

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

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0. It is allowed to download this work and share it with others, but you must give credit, and you can't change it in any way or use it commercially.



Index

1. ZIELSETZUNG UND EINLEITUNG	2
Allgemeine Konzepte	2
2. NORMALE BIOMECHANIK DER HALSWIRBELSÄULE	4
2.1 Biomechanik der oberen Halswirbelsäule	4
Atlanto-okzipitales Gelenk	4
Atlanto-axiales Gelenk	5
2.2 Biomechanik der unteren Halswirbelsäule	6
3. NORMALE BIOMECHANIK DER BRUSTWIRBELSÄULE	8
Bewegungssegment der Brustwirbelsäule	10
4. NORMALE BIOMECHANIK DER LENDEN-, SAKRAL- UND STEIßBEINWIRBELSÄULE	12
Bewegungssegment der Lendenwirbelsäule	13
5. WELCHE BELASTUNG ERFÄHRT DIE WIRBELSÄULE IN DEN VERSCHIEDENEN RUHEPOSITIONEN?	16
6. WIE IST DIE BIOMECHANIK DER WIRBELSÄULE, WENN WIR FUNKTIONELLE MOTORISCHE GESTEN AUSFÜHREN?	17
7. SCHLÜSSELIDEEN	18
8. REFERENZEN	20

1. Zielsetzung und Einleitung

In dieser didaktischen Einheit werden die wichtigsten Aspekte der normalen Biomechanik der Wirbelsäule besprochen. Die Ziele dieser didaktischen Einheit sind:

1. Die Biomechanik der verschiedenen Segmente der Wirbelsäule unter normalen Bedingungen zu überarbeiten.
2. Überprüfung der Biomechanik der Wirbelsäule im Normalzustand in den wichtigsten Ruhestellungen des Menschen.
3. Überprüfung der Biomechanik der Wirbelsäule im Normalzustand bei üblichen täglichen funktionellen Bewegungen.

Allgemeine Konzepte

Die Wirbelsäule hat vier große, miteinander verbundene Funktionen: 1) Unterstützung, 2) Mobilität, 3) Unterbringung und Schutz und 4) Kontrolle. Als Stützstruktur fungiert die Wirbelsäule als Rahmen für die Befestigung der inneren Organe, der oberen und unteren Extremitäten und des Kopfes. Die Beweglichkeit ermöglicht die vielen körperlichen Aufgaben des täglichen Lebens und der Arbeit, erschwert aber den Aufbau der Wirbelsäule. Anstelle einer einzelnen starren Säule ist die Wirbelsäule ein flexibler Stapel aus 24 starren Wirbeln mit flexiblen Bandscheiben dazwischen.

Bewegungssegment ist die "Funktionelle Wirbelsäuleneinheit" (FSU), die aus zwei benachbarten Wirbeln und den verbindenden Weichteilen ohne Muskulatur besteht. Jede FSU hat sechs Freiheitsgrade (Abbildung 1). Unter Verwendung des kartesischen Standardkoordinatensystems für die Wirbelsäule können 12 potenzielle Bewegungen um die momentane Rotationsachse berücksichtigt werden: 2 translatorische und 2 rotatorische entlang oder um jede Achse (x, y, z). Zusammengefasst wird der Bewegungsumfang (Range of Motion, ROM) durch Translation und Rotation in drei Ebenen ausgedrückt. Bei der Halswirbelsäule sollte zu viel Bewegung als strukturelle Schädigung der Wirbelsäule angesehen werden, während zu wenig Bewegung mit Steifheit und Schmerzen einhergehen kann.

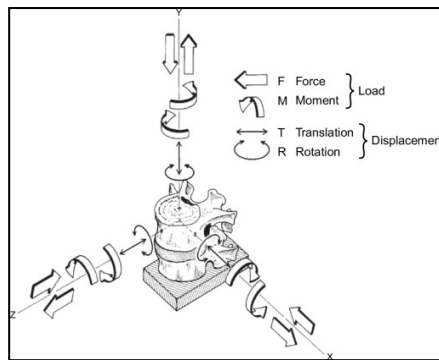


Abbildung 1 - Das von White und Panjabi (1990) entwickelte Koordinatensystem für die Wirbelsäule. Die Abbildung zeigt die mögliche Translation und Rotation für die x-, y- und z-Achse. Aus E.A. Friis et al. 2017.

2. Normale Biomechanik der Halswirbelsäule

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). Der zervikale Abschnitt, "Halswirbel C1-C7", dessen Länge von 15 bis 16 cm bei Frauen und von 18 bis 19 cm bei Männern variiert, wobei 1/4 durch die Dicke der Bandscheiben repräsentiert wird, weist eine lordodisch bewegliche anterior konvexe Krümmung von ca. 36° auf, die entsprechend den Modifikationen der anderen Wirbelsäulenkrümmungen variiert und bei älteren Menschen stärker akzentuiert ist. Die Halswirbel können nach ihren Eigenheiten in obere Halswirbelsäule (C1-C2) und untere Halswirbelsäule (C3-C7) eingeteilt werden.

2.1 Biomechanik der oberen Halswirbelsäule

Atlanto-okzipitales Gelenk

Der Atlas ist der erste Halswirbel und bietet eine Wiege (auch Sockel oder Kerbe genannt) zur Abstützung des kondylären Teils des Hinterhauptbeins. Seine primären Bewegungen sind Flexions- und Extensions- oder Nickbewegungen. Diese Bewegungen werden durch das Abrollen und Gleiten der Hinterhauptkondylen auf der konkaven Fläche der Pfanne erreicht. Bei der Flexion rollen die Kondylen vorwärts und gleiten rückwärts über die vorderen Wände ihrer Gelenkpfanne. In der Extension kommt es zu einer umgekehrten Kombination aus Abrollen und Gleiten. Die Flexions- und Extensionsbewegungen werden durch Folgendes eingeschränkt:

- Das Atlanto-Occipital-Gelenk ist eine Impaktion des Randes der Gelenkpfanne gegen die Schädelbasis
- Die Flexion wird durch die Spannung in der hinteren Nackenmuskulatur und durch das Andrücken des submandibulären Gewebes gegen den Hals eingeschränkt
- Die Extension wird durch das Okziput begrenzt, das die subokzipitale Muskulatur komprimiert.

Rotation und Lateralflexion zwischen Hinterhauptbein und Atlas sind aufgrund der Tiefe der oberen Gelenkfläche der lateralen Masse nur sehr eingeschränkt oder gar nicht möglich. Bei diesen Bewegungen bewegen und funktionieren Kopf und Atlas im Wesentlichen als eine Einheit. Bei der Kopfrotation hat der kontralaterale Hinterhauptkondylus Kontakt mit der vorderen Wand seiner Atlaspfanne und der ipsilaterale Kondylus Kontakt mit der hinteren Wand seiner jeweiligen Atlaspfanne. Stattdessen verhindert die straffe atlanto-okzipitale Gelenkkapsel bei der lateralen Kopfflexion, dass sich der kontralaterale Kondylus aus seiner Höhle hebt. Die Stabilität des Atlanto-Occipital-Gelenks ergibt sich in der Tat weitgehend aus der Tiefe der Gelenkpfannen.

Atlanto-axiales Gelenk

Der atlanto-axiale Komplex besteht aus zwei lateralen Facettengelenken, der einzigartigen atlantodontalen Artikulation und dem Gelenk zwischen der hinteren Oberfläche des Odontoids und dem Ligamentum transversum.

Das Gewicht des Kopfes wird über die lateralen atlanto-axialen Gelenke von C2, der Achse, auf die Halswirbelsäule übertragen. Der Processus odontoideus erstreckt sich vom Körper des C2-Wirbels bis zur Facette am Atlas, die sich im vorderen Bogen befindet, fungiert als "Drehpunkt" und bildet das atlanto-axiale Mediangeln. Dieses atlanto-axiale Mediangeln ermöglicht es dem vorderen Bogen des Atlas, sich um den Drehpunkt zu drehen und zu gleiten (Abbildung 2), wodurch der Atlas und der Kopf als eine Einheit von Seite zu Seite rotieren können. Die unilaterale Rotation dieses Gelenks beträgt etwa 40°. In einem so beweglichen Gelenk muss eine große Stabilisierung vorhanden sein, die in diesem Fall durch die transversalen, alaren und apikalen Bänder gegeben ist (Abbildung 2), die den Dens während der Rotation des Atlas halten. Ebenso wird die Bewegung am Ende der Rotation durch die lateralen atlanto-axialen Gelenke begrenzt, die viel laxer sind als die C0-C1-Gelenkkapseln. Eine Rotation in dieser Ebene ist auch aufgrund der besonderen Anatomie der lateralen atlanto-axialen Gelenke möglich. In manchen Texten wird dieses Gelenk als bikonkav, in anderen als bikonvex bezeichnet, je nachdem, ob sich der Text auf die Form der Gelenkflächen bzw. den Gelenkknorpel dazwischen bezieht. Technisch gesehen handelt es sich um ein ebenes Gelenk, das Gleit- und Drehbewegungen zulässt. Das bedeutet, dass sich auf den Gelenkflächen des C2 die inferioren und lateralen Gelenkflächen des Atlas bei Rotation nach vorne oder hinten bewegen können. Bei der Rotation des C1 gleitet die ipsilaterale Atlasfacette an der posterioren Schräge der jeweiligen Axialfacette herunter, während die kontralaterale an der anterioren Schräge der Axialfacette heruntergleitet.

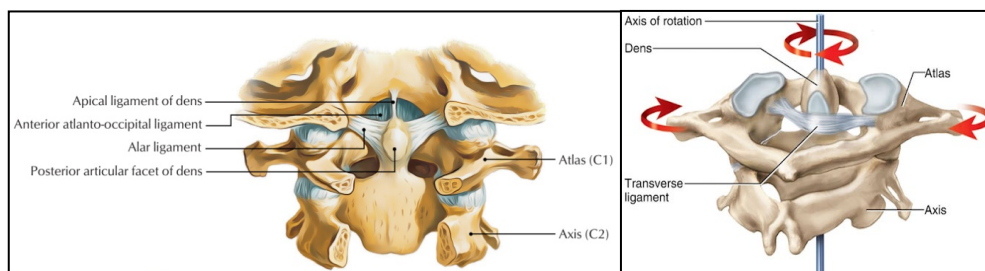


Abbildung 2 - Apikales, alares und transversales Band des Odontoidfortsatzes des Axis-Wirbels. Bild aus (links) www.earthslab.com und (rechts) www.imagequiz.co.uk.

Das atlanto-axiale Lateralgelenk erzeugt auch eine koppelnde Bewegung während der Flexion und Extension der Halswirbelsäule (Abbildung 3), d. h. wenn sich die Halswirbelsäule beugt, streckt sich der Atlas, und wenn sich die Halswirbelsäule streckt, beugt sich der Atlas. In neutraler Position ist C1 prekär auf den Konvexitäten seiner Gelenkknorpel balanciert, aber wenn eine axiale Kompressionslast aufgebracht wird, beginnt C1 sich passiv zu bewegen. Das Gleiten des Atlas nach hinten wird durch die Anpressung seines vorderen Bogens gegen den Warzenfortsatz begrenzt, während das Gleiten nach vorne durch das transversale und das alare Ligament verhindert wird. Eine anteriore Translation von C1 auf

C2 von bis zu 3 mm, gemessen am anterioren atlantodentalen Intervall, wird als normal angesehen.

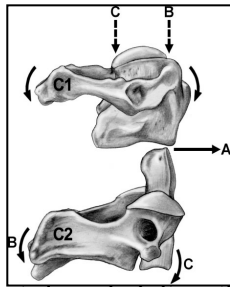


Abbildung 3 - Die bikonvexe Natur von C1 und C2. A, Translation. B, Extension von C1 erzeugt Flexion in C2. C, Flexion von C1 erzeugt Extension in C2. Bild aus Swartz E. et al. 2005.

Die Integrität des okzipito-atlanto-axialen Gelenkkomplexes hängt nicht nur von den Bändern ab, die wir oben bereits erwähnt haben, sondern auch die Tektorialmembran spielt eine fundamentale Rolle bei der Stabilität dieser Segmente. Die Tektorialmembran ist eine breite Fortsetzung des hinteren Längsbandes und ist zwischen dem hinteren Körper von C2 und dem Basiociput befestigt. Ihre Hauptaufgabe ist die Begrenzung der Extension an den okzipitoatlantalen Gelenken.

2.2 Biomechanik der unteren Halswirbelsäule

Um die untere Halswirbelsäule zu beschreiben, wird sie üblicherweise ab C3 betrachtet. Das C2-C3-Gelenk hat jedoch wichtige biomechanische Eigenschaften, die sich von den Gelenken der übrigen unteren Halswirbel unterscheiden:

- Im Gegensatz zu den typischen zygapophysialen Gelenken, deren Ebenen transversal verlaufen, sind die oberen Gelenkfortsätze von C3 nicht nur nach oben und hinten, sondern auch nach medial gerichtet, und zwar um etwa 40°. Im Gegensatz zu den typischen zygapophysialen Gelenken, deren Ebenen transversal sind.
- Die Fortsätze beider Seiten bilden zusammen eine Gelenkpfanne, in die die unteren Gelenkfortsätze der Achse eingebettet sind. Außerdem liegen die oberen Gelenkfortsätze von C3, bezogen auf ihren Wirbelkörper, tiefer als die Fortsätze der unteren Segmente.
- Während der axialen Rotation des Halses ist die Richtung der Kopplung mit der lateralen Flexion bei C2-C3 entgegengesetzt zu der, die bei den unteren Segmenten zu sehen ist. Anstatt sich zur gleichen Seite wie die Rotation zu beugen, rotiert C2 im Durchschnitt von dieser Seite weg. Die untere Lage des oberen Gelenkfortsatzes von C3 korreliert mit der unteren Lage der Achse der sagittalen Rotation von C2.

Die Eigenschaften der unteren Wirbel sind einheitlicher. Sie sind durch eine Bandscheibe im Zwischenwirbelgelenk getrennt. Die Gelenkflächen des unteren und oberen Zwischenwirbelgelenks ähneln einem Sattelgelenk, d.h. sie bestehen aus zwei einander zugewandten, rechtwinklig zueinander stehenden Wölbungen. Die untere Fläche des oberen Wirbelkörpers ist in der Sagittalebene konkav nach unten und die obere Fläche des unteren Wirbelkörpers ist in der Transversalebene konkav nach oben. Diese Eigenschaften ermöglichen, dass sich der Wirbelkörper vorwärts und rückwärts um eine transversale Achse

(Abbildung 4, Achse I) und seitwärts um eine senkrechte Achse zu den Facetten bewegen kann und von den Uncinate-Fortsätzen gewogen wird (Abbildung 4, Achse II). Eine Bewegung um eine schräge anterior-posteriore Achse (Abbildung 4, Achse III) ist durch die Ausrichtung der Facetten ausgeschlossen.

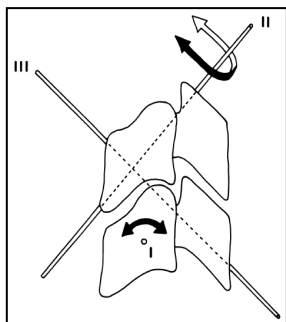


Abbildung 4 - Die Bewegungsebenen eines zervikalen Bewegungssegments. Flexion und Extension erfolgen um eine transversale Achse (Achse I). Die axiale Rotation erfolgt um eine modifizierte Achse (Achse II), die senkrecht zur Ebene der Zygapophysialgelenke verläuft. In der dritten Achse (Achse III) kann keine Bewegung stattfinden. Bild aus Bogduk N. et al. 2000.

3. Normale Biomechanik der Brustwirbelsäule

Als Bindeglied zwischen den Abschnitten der Hals- und Lendenwirbelsäule muss die Brustwirbelsäule eine hohe Stabilität für das muskelgesteuerte sagittale Gleichgewicht der Wirbelsäule durch den Erector spinae und die Bauchmuskulatur, für eine optimale Kraftübertragung vom Oberkörper auf die unteren Wirbelsäulenabschnitte und für eine ausreichende Flexibilität zur Durchführung dreidimensionaler Bewegungen gewährleisten. Während die intersegmentale Stabilität der Hals- und Lendenwirbelsäule hauptsächlich durch die angrenzende Muskulatur bestimmt wird, werden die Brustwirbelsäulensegmente vor allem durch die zusätzlichen knöchernen und ligamentären Strukturen des Brustkorbs stabilisiert.

Die Brustwirbelsäule hat 12 Wirbel von T1 bis T12, die eine konkave Krümmung nach ventral in der Sagittalebene bilden, die als Kyphose bezeichnet wird (Abbildung 5), deren Winkel 45° beträgt und bei asymptomatischer Wirbelsäule zwischen 20° und 70° variiert. Die Kyphose hängt vom Winkel der lumbalen Lordose und der Positionierung der unteren Halswirbel ab, d. h. eine flache lumbale Lordose induziert eine verminderte untere Brustwirbelkrümmung und beides führt zu einem Effekt in der Position der unteren Halswirbel, um sie im Gleichgewicht zu halten. Die anfängliche Krümmung der Wirbelsäule und das Körpergewicht bestimmen die obige Lage des Schwerpunkts. Da die Brustwirbelsäule in der Regel nach vorne gebogen ist, existieren kontinuierliche hintere Muskelkräfte, die notwendig sind, um die aufrechte Position der Wirbelsäule aufrecht zu erhalten, insbesondere durch den M. longissimus dorsi. Mit zunehmender axialer Belastung richtet sich die thorakale Krümmung bei kleinen Anfangswinkeln auf und nimmt bei größeren Winkeln zu. Die kyphotische Beschaffenheit der Wirbelsäule führt weiterhin zu einer primären Drucklastverteilung in anteriorer Richtung auf den Wirbelkörper, während die posterioren hauptsächlich Zuglasten standhalten müssen.

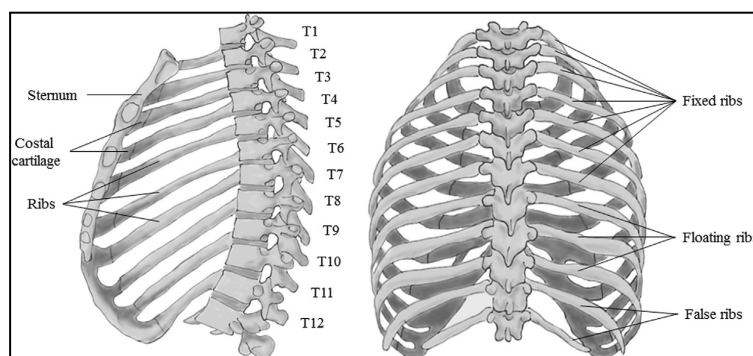


Abbildung 5 - Die knöchernen und knorpelige Brustwirbelsäule und der Rippenkäfig in sagittaler Ansicht ohne die linken Rippen (links) und in Rückenansicht (rechts). Bild aus Galbusera F. et al. 2018.

Die Wirbelmorphologie wird auf die schräge Konfiguration der Brustwirbelsäule zurückgeführt. Der durchschnittliche Keilwinkel (Abbildung 6) beträgt etwa 4 Grad, was einen

Trend zu einer ausgeprägteren Keilkonfiguration der mittleren Brustwirbelkörper zeigt. Die Neigung der Gelenkfacetten schränkt den Bewegungsumfang in Flexion/Extension und axialer Rotation ein und verändert die momentane Rotationsachse in der Transversalebene. In der Brustwirbelsäule (T1-T10) sind die Facetten nahezu koronal ausgerichtet. Die Neigungswinkel der Facetten nehmen allmählich in Richtung Lendenwirbelsäule zu, indem sie zur Frontalebene konvergieren, insbesondere in der Sagittalebene, wo die Winkel von $55-60^\circ$ in T1 bis $70-75^\circ$ in T10 variieren. (Abbildung 6-A). In der transversalen Ebene variieren die Winkel der Facetten von $70-80^\circ$. Da alle thorakalen Facetten primär parallel zur Frontalebene ausgerichtet sind, bieten sie einen deutlichen Widerstand gegen anteroposteriore Translation und, in geringerem Maße, gegen axiale Kompressionsbelastungen. In der thorakolumbalen Übergangszone (T11 bis L1) gibt es in der Regel einen abrupten oder segmentalen Wechsel der Facettenorientierung in der Transversalebene von der Frontal- zur Sagittalebeneorientierung der Gelenkflächen; in der zervikothorakalen Übergangszone nimmt der Winkel in der Sagittalebene tendenziell ab und der Transversalwinkel nimmt tendenziell in superiorer Richtung zu.

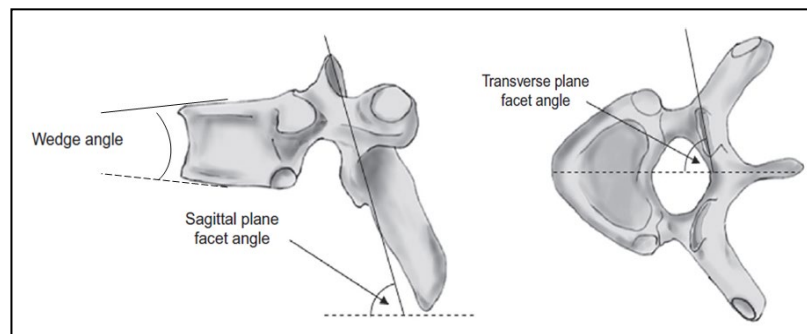


Abbildung 6 - Keilwinkel und Facettengelenkwinkel der Bewegungssegmente der Brustwirbelsäule. Bild aus Galbusera F. et al. 2018.

Aufgrund der kyphotischen Krümmung der Brustwirbelsäule und des zunehmenden Biegemoments in aufrechter Position wird der vordere Anteil der thorakalen Bandscheibe durch das Körpergewicht komprimiert, während die Bandscheibe im unkomprimierten Zustand eine Keilform aufweist. Diese Keilform, resultierend aus einer größeren anterioren Bandscheibenhöhe, ist besonders in der unteren Brustwirbelsäule (T7 - T12) um ca. 20% vorhanden, während in der oberen Brustwirbelsäule die Bandscheiben entweder recht flach sind (T1 - T4, T5- T7) oder eine größere posteriore Bandscheibenhöhe aufweisen (T4 - T5). Die durchschnittliche Bandscheibenhöhe nimmt nach unten hin ab bis zu einem Minimum bei T4-T5, bevor sie ansteigt und bei T10-T11 eine maximale Höhe erreicht. Im Vergleich zur Hals- oder Lendenwirbelsäule ist die Bandscheibenhöhe im Allgemeinen geringer, aber der Anulus fibrosus ist dicker und stärker, besonders im hinteren Abschnitt, was zu begrenzten Rotationsbewegungen führt, während der Nukleus relativ klein ist, was darauf hindeutet, dass axiale Kompressionsbelastungen von anderen Strukturen, wie den Facettengelenken oder den Strukturen des Brustkorbs, absorbiert werden. In der Transversalebene sind die Querschnittsflächen der Bandscheiben der oberen Brustwirbelsäule relativ kleiner als die der unteren Brustwirbelsäule und nehmen nach unten hin von T1-T2 bis T11-T12 um mehr als 100 % zu.

Die Bänder in diesem Bereich sollen kurz beschrieben werden, wobei zu beachten ist, dass sie auch in anderen Regionen vorkommen. Das vordere Längsband, das sich an der Vorderseite jedes Wirbels befindet, hat in der Brustwirbelsäule eine größere Querschnittsfläche und ist in der oberen Brustwirbelsäule etwa dreimal so stark wie in der unteren, um übermäßige Streckbewegungen zu begrenzen. Das hintere Längsband hingegen befindet sich innerhalb des Wirbelkanals und erstreckt sich entlang der hinteren Flächen der Wirbelkörper; in der mittleren Brustwirbelsäule ist es stärker als in den anderen Regionen. Diese Bänder sind im Bereich der Brustwirbelsäule dicker als in den anderen Abschnitten, da sie Hyperflexions- und Hyperextensionsbewegungen verhindern müssen. Das Ligamentum flavum ist definiert als jeder der gelb gefärbten Abschnitte des elastischen Gewebes, die sich zwischen der Lamina eines oberen und eines unteren Wirbels befinden; seine Funktion ist es, die aufrechte Position zu erhalten oder wiederherzustellen. Im unteren Thoraxsegment weist das Ligamentum flavum eine hohe Zugbruchlast von ca. 300 N auf und hat zudem eine große Querschnittsfläche (100 mm²). Die intertransversalen Bänder finden sich in der Brustwirbelsäule und in der oberen Lendenwirbelsäule und üben eine Begrenzung der lateralen Inklination und der axialen Rotation aus, während die interspinösen und supraspinösen Bänder zur Begrenzung der Hyperflexion dienen. Das Ligamentum supraspinale ist jedoch stärker als das Ligamentum interspinale aufgrund des höheren Hebelarms bei der Flexionsbewegung.

Bewegungssegment der Brustwirbelsäule

Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass die Beziehung zwischen Bewegungsbereich und neutraler Zone bei gleichen Biegemomenten in Richtung nach unten abnimmt. Die neutrale Zone ist eine Zone der Beweglichkeit, nahe der neutralen Position des Gelenks, in der die osteoligamentären Strukturen minimalen Widerstand bieten. In vivo wurden höhere Bewegungsbereiche in den unteren Segmenten gefunden, da die schwimmenden und falschen Rippen des unteren Brustkorbs einen geringeren Einfluss auf die Bewegungseinschränkung haben. Die segmentale Bewegung erfolgt wie folgt:

- Bei der Vorwärtsbeugung beugt sich der obere Wirbel relativ zum unteren Wirbel. Zwischen T3 und T10 ist der obere Gelenkfortsatz in der Koronalebene leicht nach anterior geneigt und es kommt zu einer geringen anterioren Translation des oberen Wirbels während der Flexion.
- Bei der Rückwärtsbeugung streckt sich der obere Wirbel relativ zum unteren Wirbel. Zwischen T3 und T10 ist der obere Gelenkfortsatz in der Koronalebene leicht nach anterior geneigt, und in Verbindung mit der Extension kommt es zu einer geringen Translation des oberen Wirbels nach posterior.
- Während der lateralen Beugung sollte der obere Wirbel relativ zum unteren Wirbel lateral flexen, und die Rotation kann segmental in ipsilaterale oder kontralaterale Richtungen gekoppelt sein. Wenn der obere Wirbel frei ist, der Orientierung der Zygapophysengelenke zu folgen, dann ist das Muster oft ipsilateral.
- Während der axialen Rotation dreht sich der obere Wirbel in die gleiche Richtung wie die axiale Rotation. Wenn der obere Wirbel frei ist, der Ausrichtung der Zygapophysengelenke zu folgen, dann ist das Muster der Kopplung mit der lateralen Flexion ipsilateral. Es gibt auch eine leichte kontralaterale Translation in der Transversalebene des superioren Wirbels relativ zum inferioren Wirbel.

Die momentanen Rotationsachsen werden u. a. durch den Brustkorb beeinflusst, der bei Flexions-/Extensionsbewegungen die Position der Rotationsachse in der Sagittalebene nach hinten verschiebt. Die momentanen Rotationsachsen des thorakalen Wirbelsäulenbewegungssegments verlaufen bei Flexion/Extension und lateraler Beugung durch den unteren Wirbel. Bei der axialen Rotation befindet sich die Rotationsachse jedoch im Wirbelkanal nahe dem hinteren Teil des Wirbelkörpers. Es ist erwähnenswert, dass die Funktionelle Wirbelsäuleneinheit im Thoraxbereich weder die vorderen Teile der Rippen noch die vorderen costochondralen/sternochondralen Gelenke oder das Sternum berücksichtigt. Daher könnte die Untersuchung der segmentalen Bewegung durch die Ringeinheit, d.h. die Brustwirbel und die jeweiligen Rippen, erfolgen.

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

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. Der Wirbelkörper ist strukturell so aufgebaut, dass er axiale Belastungen aufnehmen kann. Die Wirbelkörper sind die Haupttragstruktur der Lendenwirbelsäule und werden häufig als trommelförmig beschrieben, mit einem Querschnitt, der an die Form einer Niere erinnert. Die kranialen und kaudalen Flächen der Wirbelkörper, die so genannten knöchernen Wirbelendplatten, sind leicht konkav und dienen der Befestigung der Bandscheiben. Um die hohen Lasten, die auf die Lendenwirbel wirken, zu tragen, sind sie vergleichsweise groß, wobei ihre Größe zum Kreuzbein hin zunimmt. Während die beiden obersten Lendenwirbelkörper anterior mäßig tiefer liegen als posterior (zwischen ca. 4% bei L2 und 12% bei L1 im sagittalen Mittelteil), sind die Endplatten des L3-Wirbels nahezu parallel. Dieses Verhältnis kehrt sich bei den Wirbeln L4 und L5 um, wo die anteriore Höhe größer ist als die posteriore Höhe (zwischen ca. 7% bei L4 und 14% bei L5 am sagittalen Mittelteil). Im Gegensatz dazu sind alle lumbalen Bandscheiben (L1/L2 bis L5/S1) anterior mindestens doppelt so hoch wie posterior, so dass die Lendenlordose von ca. 60 Grad hauptsächlich von den Bandscheiben und nicht von den Wirbeln gebildet wird.

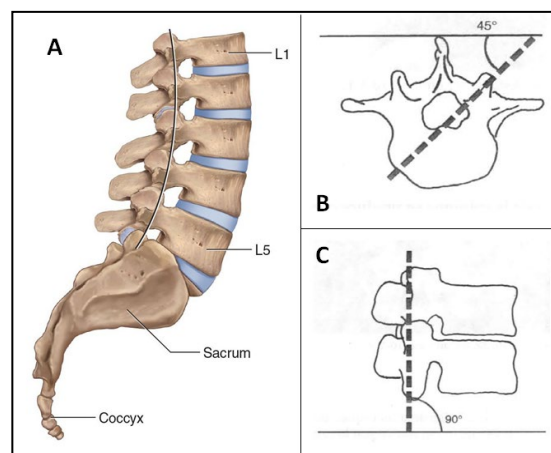


Abbildung 7 - A: Lendenwirbelsäule, Kreuzbein und Steißbein. Bild von Joseph E. Muscolino 2015. B: Ausrichtung der lumbalen Flächen in Bezug auf die Sagittalebene. C: Ausrichtung der lumbalen Flächen in Bezug auf die Transversalebene. Bild B und C aus Nordin M. 2001.

Die lumbalen Facettengelenke haben eine sagittale Ausrichtung von 90 Grad und 45 Grad in der Transversalebene. Diese Eigenschaften spielen eine wichtige Rolle in der Biomechanik der Lendenwirbelsäule, da sie die Lastverteilung zwischen der Bandscheibe und den

Facettengelenken sowie den Widerstand gegen translatorische und rotatorische Bewegungen bestimmen. Tatsächlich widerstehen die Facettengelenke etwa 16% der Druckkraft im aufrechten Stand. Andererseits ermöglicht die lumbale Facettenorientierung mehr Flexion und Extension als Rotation, die von oben nach unten an Umfang zunehmen.

Bewegungssegment der lumbalen Wirbelsäule

Während der Flexionsbewegung (Abbildung 8-A) kippt und gleitet der Wirbelkörper des oberen Wirbels der FSU leicht nach vorne, wodurch sich die Dicke der Bandscheibe in ihrem vorderen Teil verändert und im hinteren Teil vergrößert, wodurch der Nucleus pulposus nach hinten verschoben wird, so dass die hinteren Fasern des Faserrings ihren Druck erhöhen. Gleichzeitig gleitet die untere Gelenkfacette des oberen Wirbels nach oben, wodurch die Kapsel und die Bänder der hinteren Bänder - Lig. flavum, Lig. interspinatus, Lig. supraspinatus und das hintere Längsband - angespannt werden. Diese Verspannung begrenzt die Beugebewegung. Bei der entgegengesetzten Bewegung (Abbildung 8-B), also der Extension, lehnt sich der Wirbelkörper des oberen Wirbels zurück und die Bandscheibe wird an ihrer hinteren Zone dünner, wodurch der Kern der Bandscheibe nach vorne geschoben wird und die vorderen Fasern des Faserrings gespannt werden. Gleichzeitig wird das vordere Längsband gedehnt und die hinteren Bänder werden gedehnt. Außerdem passt sich bei der Extension die untere Gelenkfacette des oberen Wirbels tiefer zwischen die obere Gelenkfacette des unteren Wirbels ein, während sich die Dornfortsätze gegenseitig berühren. Auf diese Weise wird die Streckbewegung durch die knöchernen Kontakte des hinteren Bogens und durch die Spannung des vorderen Längsbandes begrenzt.

Es sollte beachtet werden, dass bei den Bewegungen der Extension und Flexion die meiste vertebrale Translation beobachtet wird, was die Messung der lumbalen Translation zu einem bestimmenden Faktor der Wirbelsäuleninstabilität macht. In der aktuellen Literatur wird davon ausgegangen, dass eine Translation von 2 mm für die Lendenwirbelsäule normal ist und eine Translation von mehr als 4 mm auf klinische Instabilität untersucht werden sollte.

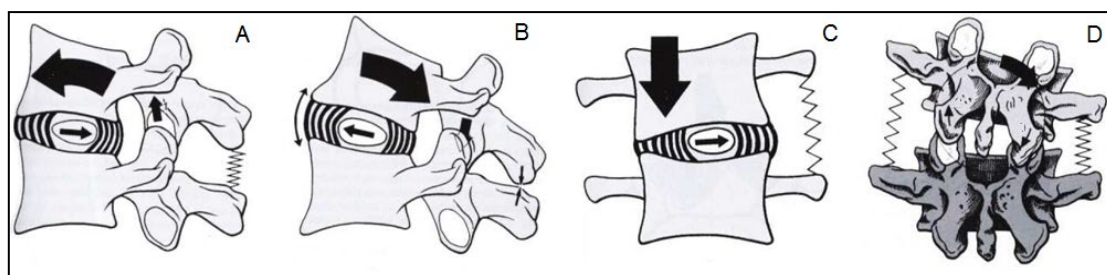


Abbildung 8 - Segmentale Bewegung der Lendenwirbelsäule. A: Flexion, B: Extension, C: anteriore Ansicht der lateralen Beugung, D: posteriore Ansicht der lateralen Beugung. Bilder aus Kapandji A.I. 1998.

Bei der lateralen Beugung kippt der obere Wirbelkörper zur Seite der Beugung, die Bandscheibe wird auf der gegenüberliegenden Seite der lateralen Beugung dicker und der Bandscheibenkern verschiebt sich leicht zu dieser Seite; gleichzeitig wird das Ligamentum

intertransversum gestrafft (Abbildung 8-C). In der Rückansicht (Abbildung 8-D) lässt sich das ungleichmäßige Gleiten der Gelenkfacetten beschreiben: Während die Gelenkfacette auf der gegenüberliegenden Seite der Verkippung ansteigt, fällt die Gelenkfacette auf der Verkippungsseite ab. Dadurch werden das Ligamentum flavum und die zygapophysäre Gelenkkapsel auf der Kippseite gedehnt, während auf der gegenüberliegenden Seite dieselben Elemente gestrafft werden.

Die einzigartigen Kopplungsmuster, die mit der Lendenwirbelsäule verbunden sind, können direkt oder indirekt zur höheren Inzidenz der klinischen Instabilität am Segment L4-L5 beitragen. Die oberen Lumbalsegmente L1-L2, L2-L3 und L3-L4 weisen ein anderes Kopplungsmuster auf als L4-L5 und L5-S1.1 In der oberen Lendenwirbelsäule erfolgen Seitenbeugung und Rotation in entgegengesetzte Richtungen, während in den unteren Lumbalsegmenten Seitenbeugung und Rotation in dieselbe Richtung erfolgen.

Das Kreuzbein und Steißbein

Das Kreuzbein besteht aus fünf Wirbelkörpern, die durch vier verknöcherte Bandscheiben miteinander verschmolzen sind. Das Kreuzbein artikuliert oben mit dem fünften Lendenwirbel, unten mit dem Steißbein und seitlich von den Ohrmuschelflächen mit den beiden Beckenknochen der Hüfte, um die Iliosakralgelenke zu bilden. Der vorstehende vordere Rand des ersten Kreuzbeinwirbels wird als Kreuzbeinpromontorium bezeichnet, die beiden Seiten sind das Kreuzbeinhöckerchen. Das Kreuzbeinpromontorium wird als Orientierungspunkt für Messungen im Beckenbereich verwendet. Die Wirbelkörper sind mit einer großen Zwischenwirbelscheibe verbunden, und die Zygapophysengelenke (Abbildung 9-A) haben einen größeren Abstand als oben. Das Gelenk wird nach hinten durch das interossäre und das dorsale Ligamentum sacro-iliacum verstärkt. Das Ligamentum iliolumbarum hat seinen Ursprung am Querfortsatz von L5 und setzt am Beckenkamm an. Es hat einen ventralen und einen dorsalen Anteil. Dieses Band ist wichtig für die Bewegungseinschränkung an den lumbosakralen und den Iliosakralgelenken. Das Kreuzbein ist gegenüber dem letzten oder 5. Lendenwirbel tief nach vorne gewinkelt, wobei der Winkel mit der Horizontalebene im Durchschnitt fast 30 Grad beträgt.

Das Steißbein ist ein kleiner dreieckiger Knochen am unteren Ende der Wirbelsäule, der aus drei bis fünf (meist vier) miteinander verschmolzenen rudimentären Wirbeln besteht. Das untere Ende des Kreuzbeins artikuliert als Faserknorpelgelenk oder ist oft mit dem Steißbein verwachsen (Abbildung 9-B). Der erste Steißbeinwirbel hat kurze Querfortsätze, die sich mit dem Kreuzbein verbinden, und zwei Steißbeinhörner, die sich mit den Kreuzbeinhörnern verbinden (Abbildung 9-C). Den Coccygealwirbeln fehlen Pedikel und Dornfortsätze, aber die ersten drei haben einen primitiven Körper und Querfortsätze. Der zweite, dritte und vierte Steißbeinwirbel werden nach und nach kleiner und der letzte Wirbel ist nur noch ein kleiner Knubbel. Das Kreuzbein-Steißbein-Gelenk wird durch die vorderen und hinteren (oberflächlichen und tiefen), seitlichen Kreuzbeinbänder, die Zwischenhornbänder und die Bandscheibe zusammengehalten.

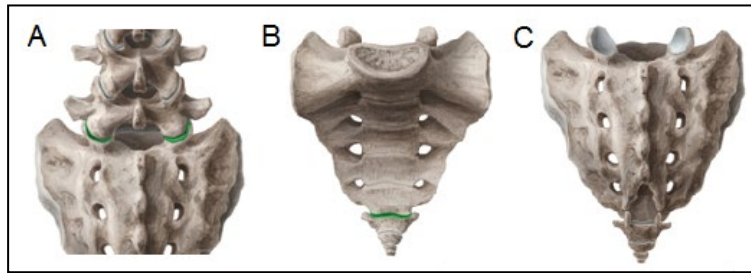


Abbildung 9 - Das lumbosakrale und sacrococcygeale Gelenk. A: zygapophyseale Gelenke von der lumbosakralen Vereinigung. B: Anteriore Ansicht des Sakrococcygealgelenks. C: Posteriore Ansicht des Sakrococcygealgelenks. Bilder von der KenHub-Website.

5. Welche Belastung erfährt die Wirbelsäule in den verschiedenen Ruhepositionen?

In diesem Abschnitt werden wir die in der Literatur untersuchten biomechanischen Veränderungen betrachten, wenn die Wirbelsäule in verschiedenen Ruhepositionen gehalten wird.



Stehende Position

- Das Gewicht des Körpers wird beim Stehen über das Kreuzbein und das Darmbein auf den Oberschenkel übertragen.
- Beim entspannten Stehen variierte der Druck zwischen 0,48 und 0,5 MPa. Beim Bauchpressen stieg er auf 0,92 MPa und beim Vorwärtsbeugen auf 1,1 MPa an.



Sitzende Position

- Das Gewicht des Körpers wird im Sitzen über das Kreuzbein und das Darmbein auf die Sitzbeinhöcker übertragen.
- Das Sitzen auf einem Stuhl mit normalem, geradem Rücken erzeugte einen Druck von 0,45 bis 0,5 MPa.
- Die Lendenwirbelstütze hat den größten Einfluss auf die Lendenlordose und die Neigung der Rückenlehne hatte den größten Einfluss auf die Reduzierung des Drucks innerhalb der lumbalen Bandscheibe (0,27 MPa).
- Mit zunehmender Neigung der Lendenwirbelstütze wird mehr Gewicht auf die Rückenlehne verteilt und es wird weniger Muskelaktivierung von den erector spinae Muskeln der Wirbelsäule gefordert.
- Die Verwendung einer Armlehne zur Unterstützung des Rumpfes kann die Belastung der Bandscheiben beim Sitzen weiter verringern.



Rückenlage oder liegende Position

- Beim Liegen in Rückenlage mit leicht gebeugten Beinen wurde ein intradikaler Druck in Höhe L4-L5 von 0,08 MPa festgestellt. Bei vollständig gestreckten Beinen veränderte sich der Druck auf 1,11 MPa. Die Drehung in die Seitenlage erhöhte den Druck nur geringfügig auf 0,12 MPa.
- Husten und Niesen in Rückenlage erzeugten Drücke von bis zu 0,38 MPa, aber herzhaftes Lachen erhöhte den Druck nur bis zu 0,15 MPa.

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

In diesem Abschnitt werden wir die in der Literatur untersuchten biomechanischen Veränderungen betrachten, wenn die Wirbelsäule in verschiedenen funktionellen motorischen Gesten gehalten wird.



Zum Heben und Tragen eines Objekts

- Die intradiskalen Drücke erhöhen sich, wenn schwere Gewichte gehoben werden, aber die richtigen Hebetekniken reduzieren die Bandscheibenbelastung. Ein vorstehender Bauch wirkt wie ein weiter vom Körper weg getragenes Gewicht.
- Der intradiskale Druck stieg beim Vorwärtsbeugen um 50%. Mit Gewichten in den Händen stieg der Druck weiter um 70% bis 220% an. Studien haben gezeigt, dass der lumbale intradiskale Druck beim Heben eines Gewichts von 19,8 kg mit rundem Rücken und geraden Knien auf 2,3 MPa ansteigt. Beim Heben desselben Gewichts mit geradem Rücken und Beugung in der Hüfte und im Knie sank der Spitzendruck auf 1,7 MPa.
- Bei einer normalen Bandscheibe werden die ringförmigen Fasern durch den erhöhten intradiskalen Druck durch die Vorwärtsbeugung des Rumpfes angespannt. Die Ausrichtung der ringförmigen Fasern in einer normalen Bandscheibe ist 60 Grad von der Vertikalen entfernt, im Vergleich zu einer degenerativen Bandscheibe, deren ringförmige Fasern eher horizontal verlaufen.
- Die Lendenwirbelsäule erlangt beim Heben Stabilität und Gleichgewicht, da bei der Vorwärtsbeugung der Wirbelsäule die begleitende Kontraktion des Kreuzbeins die Spannung in der thorako-lumbalen Faszie erhöht.
- Die Vorwärtsflexion der Lendenwirbelsäule löst auch eine Kontraktion des Beckenbodens und des Musculus transversus abdominis aus, was biomechanisch die thorako-lumbale Faszie strafft. Diese kombinierte Wirkung auf das hintere Bandsystem wirkt wie eine Anti-Scherkraft auf die Lendenwirbelsäule.
- Wenn die Musculi erector spinae bei gebeugter Lendenwirbelsäule kontrahiert werden, führt dies zu einer erhöhten Kompression auf die Zygapophysengelenke. Dies würde die Lastübertragung durch die Kortikalis der Neuralbögen erleichtern, die Kompression auf die Lendenwirbel vermindern und damit dem intradiskalen Druck entgegenwirken.



Gangart

- Eine intradiskale Belastungserhöhung zwischen L3-L4 tritt zwischen dem 0,2- bis 2,5-fachen in Bezug auf den intradiskalen Druck in Ruhe auf.
- Die maximale Last wird während des Starts erreicht.
- Es gibt einen linearen Anstieg der intradiskalen Belastung in Bezug auf die Gehgeschwindigkeit.

7. Wichtige Ideen

- 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.
- 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. Um die hohen Lasten, die auf die Lendenwirbel wirken, zu tragen, sind diese vergleichsweise groß, wobei ihre Größe zum Kreuzbein hin zunimmt.
- 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 einer sitzenden Position ist der Druck ähnlich wie in einer 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.

8. Referenzen

- [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.
- [11]. Lee, DG. Biomechanics of the thorax – reseach 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. Kjelby-Wendt, G. Hallerman, KL. Danielsson, A. Thoracic mobility and ist 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.
- [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.