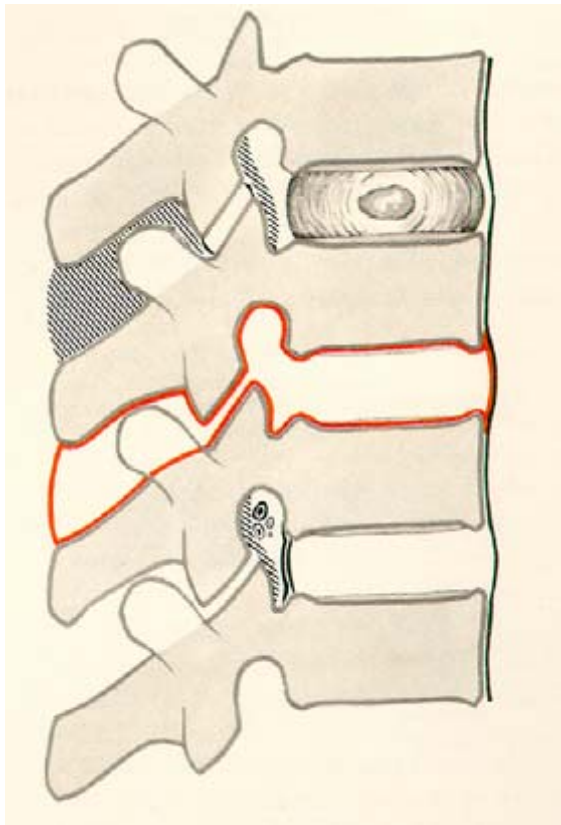


2 Material und Eigenschaften

Gegenstand der Untersuchung ist der physiologische Bewegungsumfang und -ablauf der axialen Torsion mit allen assoziierten Komplementärrotationen am lumbalen Bewegungssegment.

2.1 Material

2.1.1 Das lumbale Bewegungssegment

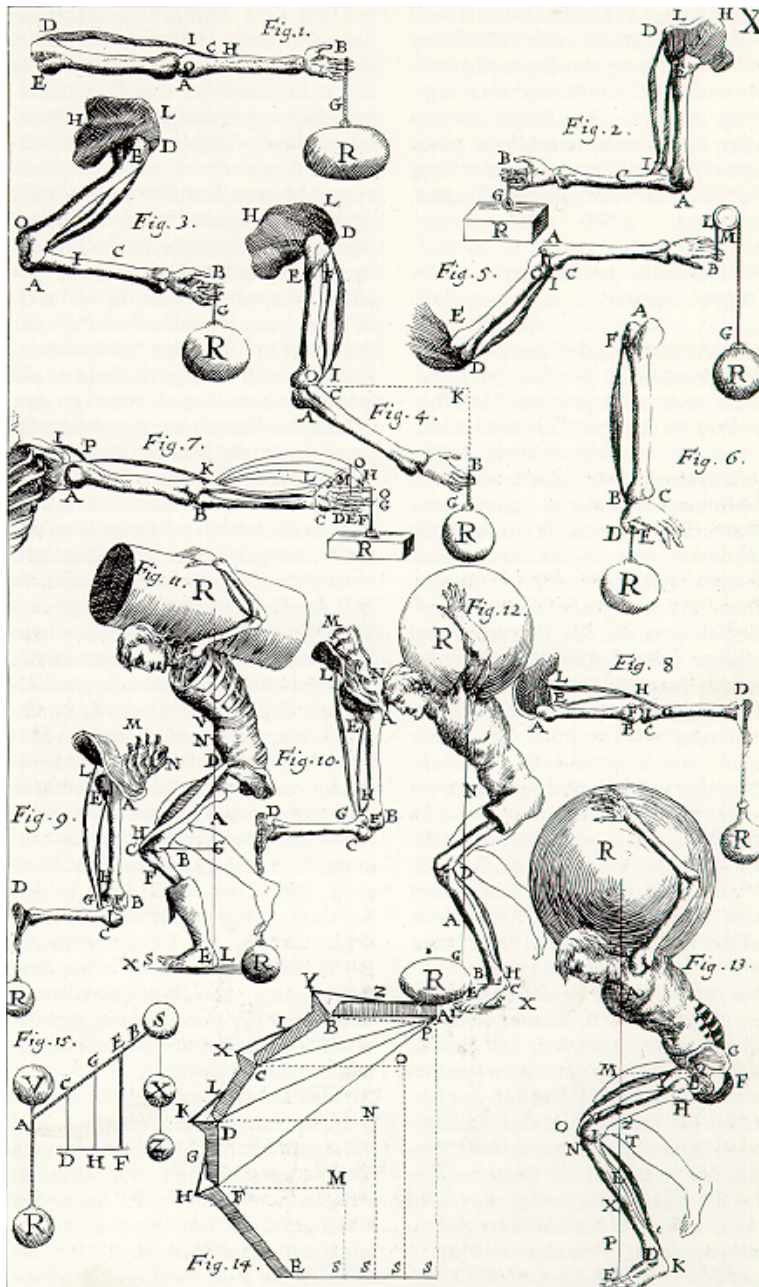


Die kleinste Wirbelsäuleneinheit, deren biomechanische Eigenschaften denen der gesamten Wirbelsäule ähneln ist das Junghans'sche Bewegungssegment (BS). Im angelsächsischen „functional spinal unit (FSU)“ genannt stellt es – dem unmittelbaren Wortsinn entsprechend – die funktionelle Grundeinheit kinematischer Untersuchungen dar. Es umfasst zwei aneinandergrenzende Wirbelkörper und deren Verbindungsstrukturen.

*Abb.7:Junghans'sches Bewegungssegment
[Abb.Verz.Nr.7]*

Als Untersuchungsmaterial dienten 28 lumbale Bewegungssegmente, die im Rahmen klinischer Autopsien bei 20- bis 60-jährigen Patienten ohne Wirbelsäulenerkrankung in ihrer Vorgeschichte entnommen wurden. Die Segmente wurden unter Erhalt der wesentlichen Bandstrukturen sowie der Gelenkkapseln präpariert und sofort nach Entnahme bis zur Verwendung tiefgefroren.

2.2 Eigenschaften



Im Rahmen des durch die Newton'sche Mechanik ausgelösten Paradigmenwechsels wurde im 17. Jahrhundert erst-mals die Übertragung von mechanischen Konzepten auf Lebewesen vorgenommen. Wesentlich geht diese Syntheseleistung auf den Mathematiker Alfonso Borelli (1608-1679) zurück, der von Marcello Malpighi in das Studium der Anatomie eingeführt wurde. Sein aus der Zeit der vor-newton'schen Physik stammendes Konzept der Element-Mechanik als strukturbildendes Prinzip lebender Körper ist in der Biomechanik bis zur Gegenwart dominant.

Abb. 8: Konzept der Element-Mechanik als strukturbildendes Prinzip lebender Körper [Abb.Verz.Nr.8]

Die Wirbelsäule unterscheidet sich in ihren mechanischen Eigenschaften wesentlich von anderen gelenkig verbundenen skeletalen Strukturen des Körpers. Sie enthält mit der Bandscheibe ein Bauelement dessen mechanisches Verhalten sich nicht in Einklang bringen lässt mit dem traditionellen jatro-mechanischen Grundkonzept der Integration aus kinematischen Ketten.

In der Biologie des 20. Jahrhunderts zeigte sich in der Diskussion um Formbildung und Bewegung zunächst, dass die Form komplizierter Organismen aus diesem mechanischen Grundansatz heraus nicht befriedigend erklärt werden konnte.

Molekularbiologisch wurde bereits sehr früh die ausschließliche Bindung von Stoffwechselmechanismen an wässrige Lösungen erkannt. Die Urform der körperlichen Abgrenzung eines Lebewesens entsteht durch die Umhüllung einer wässrigen Lösung mit einer (flexiblen) Membran. Es gibt keine Form von Leben, die von dieser in den evolutionstheoretischen Schriften von W.F. Gutman als "hydraulisches Gebilde" bezeichneten Grundorganisationsform abweicht [22,23].

"Hydraulische Gebilde" haben eine starke Tendenz, eine sphärische Gestalt einzunehmen. Beständige oder vorübergehende Formveränderungen (= Bewegung) in der belebten Natur erfolgen durch die „Verformung“ dieser Gebilde. Dazu sind mechanisch wirksame Strukturen – „formerzwingende Einrichtungen“- notwendig. Sie sind bei Bakterien, Pflanzen oder komplexeren Tieren ausnahmslos nachweisbar in Form von äußeren Bandagen, inneren Verspannungen oder skeletalen Versteifungen [22,23].

Abb. 9a: Die Entstehung der lebenden Grundorganisation. [Abb.Verz.Nr.9]

A

Perturbation der Ursuppe mit Entstehung der Vesikel als membranös abgeschlossenen flüssigkeitsgefüllte Systeme.

B

Die Blasen bilden eine interne Proteinstruktur, die die Wand verstärkt und Formkontrolle durch innere Verspannung erlaubt.

C

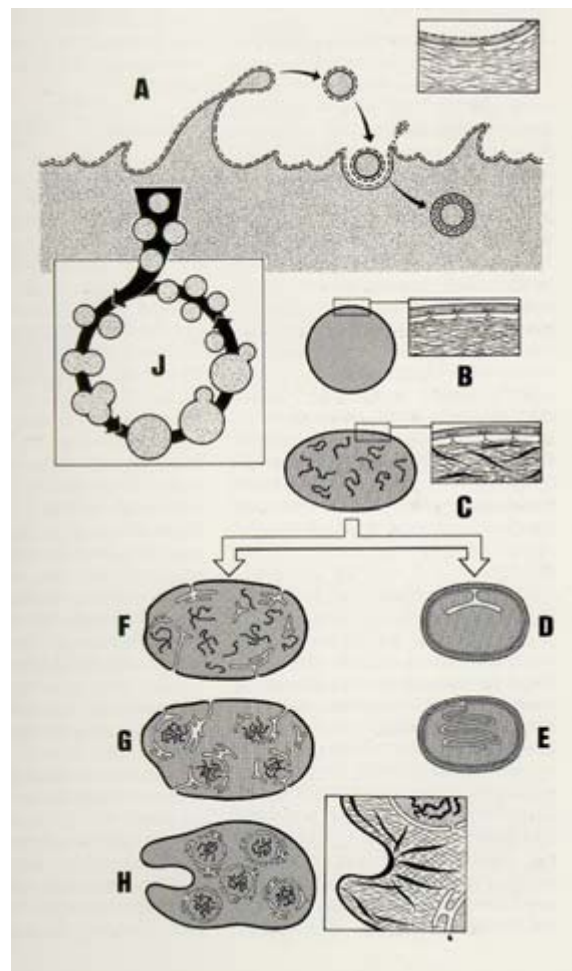
Durch Einbeziehen von Myosin in das ältere Aktinraster wird Beweglichkeit erreicht.

D-E

Früh spalten sich die Bakterien (Procaryonten) ab, die die Beweglichkeit aufgeben und eine äußere stabilisierende und formbestimmende Hülle bilden.

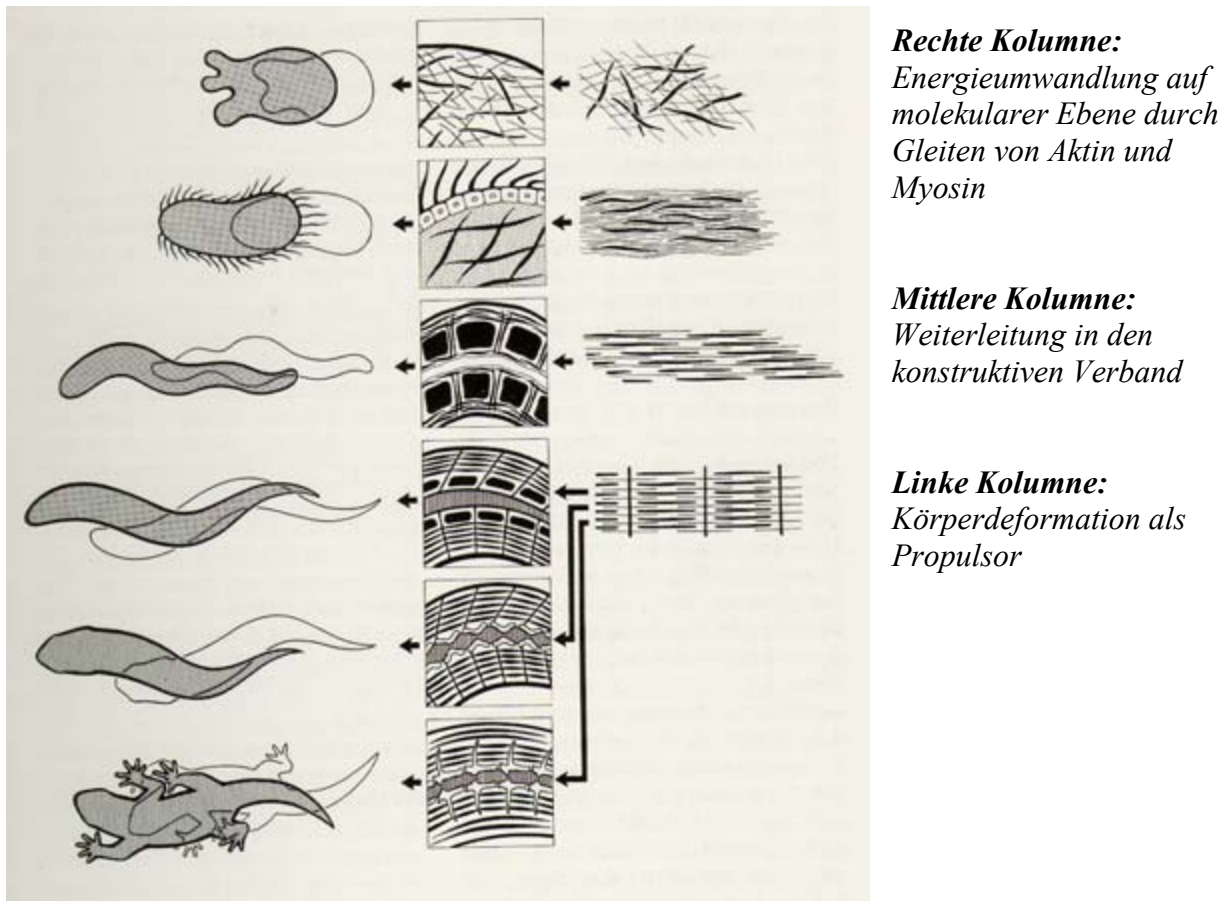
F-G-H

Die Eukaryonten, die zu den komplexeren Organismen überleiten, entwickeln die Beweglichkeit weiter und schließen das Erbgut in abgegrenzte Kernhüllen ein. Beginn der Automobilität komplexer Tierkonstruktionen



Nicht nur Bewegung, sondern auch Form an sich ist also Ergebnis von Aktivität und damit dem Wesen nach nicht statisch sondern dynamisch bzw. mechanisch im Sinne der energieverbrauchenden aktiven Formerhaltung. Dieses Grundprinzip gilt auch für die Entstehung skeletaler Strukturen selbst, die sich in der Embryologie über eine weichkörperige Vorbildung und – im Falle geschlossener Gefüge wie z. B. des menschlichen Schädels – über eine „hydraulische“ Füllung formen.

Abb. 10: Automobilität komplexer Tierkonstruktionen [Abb.Verz.Nr.10]



In der Wirbelsäule sind „formerzwingende Einrichtungen“, also skeletale Elemente (Wirbelkörper mit paariger Gelenkverbindung) und ihre Verspannungen (Bänder) kombiniert mit hydraulischen Gebilden (Bandscheiben). Diese einzigartige Verbindung prägt die grundsätzlich von anderen skeletalen Strukturen abweichenden kinematischen Eigenschaften der Wirbelsäule [61].

2.2.1 Viskoelastizität und Nonlinearität

Alle biologischen Materialien sind in unterschiedlicher Ausprägung viskoelastisch, d.h., ihre mechanischen Eigenschaften sind zeitabhängig [61]. Sie zeigen

- Sensitivität für die Geschwindigkeit einer Krafteinwirkung,
- Hysteresis (Energieverlust durch Wiederholung der Krafteinwirkung),
- Creep (Deformation abhängig von der Dauer einer permanenten Krafteinwirkung)
- Relaxierung (zeitabhängige Abnahme der zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Deformierung notwendigen Kraft)

Die mechanische Reaktion der Wirbelsäule ändert sich also mit Geschwindigkeit, Häufigkeit, Stärke und Dauer derselben Krafteinwirkung in nichtlinearer Abhängigkeit. Es lassen sich zwei Phasen unterscheiden: Bei Einwirkung kleiner Kräfte verformt sich die Wirbelsäule nahe der Neutralposition ohne wesentlichen Widerstand (Neurale Zone). Mit zunehmender Kraft nimmt der Widerstand exponentiell zu. Bei Einwirkung großer Kräfte bis zum physiologischen Limit ist die Verformbarkeit entsprechend gering (Elastische Zone). Die Summe aus neutraler und elastischer Zone definiert den gesamten Bewegungsspielraum

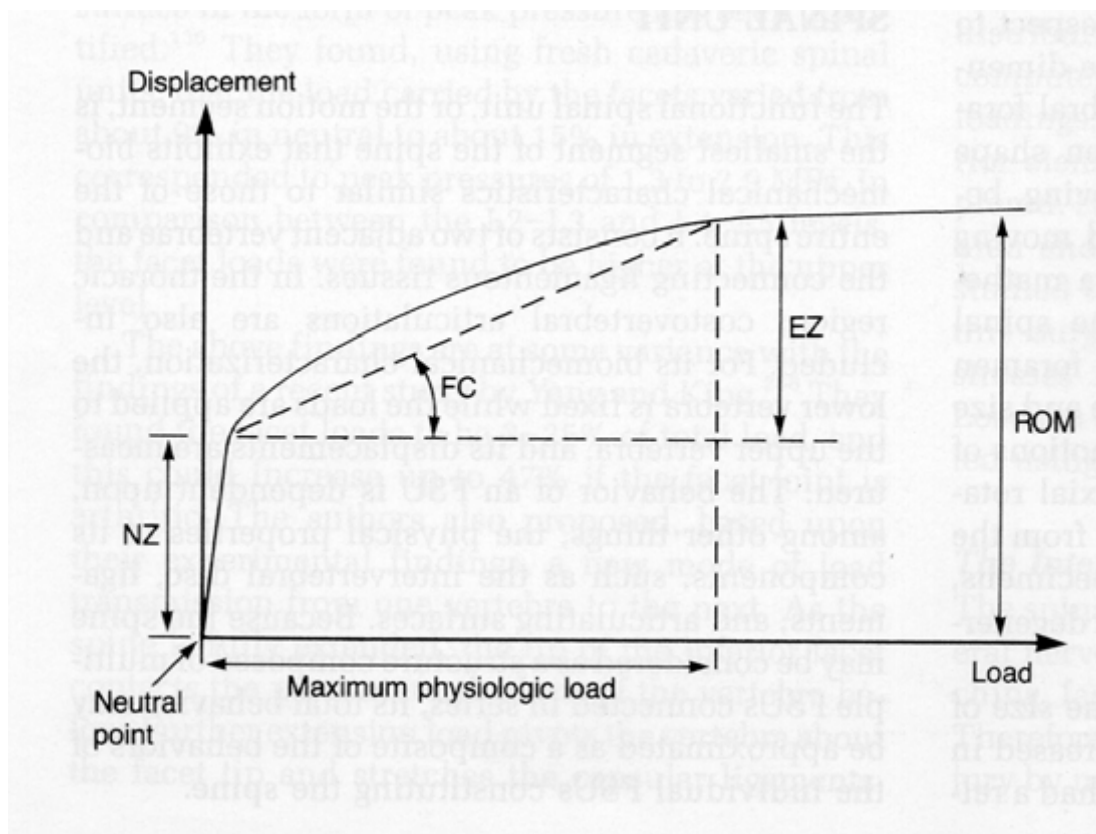


Abb. 11: Zweiphasisches, nichtlineares Verhalten der Wirbelsäule [Abb.Verz.Nr.11]

NZ (Neutral Zone) = Verformung bei niedriger Belastung, EZ (Elastic Zone) = Verformung vom Ende der neutralen Zone bis zur maximalen physiologische Belastung, ROM (Range of Motion) = Summe von NZ und EZ, FZ (flexibility coefficient) = EZ/max. physiolog. Belastung

Validität und Reproduzierbarkeit experimenteller Untersuchungsergebnisse hängen wesentlich von der Berücksichtigung der viskoelastischen Eigenschaften des Specimen in der Gestaltung des Versuchsablaufes ab. Für eine physiologische Reaktion auf die adäquate Einleitung von Kräften müssen die

- Hysteresis durch die mehrmalige Wiederholung der Krafteinleitung (preconditioning), die
- Sensitivität für die Geschwindigkeit der Krafteinwirkung durch die stufenweise Erhöhung der einwirkenden Kraft und
- Creep und adäquate Relaxierung durch die zeitlich begrenzte Belastung sowie Ruhephasen zwischen den Versuchscyclen berücksichtigt werden.

2.2.2 Geometrie und Funktion der Facettengelenke

Von Form und Ausrichtung der Wirbelgelenke wird ein wesentlicher Einfluß auf das biomechanische Verhalten des jeweiligen Wirbelsäulenabschnittes erwartet. Entsprechend der zunehmend vertikalen Ausrichtung der Ebene der Gelenkflächen und ihrer zunehmenden Inklination in der Transversalebene nimmt der Radius der sagittalen Beweglichkeit (Flexion/Extension) cranio-caudal zu und der Radius der transversalen Beweglichkeit (axiale Rotation) ab.

Abb. 12: Orientierung der Facettengelenke [Abb.Verz.Nr.12]

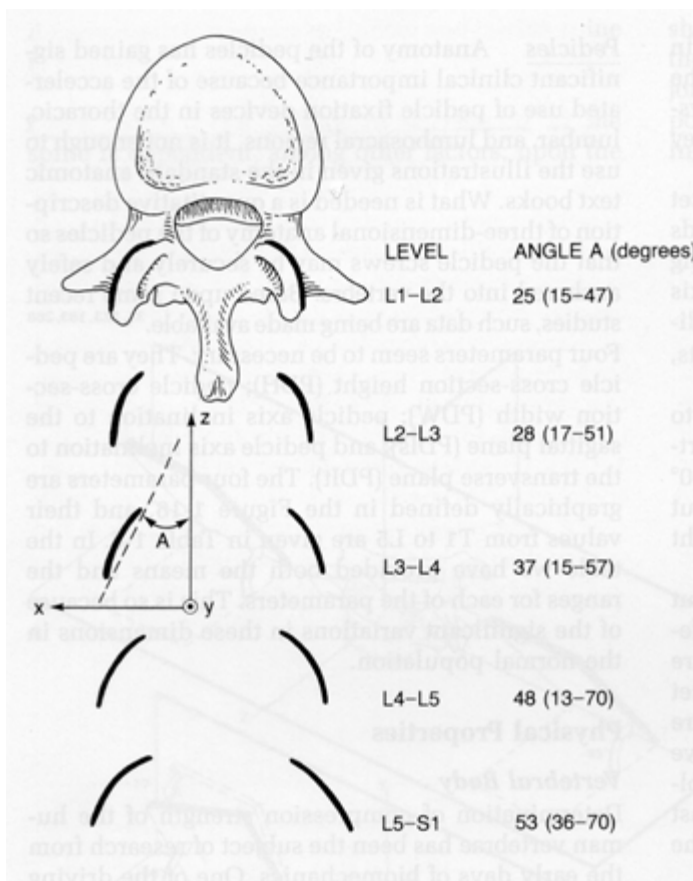
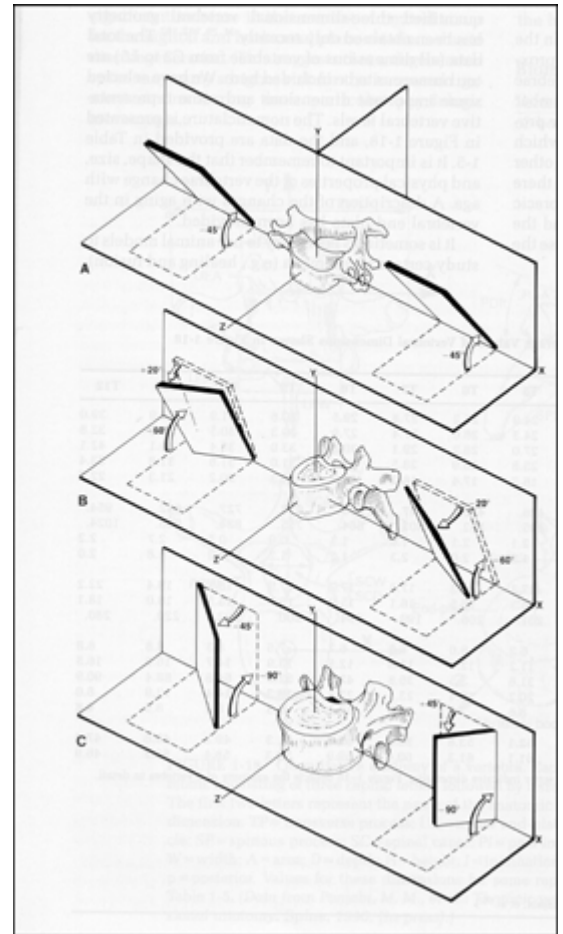


Abb. 13: Inklination der lumbalen Facettengelenke [Abb.Verz.Nr.13]

Auch innerhalb der Lendenwirbelsäule nimmt die Inklination der Gelenkfacetten in cranio-caudaler Richtung bei variabler individueller Ausformung lumbaler Facettengelenke (Siehe 5.3.3) durchschnittlich zu.

2.2.3 Kinematische Eigenschaften

Schon 1905 wurde von Lovett für die Torsion des lumbalen Bewegungssegmentes auf Grund der anatomischen Gegebenheiten die konsistente Assoziation einer Rotation um eine weitere Achse gefordert [31]. Diese Bewegungskoppelung ist mittlerweile experimentell verschiedentlich bestätigt und an der Lendenwirbelsäule besonders für die reziproke Kombination der axialen Rotation mit der Lateralflexion beschrieben [46].

Bisherige in vitro Analysen des Bewegungs- bzw. Kopplungsverhaltens der Wirbelsäule ohne Muskulatur ergaben jedoch trotz relativ genauer Angaben bezüglich der Hauptbewegungsrichtungen auffallend widersprüchliche Ergebnisse bezüglich der Bewegungskoppelung [57,59]. Sowohl Richtung als auch Größe der bei axialer Rotation induzierten Lateralflexion wurden unterschiedlich angegeben [42,46], als maßgebliche Einflußgrößen wurden Geometrie und Stellung der Facettengelenke postuliert:

- Abweichungen in Form und Ausrichtung der Gelenkflächen könnten Unterschiede im Kopplungsverhaltens – etwa bezüglich der Richtung der Lateralflexion – bewirken.
- Die Ausgangshaltung in sagittaler Ebene kann eine Änderung des Kopplungsverhaltens insofern bewirken, als bei axialer Rotation (Horizontalebene) in anfänglicher Extensionsstellung neben der begleitenden Lateralflexion (Frontalebene) auch eine Ventralflexion (Sagittalebene) beobachtet wird. Analog tritt in anfänglicher Flexionsstellung eine begleitende Extension auf. Die Wirbelsäule zeigt also die Tendenz sich bei Einleitung eines axialen Drehmomentes aus der sagittalen Abweichung wieder in die Neutralstellung aufzurichten.

In anderen experimentellen Vorarbeiten wurde der Einfluß der individuellen Geometrie der Facettengelenke auf die Bewegungsführung bestritten bzw. lediglich eine laterale ungerichtete Funktion als lateraler „Stop“ diskutiert [2].

Dem ungeklärten konkreten Bewegungsmuster kommt möglicherweise besondere klinische Bedeutung zu. E. Weitz [60] und M. Percy [45] postulieren einen Zusammenhang zwischen (abnormem) Bewegungsmuster und Rückenschmerzen.

Die pauschal determinierende Rolle der Wirbelgelenke für den Bewegungsspielraum des Segmentes wurde durch Rotationsmessungen nach Facetektomie experimentell belegt:

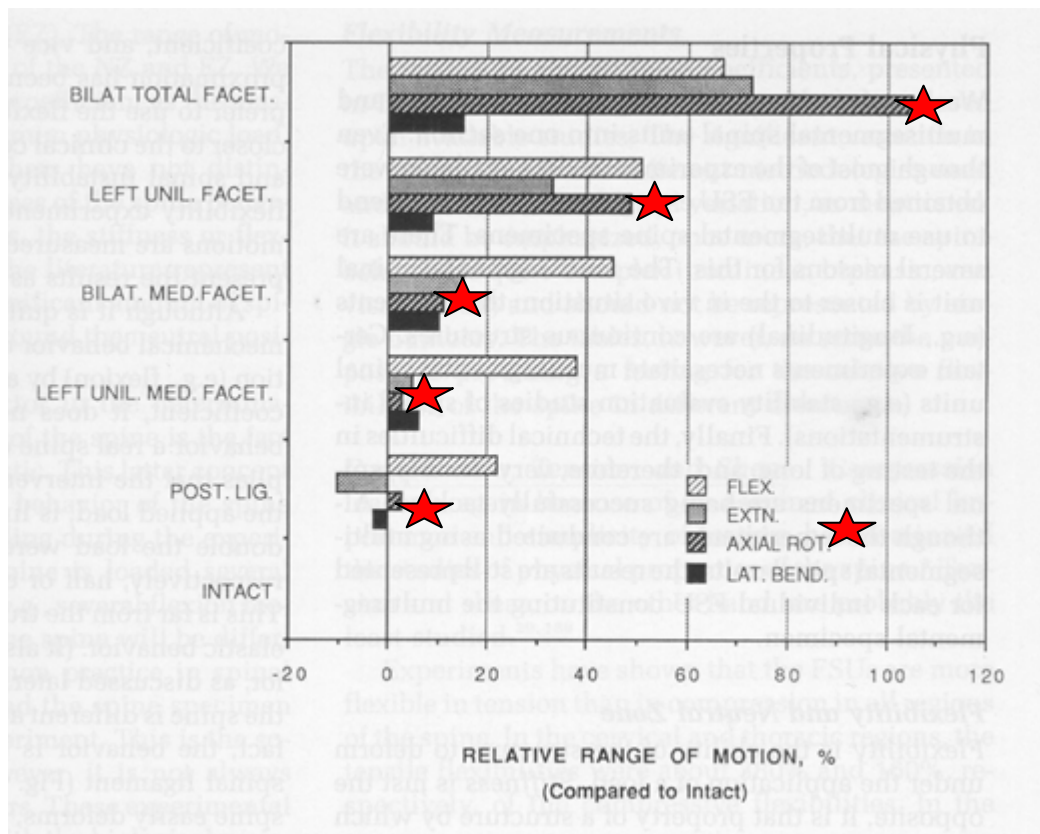


Abb. 14: Änderung des relativen Bewegungsumfanges nach Facetektomie oder Durchtrennung des Ligamentum posterior [Abb.Verz.Nr.14]

Der Einfluss der Geometrie der Facettengelenke auf die konkrete individuelle Bewegungsführung der axialen Torsion wird im Zusammenhang mit Bewegungskoppelungen (siehe unten) widersprüchlich diskutiert und ist wesentlicher Gegenstand dieser Untersuchung.