung der Rückenlehne hat einen großen Einfluss auf die Abnahme dieses Drucks, ebenso wie die Verwendung einer Armlehne.
- Während des Gehens stieg die intradiskale lumbale Belastung um das 0,2- bis 2,5-fache in Bezug auf den intradiskalen Druck im Ruhezustand. Während der Geste des Anhebens eines Gewichts vom Boden steigt der Druck jedoch weiter um 70 % bis 220 % an, insbesondere wenn dies mit gebeugtem Rücken und gestreckten Knien geschieht. Es beeinflusst diesen intradiskalen Druck auch, wenn das Gewicht, das angehoben wird, vom Körper weg ist.

B. Biomechanische Veränderungen der Wirbelsäule

8. Literaturverzeichnis

8. BIBLIOGRAPHIE

1. Bogduk, N. Mercer, S. Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics. *Clinical Biomechanics*. 2000 (15) 633-648.
2. Brasiliense, LBC. Lazaro, BCR. Reyes, PM. Dogan, S. Theodore, N. Crawford, NR. Biomechanical contribution of the Rib Cage to Thoracic Stability. *Spine*. 2011, 36(26):E1686-E1693.
3. Ebraheim, NA. Patil, V. Liu, J. Haman, SP. Yeasting, RA. Morphometric analyses of the cervical superior facets and implications for face dislocation. *International Orthopaedics (SITCOT)*. 2008, 32:97-101.
4. Friis, EA. Arnorl, PM. Goel, VK. Mechanical testing of cervical, thoracolumbar, and lumbar spine implants. Elsevier. 2017 May; 161-180.
5. Galbusera, F. Wilke, HJ. Biomechanics of the spine. Chapter 4 - Basic Biomechanics of the lumbar spine. Elsevier. 2018, 51-67.
6. Hansen, L. de Zee, M. Rasmussen, J. Andersen, TB. Wong, C. Simonsen, EB. Anatomy and Biomechanics of the Back Muscles in the Lumbar Spine With Reference to Biomechanical Modeling. *Spine*. 2006, 31(17):1888-1899.
7. Herkowitz, HN. Garfin, SR. Eismont, FJ. Bell, GR. Balderston, RA. Rothman-Simeone The Spine: Expert Consult. Elsevier. Chapter 7- Biomechanics of the Spinal Motion Segment. 2015, 109-128.
8. Joseph E. Muscolino. *Manual Therapy for the Low Back and Pelvis. A clinical orthopedic approach*. Ed. Wolters Kluwer. 2015.
9. Kapandji, AI. *Fisiología Articular – Tronco y Raquis 5ª Edición*. Chapter 3 – El raquis lumbar. 1998, 76-128.
10. Kiapour, A. Joukar, A. Elgafy, H. Erbulut, DU. Agarwal, AK. Goel, VK. Biomechanics of the sacroiliac joint: anatomy, function biomechanics sexual dimorphism, and causes of pain. *International Journal of Spine Surgery*. 2020, 14:S3-S13.

8. BIBLIOGRAPHIE

11. Lee, DG. Biomechanics of the thorax – research evidence and clinical expertise. *Journal of Manual and Manipulative Therapy*. 2015, 23(3):128-138.
12. Liebsch, C. Wilke, HJ. Biomechanics of the spine. Chapter 3 – Basic Biomechanics of the Thoracic Spine and Rib Cage. Elsevier. 2018, 35-50.
13. Lomeli-Rivas, A. Larrinúa-Betancourt, JE. Biomecánica de la columna lumbar: un enfoque clínico. *Acta Ortopédica Mexicana*. 2019, 33(3):185-191.
14. Menchetti, PPM. Cervical Spine Minimally Invasive and Open Surgery. Chapter 2 – Functional Anatomy and Biomechanics of the Cervical Spine. Springer. 2016. 11-26.
15. Miralles, RC. Puig, M. Biomecánica clínica de aparato locomotor. Part 4 – Biomecánica de los movimientos. Mason, S.A. 2000, 295-315.
16. Oakes, PC. Sardi, JP. Iwanaga, J. Topale, N. Oskouian, RJ. Tubbs, S. Translation of Hecker's 1922 „the Occipital-Atlanto-Axial Ligament System”. *Clinical Anatomy*. 2017, 30:322-329.
17. Pope, MH. Biomechanics of the Lumbar Spine. *Ann Med*. 1989 Oct;21(5):347-51.
18. Romberg, K. Olsén, MF. Kjølby-Wendt, G. Hallerman, KL. Danielsson, A. Thoracic mobility and its relation to pulmonary function and rib-cage deformity in patients with early onset idiopathic scoliosis: a long-term follow-up. *Spine Deformity*. 2020, 8:257-268.
19. Stammen, JA. Herriott, R. Kang, YS. Bolte, J. Dupraix, R. Sequential Biomechanics of the Human Upper Thoracic Spine and Pectoral Girdle. *Annals of Advances in Automotive Medicine*. 2012 Oct, 56:151-162.

8. BIBLIOGRAPHIE

20. Swartz, EE. Floyd, RT. Cendoma, M. Cervical Spine Functional Anatomy and the Biomechanics of Injury Due to Compressive Loading. *Journal of Athletic Training*. 2005; 40(3):155-161.
21. Tague, RG. Fusion of Coccyx to Sacrum in Humans: Prevalence, correlates, and effect on pelvic size, with obstetrical and evolutionary implications. *American Journal of Physical Anthropology*. 2011, 145:426-437.
22. Travascio, F. Eltoukhy, M. Asfour, S. Spine Biomechanics: A review of current approaches. *Spine Research*. 2015, 1(1:4)
23. Watson, C. Paxinos, G. Kayalioglu, G. The Spinal Cord. Chapter 3 – The Vertebral Column and Spinal Meninges. Elsevier. 2008, 17-36.
24. Yoganandan, N. Nahum, AM. Melvin, JW. *Accidental Injury Biomechanics and Prevention Third Edition*. Chapter 15 – Thoracic Spine Injury Biomechanics. Springer. 2015, 435-450.
25. Zentrum für Chirurgie, AI. Biomechanics of the Thoracic Spine – Development of a Method to Measure the influence of the Rib Cage on Thoracic Spine Movement. *Medicine*. 2012.



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.

