

5 Ergebnisse

5.1 Testreihe 1

Testreihe 1 diente einer ersten Trendanalyse der Rotationsantwort auf die Einleitung eines axialen Drehmomentes. Sie wurde an 6 lumbalen Bewegungssegmenten (L1/2, L2/3, L3/4, L3/4, L4/5, L5/S1) durchgeführt. Ein Schnittbildverfahren kam in dieser Testreihe nur zum Ausschluß ergebnisrelevanter pathologischer Veränderungen zum Einsatz.

5.1.1 Rotationswinkel

Die Rotationswinkel in der Horizontalebene nahmen mit zunehmenden Moment annähernd linear zu, bleiben aber unter $\pm 1^\circ$ (siehe alle folgenden Graphiken). Höhere Vorlasten resultierten in kleineren axialen Rotationen.

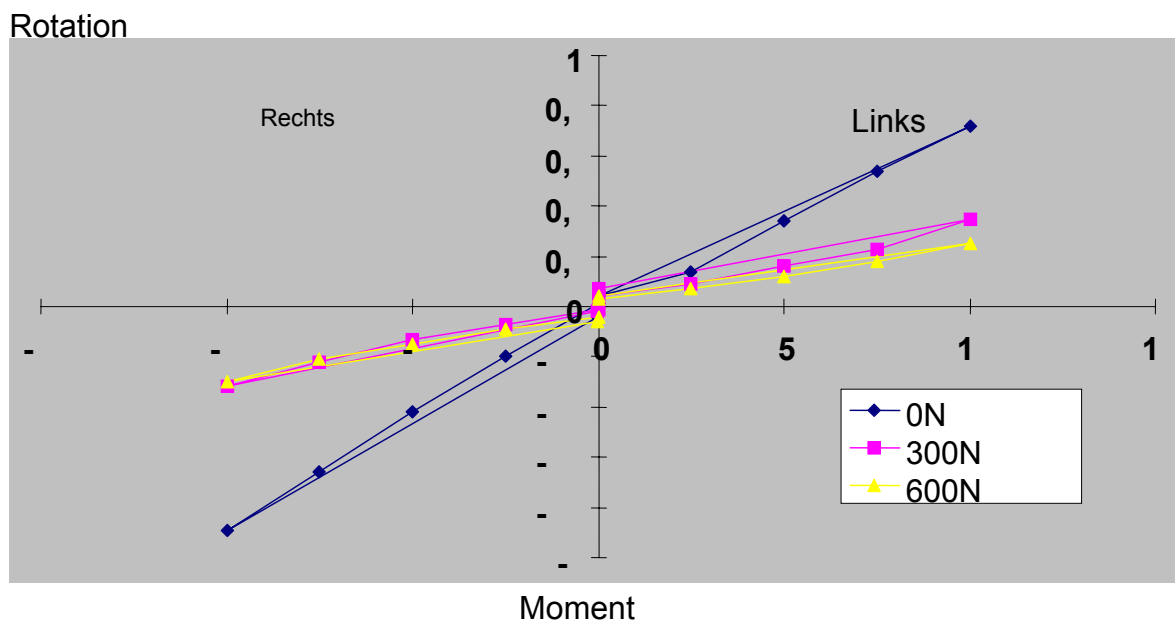


Abb. 21: Rotationswinkel in Abhängigkeit von Drehmoment und Vorlast [Abb.Verz.Nr.21]

Die Rotationswinkel waren in Neutralstellung am größten und nahmen in der Reihenfolge Flexion - Extension ab.

Rotation

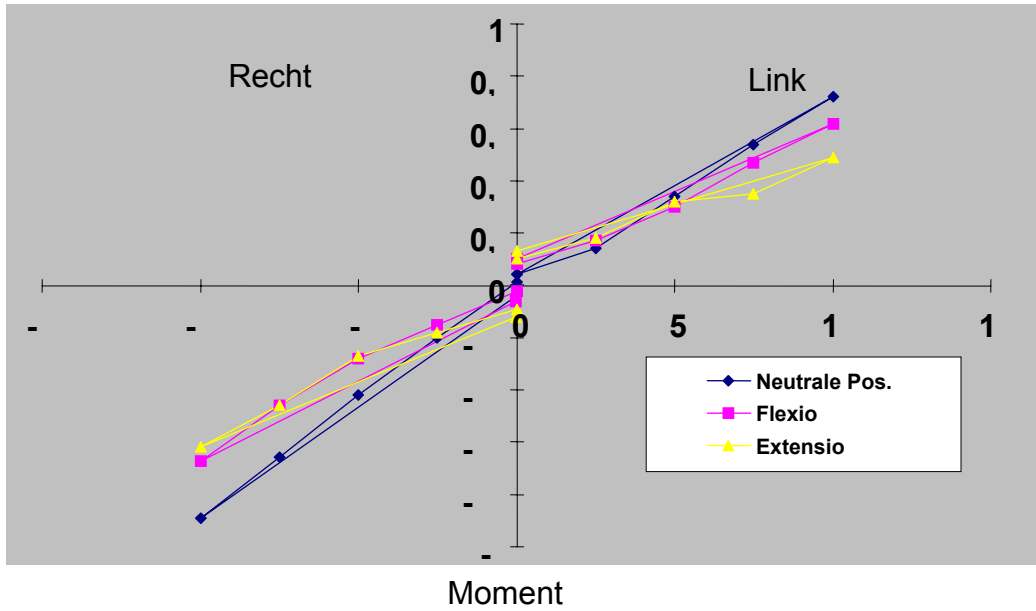


Abb. 22: Rotationswinkel in Abhängigkeit von Drehmoment und Ausgangsposition
[Abb. Verz. Nr. 22]

5.1.2 Rotationszentren

Die Rotationszentren für alle Belastungsvariationen gruppierten sich bei 2 Versuchszyklen in der Ebene der kranialen Deckplatte des kaudalen Wirbelkörpers weitgestreut mit erkennbarer Verdichtung in der dorsalen Hälfte des Bewegungssegmentes. Viele Rotationszentren waren weit außerhalb des Bewegungssegmentes lokalisiert.

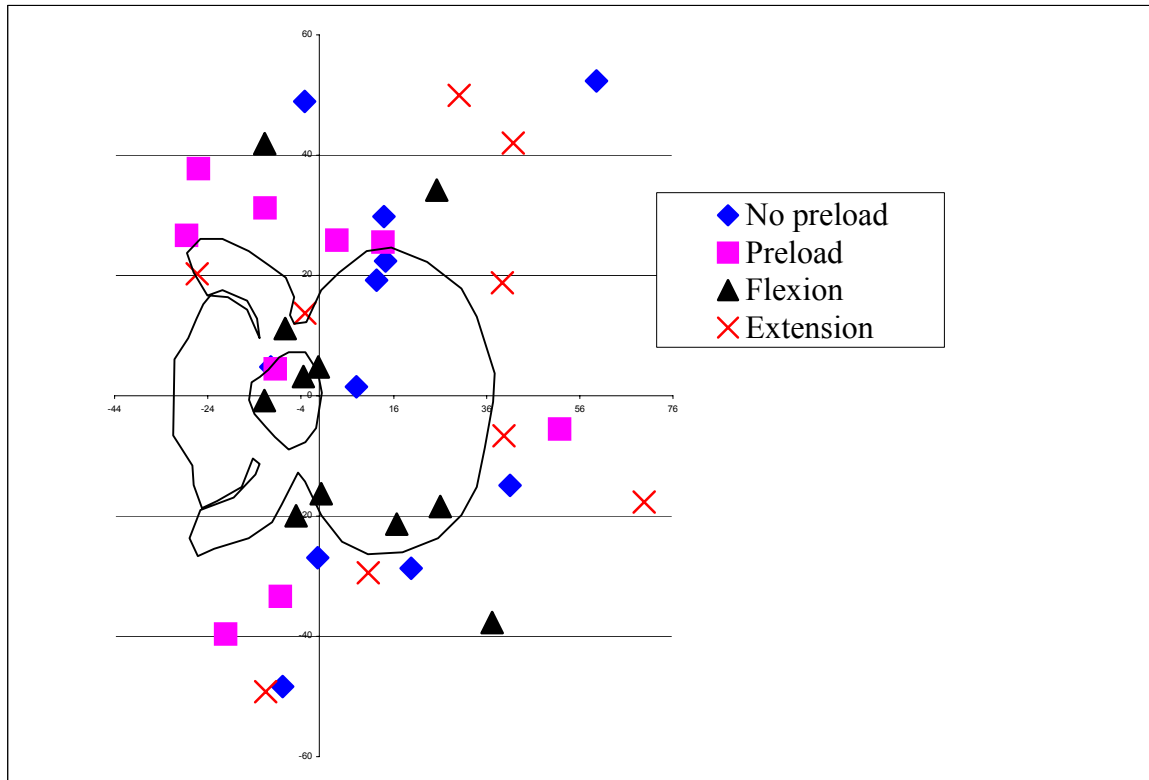


Abb. 23: Rotationszentren als Funktion von Vorlastapplikation und Veränderungen der Ausgangssituation [Abb.Verz.Nr.23]

Die Gruppierung der Rotationszentren zeigt bei erheblicher Streuung keine Korrelation zu Rotationsrichtung und Ausgangsposition.

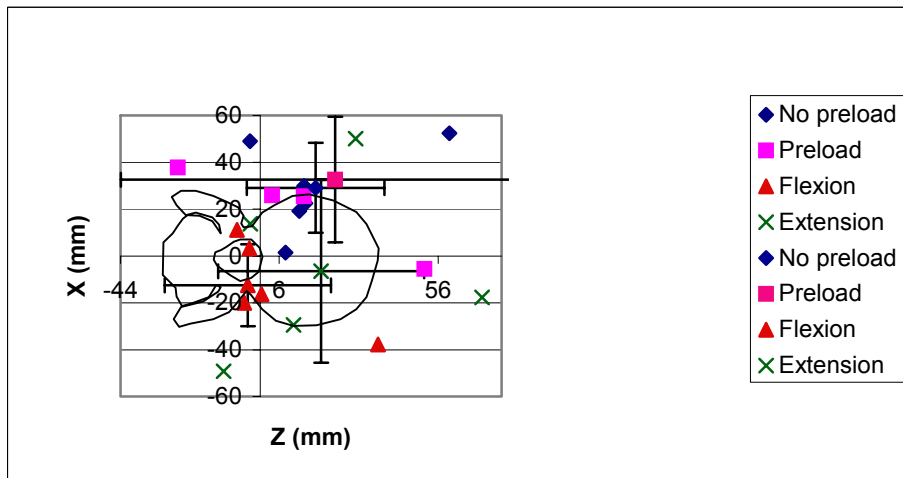


Abb. 24a: Individuelle und gemittelte Rotationszentren bei negativer Rotation (Z, X Schnittpunkte und gemittelte Schnittpunkte der helikalen Rotationsachse) [Abb.Verz.Nr.24]

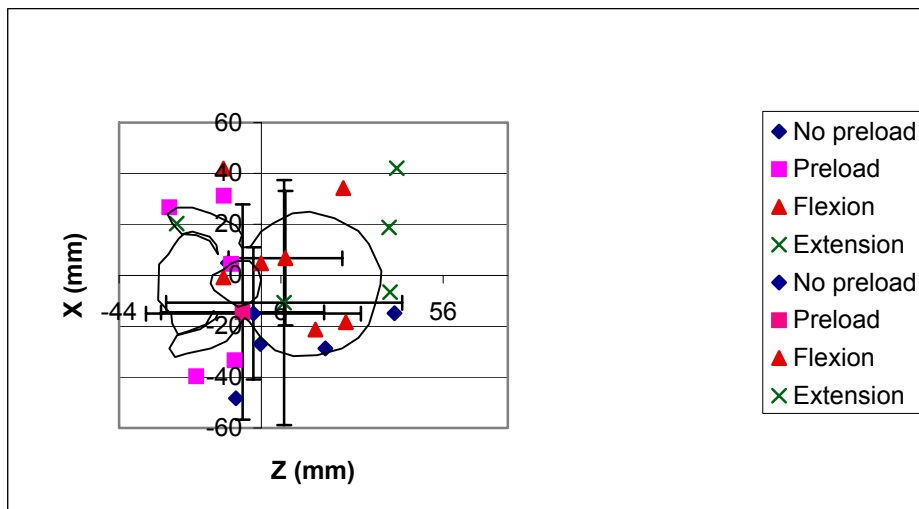


Abb. 24b: Individuelle und gemittelte Rotationszentren bei positiver Rotation (Z, X Schnittpunkte und gemittelte Schnittpunkte der helikalen Rotationsachse) [Abb.Verz.Nr.24]

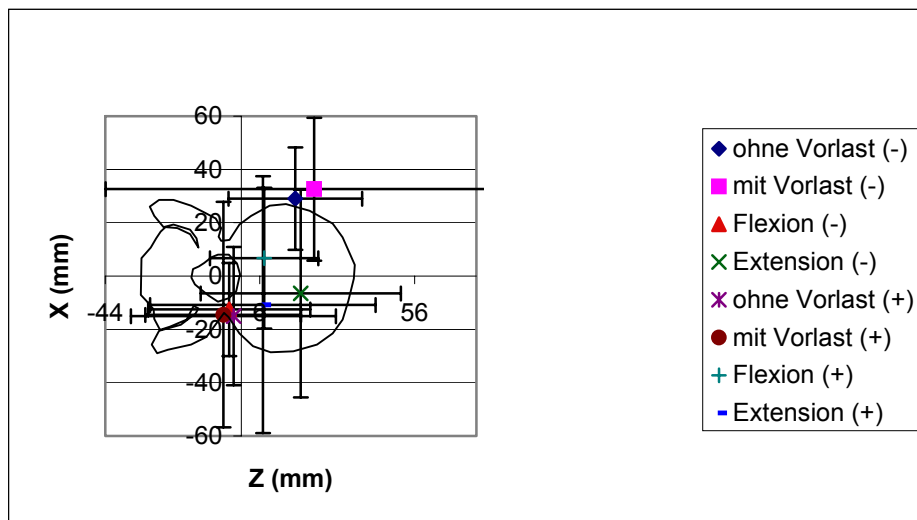


Abb. 24c: Gemittelte Rotationszentren für beide Rotationsrichtungen (Schnittpunkte der helikalen Rotationsachse (HAM)) [Abb.Verz.Nr.24]

5.1.3 Rotationsachsen

In der überwiegenden Zahl der abgebildeten Belastungsvariationen verliefen die helikalen Rotationsachsen nicht parallel zur Vertikalachse des Segmentes. Damit war eine assoziierte Rotation in mindestens einer weiteren Ebene des Raumes belegt.

Veränderungen von Vorlast und Ausgangsposition bewirkten deutliche, nicht korrelierende Abweichungen der Rotationsachsen. Ein Bezug zu individuellen anatomischen Gegebenheiten war in dieser Versuchsreihe nicht möglich. Bezüglich einer graphischen Darstellung einzelner Rotationsachsen sei auf die analog durchgeführte Testreihe 2 (5.3.) verwiesen.

5.2 Pilotversuch/Testreihe 2

Es wurden 2 lumbale Bewegungssegmente (L1/2 L2/3) getestet.

Drehmoment:

Aufgrund der kleinen Rotationswinkel in Testreihe 1 wurde eine Drehmomenterhöhung von 10 auf 12,5 Nm getestet. Es ergab sich auch bei hochfrequenter Versuchswiederholung bei beiden Specimen kein Hinweis auf eine mechanische Schädigung.

Wiederholungsfrequenz der Testzyklen:

Die gemessenen Rotationswinkel, -zentren und -achsen zeigten erhebliche Diskrepanzen zwischen dem 1. und 2. Zyklus. Jenseits des 2. bis zum 7. Wiederholungszyklus blieben die Ergebnisse zufriedenstellend reproduzierbar. Deshalb wurde für die folgende Testreihe ein Minimum von 2 Messwiederholungen festgelegt.

Mit einer Kraftmesszelle konnte ein kontinuierliches Drehmoment von 3 und 6 Nm in der Sagittalebene für Flexion und Extension erfolgreich überwacht werden.

Ein optimiertes Versuchsprotokoll für Testreihe 2 wurde erstellt.

5.3 Testreihe 2

5.3.1 Rotationswinkel

Durch die Erhöhung des Drehmomentes (12,5 Nm gegenüber 10 Nm) konnte ein deutlich höherer Rotationswinkel von c.a. 3° erzielt werden (Testreihe 1: <1°). Grundsätzlich verringerte sich der Rotationswinkel unter Vorlastanwendung. Extension mit Vorlast bewirkte eine statistisch signifikante Reduktion der Rotation um 11% bei 3 Nm ($p=0.002$) und 18% bei 6 Nm ($p=0.0002$)

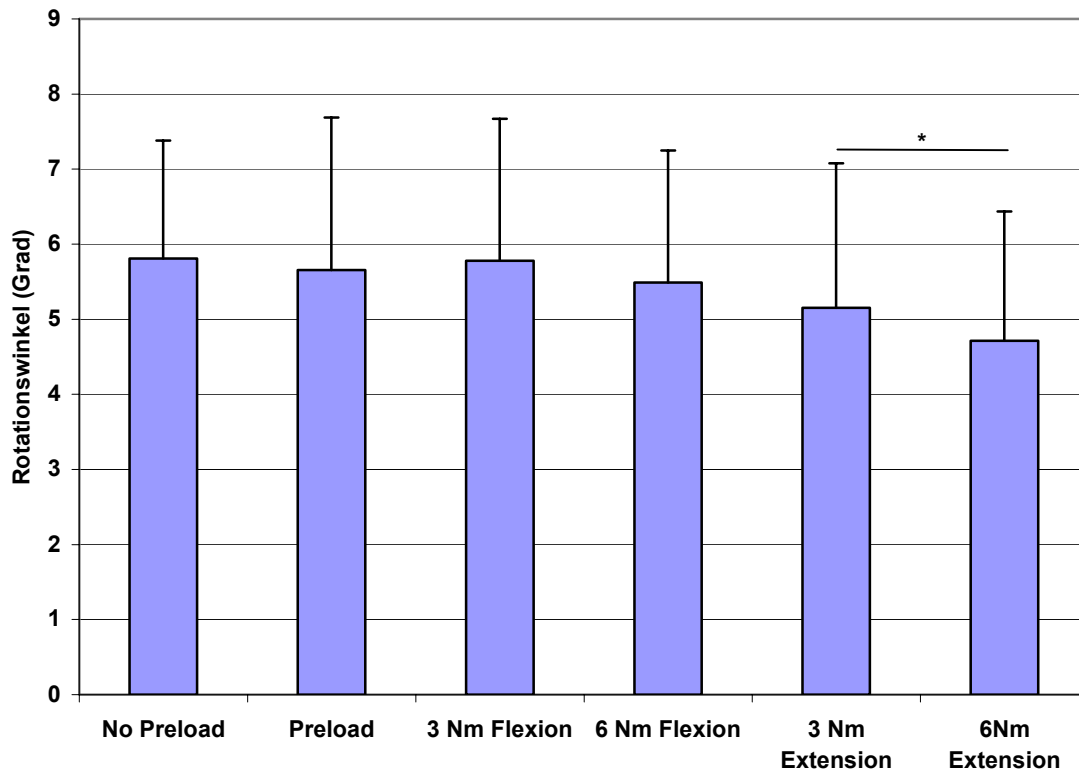


Abb. 25: Rotationswinkel in Abhängigkeit von Vorlast und Ausgangsposition. Durchschnittliche Torsion aller Specimen nach Anwendung eine axialen Drehmomentes von 12.5 Nm. * markiert statistisch signifikante Differenzen ($P<0.05$) [Abb.Verz.Nr.25]

5.3.2 Rotationszentren

Die Rotationszentren für alle Belastungskonstellationen gruppierten sich für die Zyklen 2 und 3 mit wesentlich geringerer Streuung im Vergleich zu Testreihe 1 in Projektion auf das dorsale Drittel des Wirbelkörpers.

Die Anwendung von Vorlast ließ lediglich einen leichten Trend zur Zentralisierung der Rotationszentren erkennen. Die Veränderung der Ausgangsposition in Flexion und Extension ergab eine konsistente aber nicht signifikante Abweichung der Rotationszentren nach dorsal (ANOVA $P < 0.06$). Die Änderung der Rotationsrichtung bewirkte eine signifikante (ANOVA $P < 0.004$) Verlagerung der Rotationszentren nach kontralateral.

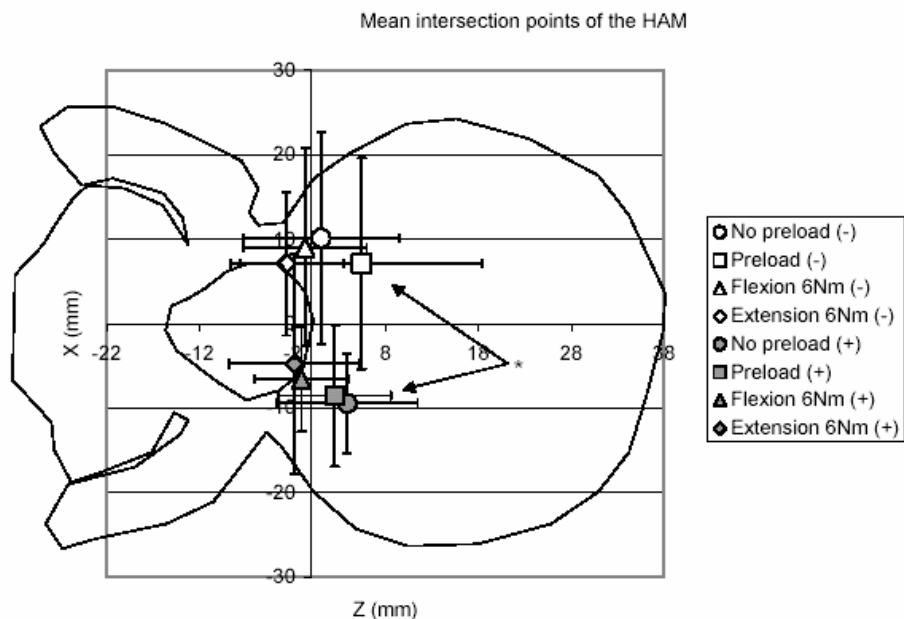


Abb. 26: Gemittelter Durchtrittspunkt der helikalen Rotationsachse in Höhe der kranialen Deckplatte des kaudalen Wirbelkörpers.

(+) zeigt eine Linksrotation und (-) eine Rechtsrotation an

* zeigt die signifikant verschiedenen Rotationszentren der linksgerichteten im Vergleich zur rechtsgerichteten Rotation ($P < 0.006$) [Abb.Verz.Nr.26]

5.3.3 Ergebnisse der Animation

In einer kernspintomographischen Vorstudie wurde die Variationsbreite der Gelenkflächenausformung an sechzehn Bewegungssegmenten frischer Leichenpräparate in axialen 1 mm Schichten untersucht. Die Bewegungssegmente sind nicht identisch mit den Testsegmenten und dienen lediglich dazu, einen Eindruck von der Variabilität der Ausformung der Gelenkflächen zu gewinnen. Es ergaben sich erwartungsgemäß unterschiedliche Formvarianten mit auffällig asymmetrischer Ausformung paariger Gelenke in sechs Fällen, nahezu planen Gelenkflächen in fünf Fällen und besonders sagittal ausgerichteten Gelenkspalten in weiteren fünf Fällen:

Specimen	Symmetrie der beids. Gelenk konfiguration		Konturbeschreibung				Winkel zur Frontalebene		
	asymm	symm	plan	leicht gekrümmt	Stark gekrümmt	gewinkelt	<30°	30<60°	60<90°
1		+			+			+	
2	+		+			+	+		+
3		+		+				+	
4	+			+		+	+		+
5	+		+	+			+	+	
6	+					+			+
7		+	+					+	
8		+	+					+	
9		+		+				+	
10		+			+				+
11	+			+	+				+
12	+			+	+			+	+
13		+		+			+		
24		+	+					+	
25		+	+					+	
16		+		+				+	
Summe	6	10	6	8	4	3	4	10	6

Abb. 27: Geometrie der Facettengelenke im axialen Schnitt [Abb.Verz.Nr.27]

Vor Versuchsbeginn wurden von 6 frischen randomisiert gewählten Specimen 1 mm CT-Schnittbilder angefertigt und eine 3-D-Rekonstruktion der Segmente errechnet. Die Gelenkkontur in mittlerer Schichtebene ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Es ergaben sich erwartungsgemäß deutliche Unterschiede im horizontalen Konturverlauf der Gelenkflächen mit inter- und intrasegmental differierenden Krümmungsradien, Knickbildungen und unterschiedlichem Winkel zur Horizontalebene.



Abb. 28a: CT Schnitt/Specimen1(L4/5):

Geringe Krümmung der Gelenkflächen, frontale Stellung der Gelenkflächen [Abb.Verz.Nr.28]



Abb. 28b: CT Schnitt/Specimen2 (L3/4):

Geringe Krümmung, frontale Ausrichtung der Gelenkflächen mit fast rechtwinklig scharfem Knick der dorsalen Enden nach sagittal, die oberen Gelenkflächen umspannen[Abb. Verz.Nr.28].



Abb. 28c: CT Schnitt/Specimen 3 (L4/5):

Annähernd plane Gelenkflächen, frontale Ausrichtung[Abb.Verz.Nr.28]

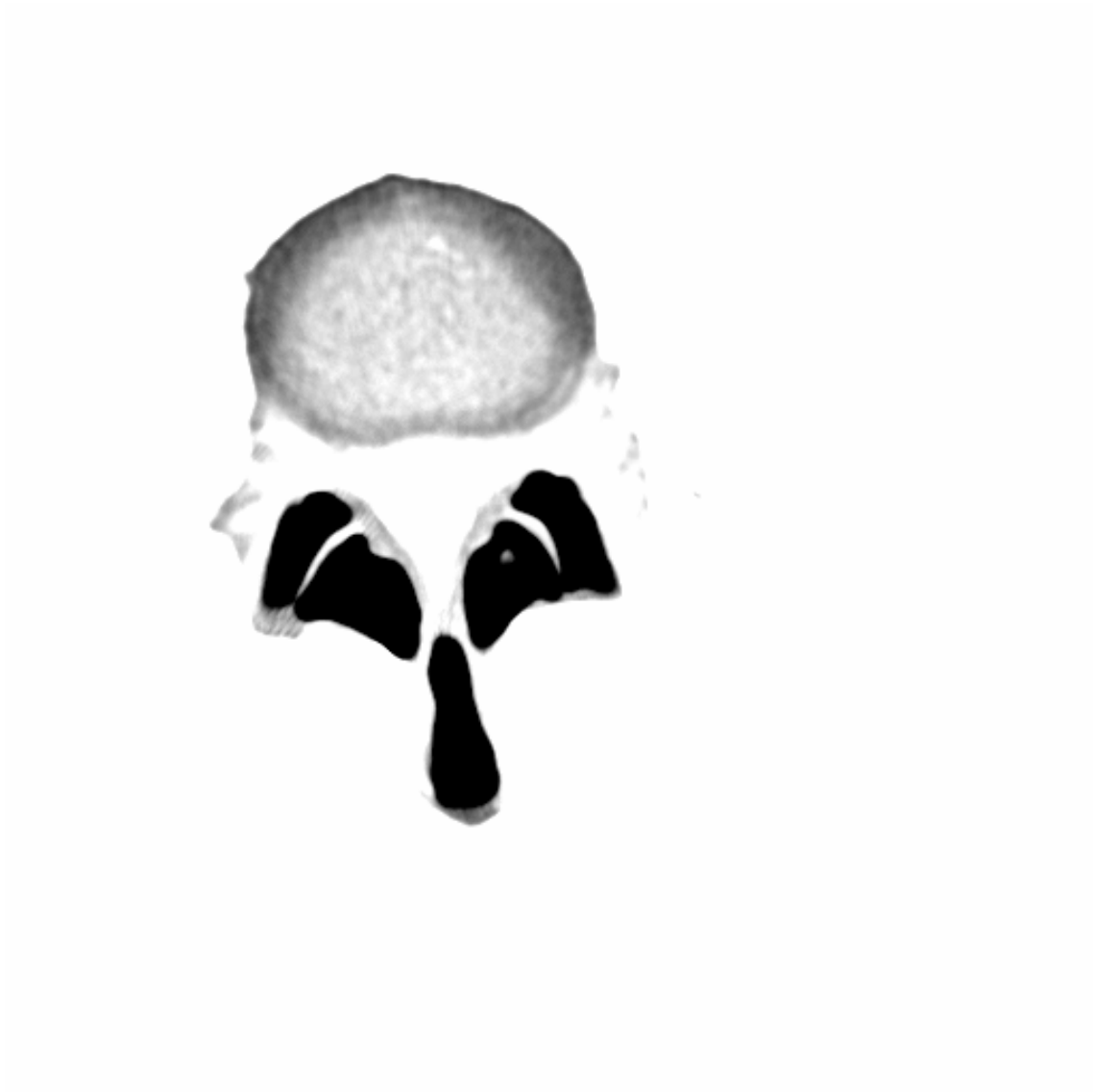


Abb. 28d: CT Schnitt/Specimen 4 (L3/4):

leichte Krümmung der Gelenkflächen, sagittale Ausrichtung[Abb.Verz.Nr.28]

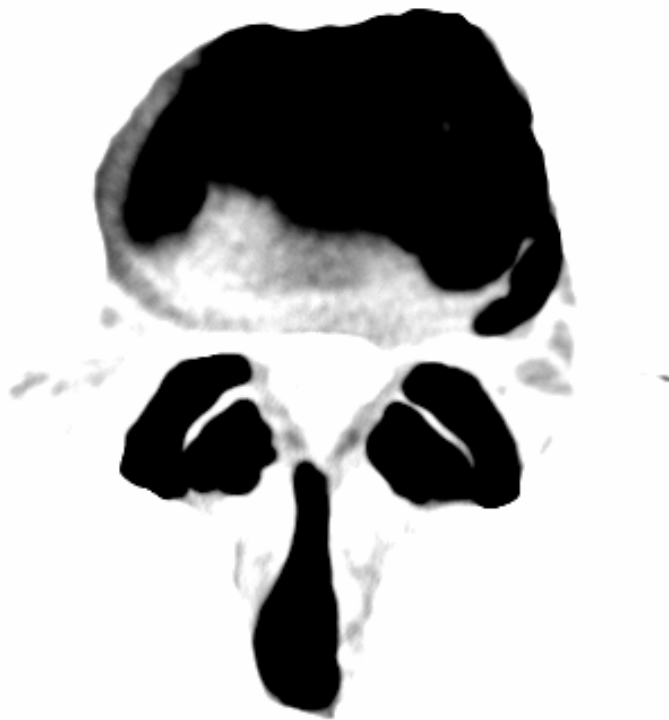


Abb. 28e: CT Schnitt/Specimen 5 (L4/5):

*Plane Gelenkflächen mit leichtem dorsalen Knick nach sagittal, sagittale Ausrichtung
[Abb.Verz.Nr.28]*



Abb. 28f: CT Schnitt/Specimen 6 (L3/4):

leichte Krümmung der Gelenkflächen, sagittale Ausrichtung [Abb.Verz.Nr.28]

Ein komplettes Set von Animationen ist für 6 repräsentative Specimen im World Wide Web bei <http://cranium.unibe.ch> hinterlegt. Die Animationen dieser sechs randomisiert ausgewählten Specimen wurden im Hinblick auf individuelle Bewegungscharakteristika untersucht. Obwohl die Rotationen in der Regel klein waren konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Für alle Tests konnte unabhängig von der jeweiligen Vorlast oder Ausgangsposition im initialen Rotationsabschnitt vor dem Kontakt der Wirbelgelenkflächen eine Drehung um eine Achse durch die Bandscheibe annähernd parallel zur vertikalen Segmentachse und damit zugleich parallel und nahe der mittleren Sagittalebene beobachtet werden. Dabei kam es zu einer Annäherung der kontralateralen, in Neutralstellung in der Regel nicht in Kontakt befindlichen Facettengelenkflächen (Abb.29a).
- Bei Kontakt der Gelenkflächen (linke Flächen bei Rechtsrotation und umgekehrt) kam es zu einer Kranialverschiebung der kaudalen Gelenkfläche des kranialen Wirbels. Über die als Hypomochleon wirkende kraniale Gelenkfläche des kaudalen Wirbels setzte nun eine reaktive Flexion des frei beweglichen kranialen Wirbels oder, bei abgleitenden Gelenkflächen, auch eine Lateralflexion des oberen Wirbels ein.
- Gleichzeitig wanderte die helikale Rotationsachse (HAM) nach lateral in Richtung der kontaktierenden Gelenkflächen und änderte ihren Winkel in der Frontalebene.
- Nach dem Gelenkkontakt war die Ausrichtung der HAM hochvariabel sowohl bezüglich des Winkels als auch der Position in der Ebene der kranialen Deckplatte des kaudalen Wirbelkörpers (Abb. 29b).
- Visuell schien der Kontakt der Gelenkflächen die axiale Rotation zu blockieren.

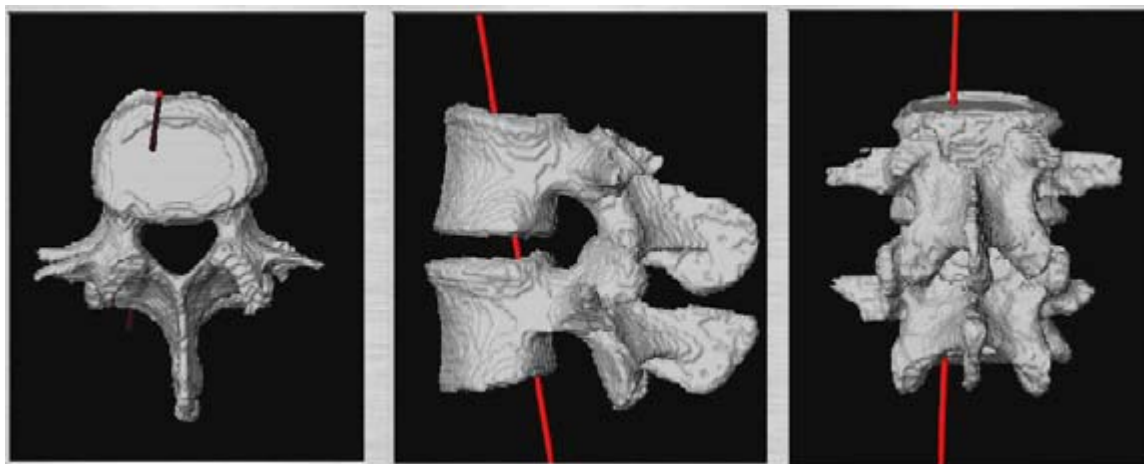


Abb. 29a: Helikale Rotationsachse (HAM) während der Rotationsphase vor Gelenkkontakt in Aufsicht, lateraler und dorsaler Ansicht [Abb.Verz.Nr.29]

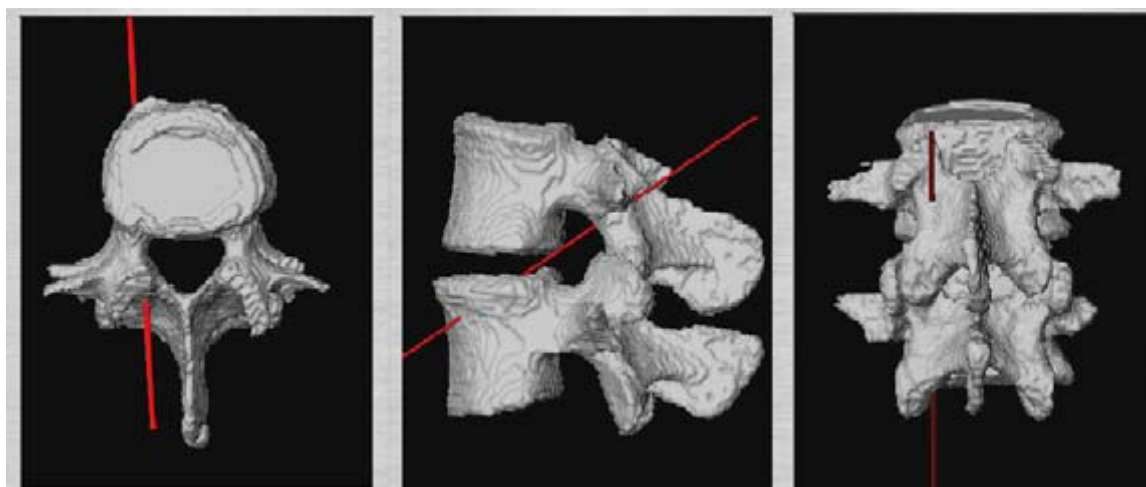


Abb. 29b: HAM während Rotation nach rechts und nach Kontakt der linken Gelenkfacetten Gelenkkontakt in Aufsicht, lateraler und dorsaler Ansicht [Abb.Verz.Nr.29]

5.4 Hypothesenbezogene Ergebnisse

5.4.1 Hypothese 1 Vorlast und Ausgangsposition

Die Anwendung einer Vorlast beeinflusst wesentlich das biomechanische Verhalten eines Bewegungssegmentes. Relevante Einflussgrößen sind dabei nicht nur die absolute Größe sondern auch Richtung der Wirkungsachse des induzierten Kraftvektors etwa bei kontrolliert herbeigeführte Flexion oder Extension.

Rotationswinkel:

Vorlastapplikation und Ausgangsposition bewirkten eine zunehmende Verringerung des Rotationswinkels in der Reihenfolge Vorlast/3N Flexion, Vorlast/Neutralposition, Vorlast/6N Flexion, Vorlast/3N Extension und Vorlast/6N Extension.

Rotationszentren:

Vorlast, Flexion und Extension führten zu einer nicht signifikanten Zentrierung bzw. Dorsalverlagerung der Rotationszentren.

Rotationsachsen:

Der Einfluß der zusätzlichen Kraftvektoren auf die Position der Rotationsachsen wurde über die Verlagerung der Rotationszentren belegt. Gesetzmäßigkeiten in Bezug auf die konkrete Richtungsänderung ließen sich aus den bisherigen Tests allerdings nicht ableiten.

Die Hypothese ist somit zu bestätigen.

5.4.2 Hypothese 2 – Rotationszentren

Die Rotationszentren der axialen Rotation in der Horizontalebene des Koordinatensystems sind durch das Prinzip der dimeren Gelenkkoppelung zu beschreiben. Insbesondere in Extension sind sie deshalb auf einer Rastpolkurve zu erwarten, deren Zenit dorsal des Wirbelkanales liegt.

Die der Hypothese zugrundeliegenden Untersuchungsergebnisse sind in Kapitel 3.2 dargestellt. Eine vergleichende Analyse der Rotationsverläufe der hier getesteten Bewegungssegmente ergab abweichende Ergebnisse mit weitaus ventraler angeordneten momentanen Rotationszentren.

Insbesondere eine auf beidseitigem Kraftschluß basierende Rastpolkurve mit dorsalem Zenit ließ sich auch in Extensionsstellung nicht feststellen. In virtuellen Untersuchungssequenzen ließ sich zeigen, daß permanenter Kraftschluß der Facettengelenkflächen in keiner Ausgangskonstellation für den gesamten Verlauf der Rotationsantwort zu erwarten ist.

Die Hypothese ist deshalb nicht zu bestätigen.

5.4.3 Hypothese 3 – Rotationsachsen

Aus anatomischen Gründen bewirkt die Einleitung eines axialen Drehmomentes eine Kombinationsbewegung, bestehend aus axialer Torsion und einer assoziierten Rotation in zumindest einer weiteren Ebene des Raumes (coupled motion).

Die helikale Rotationsachse wird deshalb nicht parallel zur Vertikalachse des Segmentes verlaufen.

Die Existenz einer Bewegungskoppelung ließ sich unmittelbar anhand der durchschnittlich von der Vertikalen abweichenden Position der Rotationsachsen nachweisen.

Die Hypothese ist damit zu bestätigen