

Normale und Pathologische Anatomie  
Band 43  
Normal and Pathological Anatomy  
Volume 43

---

Editors: Wilhelm Doerr · Helmut Leonhardt



Georg Thieme Verlag Stuttgart · New York

# Funktionelle Anatomie der Wirbelgelenke

---

Von Reinhard Putz

Geleitwort von W. Platzer

90 Abbildungen



1981

Georg Thieme Verlag Stuttgart · New York

## **Anschriften**

Prof. Dr. med. Dres. h.c. WILHELM DOERR  
Direktor des Pathologischen Instituts der Universität Heidelberg  
Im Neuenheimer Feld 220/221, 6900 Heidelberg

Prof. Dr. med. HELMUT LEONHARDT  
Direktor des Anatomischen Institutes der Universität Kiel  
Olshausenstr. 40–60, 2300 Kiel

Univ.-Doz. Dr. med. REINHARD PUTZ  
Institut für Anatomie der Universität Innsbruck  
Müllerstr. 59, A-6010 Innsbruck

## **CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek**

### **Putz, Reinhard:**

Funktionelle Anatomie der Wirbelgelenke / von  
Reinhard Putz. Geleitw. von W. Platzer. –  
Stuttgart ; New York : Thieme, 1981.

(Normale und pathologische Anatomie ; Bd. 43)

NE: GT

Geschützte Warennamen (Warenzeichen) werden *nicht* besonders kenntlich gemacht. Aus dem Fehlen eines solchen Hinweises kann also nicht geschlossen werden, daß es sich um einen freien Warennamen handelt.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Photokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 1981 Georg Thieme Verlag, Herdweg 62, Postfach 732, D-7000 Stuttgart 1 – Printed in Germany --  
Druck: Grammlich, Pliezhausen

ISBN 3-13-124301-5  
ISSN 0303-2418

## Geleitwort

Die Wirbelsäule wurde bereits von vielen Forschern verschiedener Fachrichtungen untersucht. Allerdings war durch die bisher eher einseitige Betrachtung ihrer Anatomie im Sinne einer Systematik, d. h. der Beschreibung einzelner Anteile für sich, eine nur unvollständige Darstellung gegeben. In dieser rein systematischen Betrachtungsweise, die heute als überholt zu gelten hat, kommen naturgemäß einzelne Bereiche, wie die Wirbelgelenke zu wenig zur Geltung.

Heute steht in der Anatomie die funktionelle Darstellung aller an der Wirbelsäule beteiligten Systeme, nämlich der Wirbel, der Zwischenwirbelscheiben, der Bänder, der Muskulatur und der kleinen Wirbelgelenke im Vordergrund. Untersuchungen, die die funktionellen Zusammenhänge berücksichtigen, sind daher in der Anatomie von großer Bedeutung. Insbesondere ist dabei auch die Untersuchung am Lebenden mit einzubeziehen. Damit ergeben sich überraschende neue Erkenntnisse über die Funktion der Wirbelgelenke, die zu einem besseren Verständnis der Aufgaben unseres Achsenskelettes führen.

Herr Univ.-Doz. Dr. Reinhard Putz hat sich in mehrjährigen Studien mit der Wirbelsäule unter Berücksichtigung ihrer Funktion beschäftigt. Damit ist nicht nur für die Anatomie sondern für den gesamten Bereich der Medizin, der sich mit der gesunden und kranken Wirbelsäule beschäftigt, in der vorliegenden Monographie ein Werk entstanden, das Aufmerksamkeit verdient. Es macht das Zusammenwirken der Knochen, Bänder, Zwischenwirbelscheiben und Muskeln verständlich. Als Mittler dieses Zusammenwirkens spielen zweifelsohne die Gelenke eine entscheidende Rolle. Die Formen der Gelenkflächen sind in den einzelnen Abschnitten der Wirbelsäule komplizierter gebaut, als bisher angenommen wurde. Es zeigt sich sehr deutlich, daß die Übergänge der einzelnen Abschnitte nicht scharf abzugrenzen sind und die Form auch bei diesen Gelenkflächen in engster Abhängigkeit von ihrer Funktion steht.

Ich wünsche daher diesem Buch einer funktionellen Betrachtungsweise der Wirbelgelenke und ihrer Aufgabe innerhalb der Wirbelsäule jene Beachtung, die es verdient.

W. Platzer  
Innsbruck

## Vorwort

Die moderne Anatomie setzt sich das Ziel, über die beschreibende Darstellung hinaus die Bedeutung von Strukturen und ihre funktionellen Zusammenhänge zu erfassen. Im besonderen Maße gilt dies für den Bewegungsapparat und dabei wiederum für die Gelenke. Aus der Untersuchung ihrer Beanspruchung, wie sie vor allem in den Randstellungen der einzelnen Bewegungen auftritt, ergeben sich praktisch bedeutsame Erkenntnisse für zahlreiche Disziplinen, unter anderem für Sportmedizin, Orthopädie, Traumatologie und Radiologie.

Die Funktion der Wirbelsäule wird auch heute noch unzureichend verstanden, sodaß die Konsequenzen ihrer Beanspruchung im Berufsleben und in der Freizeit oft nicht richtig eingeschätzt werden können.

In der vorliegenden Arbeit werden deshalb die Gelenke der Wirbelsäule als wesentliche Verbindungen innerhalb der Bewegungssegmente in ihrem anatomischen Aufbau beschrieben und davon ausgehend ihre funktionelle Bedeutung für das Achsenorgan als Ganzes dargestellt. Eine Reihe von Einzelbefunden zeigt die Unterschiede der Gelenke in den Regionen auf und liefert die Grundlage für die funktionelle Interpretation.

Herr Univ.Prof.Dr. Werner Platzer lenkte mein Interesse auf das Thema "Wirbelsäule". Ihm habe ich für viele anregende Gespräche ebenso herzlich zu danken wie Herrn Univ.Prof.Dr. Alfred Ravelli, der die Röntgenaufnahmen anfertigte und manche aufmunternde Unterstützung gab. Sehr verpflichtet bin ich Frau Christina Connert und Fräulein Anna Mayrhofer für die umfangreichen Schreibarbeiten.

Vor allem danke ich jedoch meiner lieben Frau, deren Unterstützung das Zustandekommen dieser Arbeit erst ermöglicht hat.

**Bayerische  
Staatsbibliothek  
München**

Innsbruck, Oktober 1980

Reinhard Putz

# Inhaltsverzeichnis

1	<b>Einleitung und Zielsetzung</b> .....	1
2	<b>Material und Methoden</b> .....	2
2.1	Anatomisches Untersuchungsgut .....	2
2.2	Röntgenaufnahmen .....	2
2.3	Methoden .....	3
3	<b>Anatomischer Aufbau der Wirbelgelenke</b> .....	7
3.1	Gelenkkörper der Wirbelgelenke .....	7
3.1.1	Allgemeine Feststellungen .....	7
3.1.2	Knorpelschicht der Gelenkkörper .....	8
3.1.3	Flächengrößen der Wirbelgelenke .....	14
3.1.4	Knöcherne Grundlage der Gelenkflächen .....	14
3.1.4.1	Lage der Gelenkfortsätze auf den Wirbelbogen .....	14
3.1.4.2	Neigungswinkel der Gelenkflächen .....	17
3.1.4.3	Öffnungswinkel der Gelenkflächen .....	17
3.1.4.4	Länge der Gelenkfortsätze und hintere Wirbelkörperhöhe	21
3.1.4.5	Radiologische Darstellbarkeit der Gelenkspalte .....	21
3.1.4.6	Spongiosastruktur der Gelenkfortsätze .....	26
3.2	Gelenkkapsel der Wirbelgelenke .....	28
3.2.1	Membrana synovialis der Wirbelgelenke .....	28
3.2.2	Membrana fibrosa der Wirbelgelenke .....	35
3.2.2.1	Verstärkungszüge der Membrana fibrosa .....	38
3.2.2.2	Beziehung zur benachbarten Muskulatur .....	40
3.2.2.3	Beziehung zu benachbarten Bändern .....	40
3.3	Gefäßversorgung der Wirbelgelenke .....	46
3.3.1	Arterielle Versorgung .....	46
3.3.2	Venöser Abfluß .....	50
3.4	Nervenversorgung der Wirbelgelenke .....	50
4	<b>Entwicklung der Wirbelgelenke</b> .....	54
4.1	Allgemeines zur Entwicklung der Wirbelsäule .....	54
4.2	Ontogenese der Wirbelgelenke .....	56
4.2.1	Entwicklung der Gelenkfortsätze .....	56
4.2.2	Entwicklung der Gelenkspalte .....	60
4.2.3	Entwicklung der Gelenkkapseln .....	63
4.3	Fehlbildungen der Wirbelgelenke .....	65
4.3.1	Größenvarianten der Gelenkfortsätze .....	65
4.3.2	Varianten der Öffnungswinkel .....	66
5	<b>Bedeutung der Wirbelgelenke für die Statik der Wirbelsäule</b> .....	67
5.1	Allgemeines zur Statik der Wirbelsäule .....	67
5.2	Prinzip der Druckübertragung in den Bewegungssegmenten .....	70
5.3	Rolle der meniskoiden Falten bei der Druckübertragung in den Wirbelgelenken .....	78
6	<b>Bedeutung der Wirbelgelenke für die Kinematik der Wirbelsäule</b> .....	81
6.1	Allgemeines zur Kinematik der Wirbelsäule .....	81
6.2	Vorgänge innerhalb der Bewegungsregionen .....	83
6.2.1	Hauptbewegungen in den Bewegungsregionen .....	83
6.2.1.1	"Kopfgelenke" und Bewegungssegment C <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> als Be-	

	wegungsregion (Obere Halswirbelsäule) .....	83
6.2.1.2	Bewegungsregion C <sub>3</sub> bis Th <sub>1</sub> (Th <sub>2</sub> ) .....	85
6.2.1.3	Bewegungsregion Th <sub>1</sub> (Th <sub>2</sub> ) bis (Th <sub>11</sub> ) Th <sub>12</sub> .....	88
6.2.1.4	Bewegungsregion (Th <sub>11</sub> ) Th <sub>12</sub> bis Os sacrum .....	91
6.2.2	Mechanik in der Endstellung einzelner Bewegungs- segmente .....	94
6.2.2.1	Rotation .....	94
6.2.2.2	Sagittalflexion .....	98
6.2.2.3	Lateralflexion .....	101
6.3	Bewegungsprinzip der Wirbelgelenke .....	102
7	Zusammenfassung .....	104
8	Literaturverzeichnis .....	106
9	Sachverzeichnis .....	115

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Bei Untersuchungen der Wirbelgelenke, der Articulationes zygapophysiales, stehen zumeist die pathologischen Veränderungen dieser Gelenke, deren Auswirkungen auf Statik und Dynamik der Wirbelsäule und deren Rolle bei Rückenschmerzen im Vordergrund. Die normale Anatomie und die Entwicklung der Wirbelgelenke werden dabei nur einleitend und sehr allgemein behandelt, bedürfen aber zum besseren Verständnis der pathologischen Veränderungen einer eigenen Untersuchung.

In der vorliegenden Arbeit soll auf der Grundlage einer detaillierten Beschreibung der normalen anatomischen Verhältnisse die Bedeutung der Wirbelgelenke für die Statik und Kinematik des "Organes - Wirbelsäule" geklärt werden. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, die unterschiedliche Beanspruchung der Gelenke in den einzelnen Wirbelsäulenbereichen darzustellen. Die Wirbelsäule wurde deshalb nach funktionalen Gesichtspunkten in Regionen unterteilt. Diese Gliederung in "Bewegungsregionen" erleichtert das Verständnis für die Mechanik einzelner Bewegungsabläufe und erweitert die von JUNGHANNS (1936) geprägte Bezeichnung "Bewegungssegment".

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Anatomisches Untersuchungsgut (Tab. 1) \*)

Als Untersuchungsgut standen Präparate der Sammlung des Anatomischen Institutes der Universität Innsbruck sowie der Präparierkurse zur Verfügung. An mehreren Wirbelsäulen wurden die Beschaffenheit der Knorpeloberfläche, die Begrenzung des Gelenkspaltes, der Aufbau der Gelenkkapsel der Wirbelgelenke sowie die Nachbarschaftsbeziehungen zu Bändern und Muskeln untersucht. An mazerierten Präparaten wurden die genaue Lage und Einstellung der Gelenkflächen der Processus articulares superiores und inferiores gemessen.

T a b e l l e 1

Adulti	43	23	ca. 1200
Iuveniles	3	2	—
Infantes	4	2	—
Neonati	5	—	10
Feti	10	—	—
	komplette Wirbelsäulen	mazerierte Wirbelsäulen	Einzel - wirbel

Das Durchschnittsalter betrug bei 35 kompletten Wirbelsäulen ca. 57 Jahre. Die altersmäßig nicht erfaßten Wirbelsäulen und Einzelwirbel wurden durch Vergleich entsprechenden Altersstufen zugeordnet. Die Beschreibung der Entwicklung der Wirbelgelenke erfolgte anhand der Schnittserien von Feten der siebten Entwicklungswoche bis zur Geburtsreife.

### 2.2 Röntgenaufnahmen

Zur Erstellung von Schemata der Kräftewirkungen zwischen den einzelnen Wirbeln wurden Röntgenaufnahmen an sechs gesunden Männern im Alter zwischen 18 und 35 Jahren angefertigt. Mit Rücksicht auf die divergierende Ausbreitung des Röntgenstrahles wurde zur Vermeidung von Fehlprojektionen auf Ganztaufnahmen verzichtet. Der Einstellungswinkel, den die oberen Flächen der Halswirbelkörper zur Horizontalebene im aufrechten Stand einnehmen, wurde an 200 radiologisch unauffälligen seitlichen Aufnahmen aus dem Krankengut einer Röntgenstation bestimmt. Zur Darstellung von Spongiosastrukturen der Wirbel wurden auch von Teilpräparaten Röntgenaufnahmen hergestellt.

---

\*) Für die Überlassung einzelner Präparate danke ich den Herren Univ. Prof. Dr. A. Propst (Institut für Pathologie der Universität Innsbruck) und Univ. Doz. Dr. K. Twerdy (Klinik für Neurochirurgie der Universität Innsbruck).

### 2.3 Methoden \*)

Die mazerierten Wirbel wurden entsprechend den Angaben in Abbildung 1 - 3 unter Vernachlässigung der Form der Knorpelaufgabe vermessen. Deren Dicke ist zwar im einzelnen Gelenk nicht gleichmäßig, dies fällt aber bezogen auf die Streuung der Meßwerte nicht ins Gewicht. Zur Berechnung von Mittelwerten wurden mehrfach Messungen durchgeführt. Als Hilfsmittel dienten einfache Meßgeräte, wie Schablonen, Goniometer und Schublehren. Die genaue Einhaltung der Meßebenen (Sagittalebene für den Neigungswinkel, Transversalebene für den Öffnungswinkel) wurde durch eine sorgfältige Fixierung auf einem Plastillinblock gewährleistet. In Hals- und Brustwirbelsäule ist die Messung dieser beiden Winkel relativ einfach. Sie erfolgt durch Anlegen von Tangenten an die zugehörigen Gelenkflächen bzw. an die obere Fläche der Wirbelkörper. Eine sinnvolle Messung des Neigungswinkels der lumbalen Wirbelgelenke kann sich nur auf die am weitesten medial gelegenen Anteile der Gelenkflächen beziehen, weil nur diese senkrecht auf die Sagittalebene eingestellt sind. Als Öffnungswinkel wurde an den Lendenwirbeln derjenige Winkel bestimmt, der von den lateralen Anteilen der Gelenkflächen der *Processus articulares superiores* eingeschlossen wird.

LUTZ (1967) bezeichnet als Öffnungswinkel jene Winkel, den zwei in der Transversalebene an die Gelenkflächen angelegte Linien einschließen, die jeweils den am weitesten medial und den am weitesten lateral gelegenen Punkt der Gelenkflächen berühren. Der auf diese Weise gemessene Winkel eignet sich nicht zur Beurteilung des Entwicklungsablaufes der Wirbelgelenke der Lendenwirbel und zur Beschreibung ihrer Rolle in Statik und Kinematik der einzelnen Bewegungssegmente.

Die Spongiosastruktur der *Processus articulares* in der Transversal- und Sagittalebene wurde an Röntgenaufnahmen dünner Knochenschnitte dargestellt.

Der Verlauf der Blutgefäße, die zu den Wirbelgelenken ziehen, wurde mit Hilfe von Latexmilch- und Kunstharzinjektionen untersucht. Zur Herstellung von Schnitten an nicht mazerierten Wirbelsäulen wurden einige Präparate entkalkt, andere tiefgefroren und mit einer feinen Bandsäge geschnitten. Von den Meßergebnissen wurden die Mittelwerte und deren Standardabweichungen errechnet, graphisch dargestellt und auf diese Weise die Korrelation einzelner Werte und ihre Bedeutung für Statik und Kinematik sichtbar gemacht.

An den nicht mazerierten Wirbeln ließen sich die kollagenen Fibrillen in der oberflächlichen Schicht der Gelenkknorpel nach Methode von HULTKRANTZ (1898) unter Beachtung der Vorschläge von KONERMANN (1971) gut darstellen.

---

\*) Für die Durchführung der statistischen Berechnungen danke ich Herrn Dr. R. Schlögl (Klinik für Plastische- und Wiederherstellungschirurgie der Universität Innsbruck), ebenso Herrn Dipl.-Ing. J. Müller (Institut für Mechanik I und Flächentragwerke der Universität Innsbruck) für die Darstellung der statischen Grundlagen.

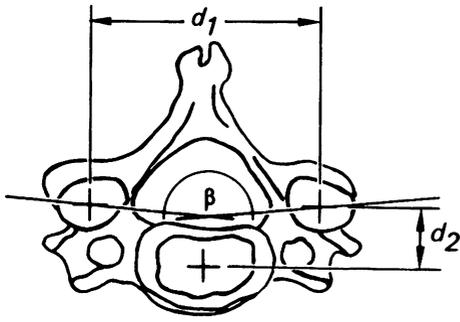


Abb. 1 a

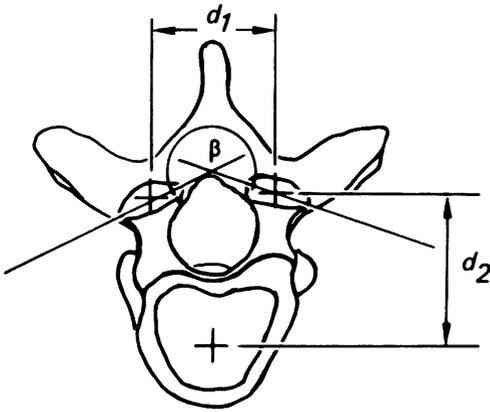


Abb. 1 b

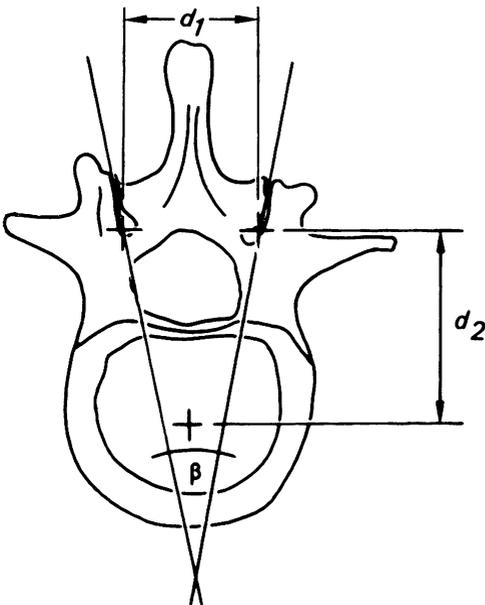


Abb. 1 c

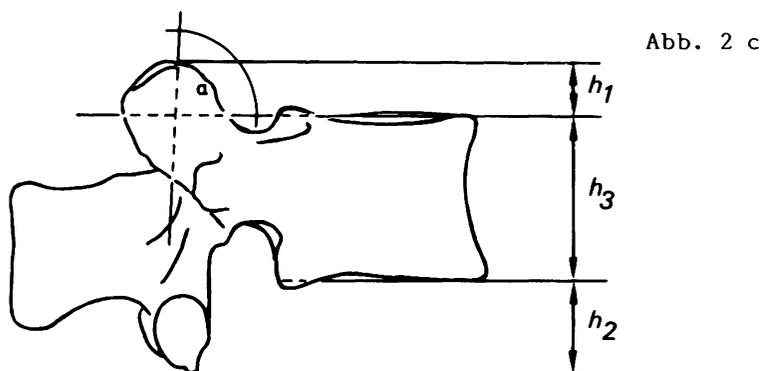
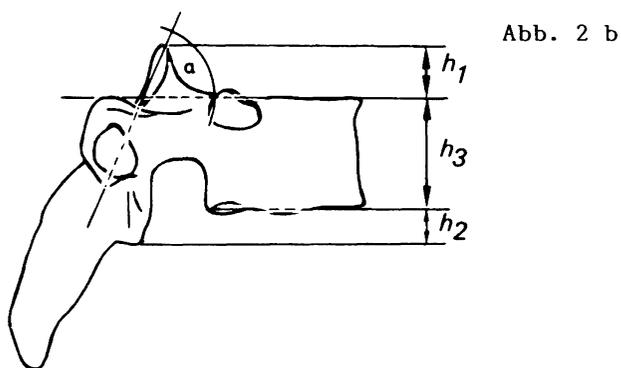
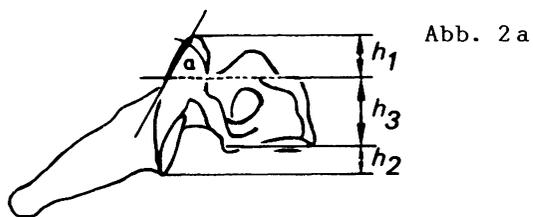


Abb. 3

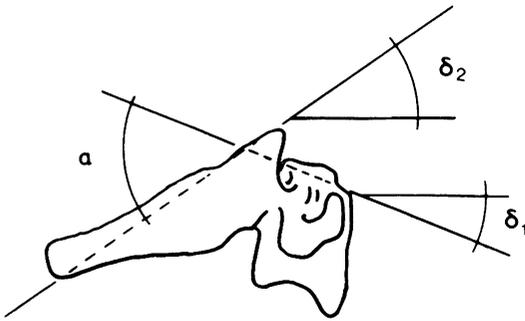


Abb. 1 - 3: Meßstrecken und Winkel an den einzelnen Wirbeln

a Halswirbel

b Brustwirbel

c Lendenwirbel

$d_1$  transversaler Abstand der Gelenkflächen der Proc.art.sup.

$d_2$  sagittaler Abstand der Gelenkflächen der Proc.art.sup. vom zugehörigen Wirbelkörper

$h_1$  "Länge" des über das Niveau der oberen Wirbelkörperfläche vorragenden Anteiles der Proc.art.sup.

$h_2$  "Länge" des über das Niveau der unteren Wirbelkörperfläche nach unten vorragenden Anteiles der Proc.art.inf.

$h_3$  hintere Wirbelkörperhöhe

$\alpha$  Neigungswinkel (Winkel zwischen der oberen Wirbelkörperfläche und den Gelenkflächen der Proc.art.sup. - gemessen in der Sagittalebene)

$\beta$  Öffnungswinkel (transversaler Winkel der Gelenkflächen der Proc.art.sup.)

$\delta_1, \delta_2$  Ausrichtung der oberen Wirbelkörperfläche und der Gelenkflächen zur Transversalebene

### 3 Anatomischer Aufbau der Wirbelgelenke

#### 3.1 Gelenkkörper der Wirbelgelenke

##### 3.1.1 Allgemeine Feststellungen

Die Wirbelgelenke sind "zwangsläufig kombinierte Gelenke". Als Gelenkkörper treten die knorpelbedeckten Flächen der Processus articulares der jeweils benachbarten Wirbel miteinander in Kontakt. Sie entsprechen nur zum Teil einfachen geometrischen Formen, und auch der Verlauf der Gelenkspalte innerhalb der einzelnen Bewegungssegmente in der Transversalebene kann nicht in allen Bereichen der Wirbelsäule – wie seit AEBY (1871) üblich – einem einfachen geometrischen Prinzip zugeordnet werden.

In Abbildung 4 wird versucht, auf Grund von eigenen Untersuchungen (PUTZ, 1977) eine schematische Darstellung des Verlaufes der Gelenkspalte in der Transversalebene zu geben. Sie unterscheidet sich von den bisherigen Darstellungen (AEBY, 1871; STRASSER, 1913) hinsichtlich der Gelenke zwischen zweitem und drittem Halswirbel ( $C_2/C_3$ ), zwischen siebtem Hals- und erstem Brustwirbel ( $C_7/Th_1$ ) und vor allem hinsichtlich der Lendenwirbelgelenke. Für die letztgenannten Gelenke besteht kein segmental gemeinsamer Krümmungsmittelpunkt, auch die einzelne Gelenkfläche ist nicht regelmäßig gekrümmt. Ein flächenhafter Kontakt der Gelenkkörper kommt bei den meisten Wirbelgelenken nur in bestimmten Gelenkstellungen zustande, die häufig während der Normalhaltung des Körpers eingenommen werden. Nur in den Brustwirbelgelenken bleiben die Gelenkkörper auch bei den meisten Bewegungen flächenhaft in Berührung.

Ein oft schon bei geringfügigen Bewegungen auftretender relativer Kontaktverlust der Gelenkkörper gehört zur normalen Funktion der Wirbelgelenke. Vor allem bei den Randstellungen der Gelenke erweitert sich der Gelenkspalt von einer randständig gelegenen, punktförmigen oder linearen Berührungsstelle der Gelenkkörper zu einer Keilform (siehe auch DITTMAR, 1930; REICHMANN, 1972).

Erst die Gegenüberstellung der Form der Gelenkkörper und der tatsächlichen Bewegungen der Wirbelsäule ermöglicht eine Funktionsanalyse der einzelnen Wirbelgelenke. Die Wechselwirkung mehrerer funktioneller Faktoren entspricht der großen Variabilität der Gelenkkörper der Wirbelgelenke.

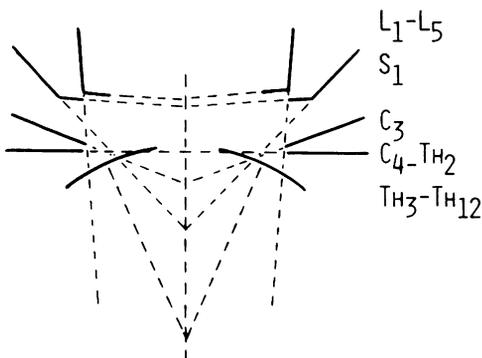


Abb. 4: Ausrichtung der Gelenkflächen der Proc.art.sup. in der Transversalebene

### 3.1.2 Knorpelschicht der Gelenkkörper

Die hyaline Knorpelauflage ist in den verschiedenen Arealen des einzelnen Processus articulares superiores ungleich dick, ihr Verteilungsmuster in den verschiedenen Regionen der Wirbelsäule jedoch gleichartig. Im Zentrum der Gelenkflächen ist die Knorpelschicht jeweils am dicksten, sie nimmt gegen die Ränder hin kontinuierlich ab. In Brust- und Halswirbelsäule findet man jedoch häufig an Stelle einer kontinuierlichen Abflachung einen kleinen Wulst am kranialen Rand der Gelenkflächen. An den Lendenwirbeln tritt ein ähnlicher "Randwulst" regelmäßig am lateralen Umfang der Gelenkflächen auf (Abb. 5, 6).

Randwulstbildungen sind auch an anderen Gelenken des menschlichen Körpers anzutreffen, z. B. im Bereich der Schultergelenke und der Fingergrundgelenke. Der hyaline Knorpel geht in diesen Randbezirken in fibrös durchsetztes Material über. Die Randwülste vergrößern teilweise hyalin, teilweise faserknorpelig die Gelenkfläche über ihre knöcherne Grundlage hinaus. Im Bereich der Wirbelgelenke sind sie nur in Ausnahmefällen faserknorpelig durchsetzt, zumeist handelt es sich um stumpfe Abrundungen der hyalinen Knorpelauf-  
lage.



Abb. 5 a

Eine besonders große und für die Funktion entscheidende Differenz zwischen der Oberflächenform des Gelenkknorpels und der knöchernen Grundfläche besteht in den Articulationes atlantoaxiales laterales. Die Facies articulares superiores der Axis sind sowohl in Frontal- als auch in Sagittalebene konvex, liegen aber einer konkaven Unterlage auf (PUTZ und POMAROLI, 1972).



Abb. 5 b

Abb. 5: Sagittalschnitt durch Brustwirbelgelenke (a) und Lendenwirbelgelenke (b); Erläuterungen siehe Abb. 18

An den dünn ausgezogenen Randbezirken der Gelenkflächen setzt die Membrana synovialis ohne deutliche Furchenbildung an der Knorpelgrenze an. Im Randwulstbereich entsteht durch den abrupten Abfall der Knorpelaufgabe eine tiefe Furche, die großteils von der angrenzenden Membrana synovialis ausgekleidet ist.

Die Dicke der Gelenkknorpel nimmt - abgesehen von den Gelenkflächen der Kopfelenke - von kaudal nach kranial ab. Ähnliche Feststellungen trafen auch DELMAS und Mitarbeiter (1970). Ihre Beobachtung, daß die Knorpelauflagerung rechts allgemein dicker sei

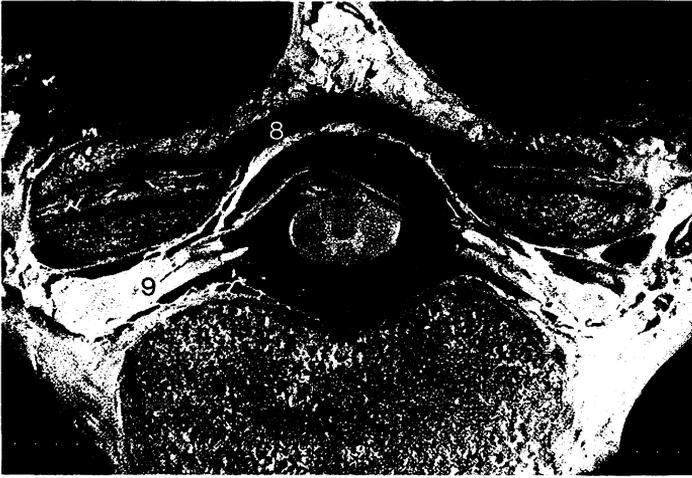


Abb. 6 a



Abb. 6 b

Abb. 6: Transversalschnitte durch Brustwirbelgelenke (a) und Lendenwirbelgelenke (b); Erläuterungen siehe Abb. 18

als links, kann aus dem vorliegenden Untersuchungsmaterial nicht bestätigt werden.

Auch bei den *Processus articulares inferiores* ist die Knorpelauflage im Zentrum jeweils am dicksten und nimmt im allgemeinen kontinuierlich gegen die Ränder hin ab. Nur am kaudalen Rand der Gelenkflächen der Lendenwirbel ist ähnlich wie an den *Processus articulares superiores* ein abrupt abbrechender Wulst ausgebildet. Die Spitze der *Processus articulares inferiores* ist häufig

vom Knorpelrand abgesetzt.

Die Knorpeloberflächen der *Processus articulares inferiores* der Lendenwirbel sind zweigeteilt. Eine schmale mediale Fläche steht in einem stumpfen Winkel zu einer etwas breiteren, lateral gelegenen Fläche. Dadurch entsteht eine longitudinal ausgerichtete Knorpelkante. Auch die knöcherne Grundlage dieser Gelenkflächen läßt oft eine derartige Kante erkennen (PUTZ, 1977).

#### **Anordnung der kollagenen Fasern in der oberflächlichen Schicht der Gelenkknorpel der Wirbelgelenke**

Die durch Spaltlinien darstellbare Anordnung der kollagenen Fasern ist in den einzelnen Bereichen der Wirbelsäule unterschiedlich (Abb. 7). An den Gelenkflächen der *Articulationes atlantooccipitales* verlaufen sie senkrecht auf deren medialen Rand. Im Bereich des transversalen Durchmessers war an einigen Präparaten eine faserige Umbauzone ausgebildet, die eine Darstellung von Spaltlinien verhinderte. In seltenen Fällen findet man an dieser Stelle eine bindegewebige Unterteilung der Gelenkflächen.

An der *Facies articularis anterior* und *posterior* des *Dens axis* sind die Spaltlinien parallel in longitudinaler Richtung angeordnet. Sie verlaufen an der *Fovea dentis* des Atlas im Zentrum, wo sich ein singulärer attraktiver Punkt befindet, jeweils nach lateral sowie nach kaudal. Nach kranial hin findet sich eine undifferenzierte Zone faserigen Knorpels. An den oberen und unteren Gelenkflächen der *Articulationes atlantoaxiales laterales* sind die Verhältnisse nicht ganz einheitlich. Im allgemeinen divergieren die Spaltlinien, von einem attraktiven Punkt nahe dem medialen Umfang ausgehend, nach lateral. In der übrigen Halswirbelsäule sowie in Brust- und Lendenwirbelsäule ist das Bild der Spaltlinien der Gelenkflächen der *Processus articulares superiores* mit wenigen Ausnahmen einheitlich. Sie divergieren von einer medial und kaudal gelegenen randständigen Stelle aus, an der sich fallweise attraktive Punkte befinden, bogenförmig nach kranial und lateral. Damit verlaufen sie entlang des medialen Randes der Gelenkflächen in longitudinaler Richtung, während sie in deren lateralem Anteil eher transversal eingestellt sind. Mitunter fanden sich im Bereich der medialen und kaudalen Anteile der Gelenkflächen faserige Veränderungen der Knorpeloberfläche.

Die jeweils korrespondierenden unteren Gelenkflächen weisen beim vorliegenden Untersuchungsgut eine etwas andere Verteilung der Spaltlinien auf. Vom dritten Hals- bis zum elften Brustwirbel divergieren sie zumeist vom oberen Rand der Gelenkflächen nach kaudal. Mitunter liegen sie nahezu parallel. Vom zwölften Brust- bis zum dritten Lendenwirbel sind sie transversal eingestellt, allerdings unterbrochen durch eine longitudinale Leiste, entlang der sich auch longitudinale Spaltlinien darstellen lassen. Vierter und fünfter Lendenwirbel zeigen wiederum ein Muster, wie es für die meisten Brustwirbel beschrieben wurde.

Mit den Spaltlinien der knorpeligen Gelenkflächen der Wirbelgelenke hat sich bisher offensichtlich nur LEY (1974) befaßt. Er beschränkt sich auf die Beschreibung des Spaltlinienmusters der Brustwirbelgelenke. Seine Ergebnisse stimmen mit unseren Befunden überein. Hier kann auf die funktionelle Interpretation dieser Befunde noch nicht eingegangen werden, für andere Gelenke existieren aber bereits derartige Untersuchungen.



OCC.



C2 FAC. A. ANT.



C2 FAC. A. POST.



C2 FAC. A. LAT



C3



C4



C5



C6



C7



TH1



TH2



TH3



TH4



TH5



TH6



TH7



TH8



TH9



TH10



TH11



TH12



L1



L2



L3



L4



L5



S1

Abb. 7 a

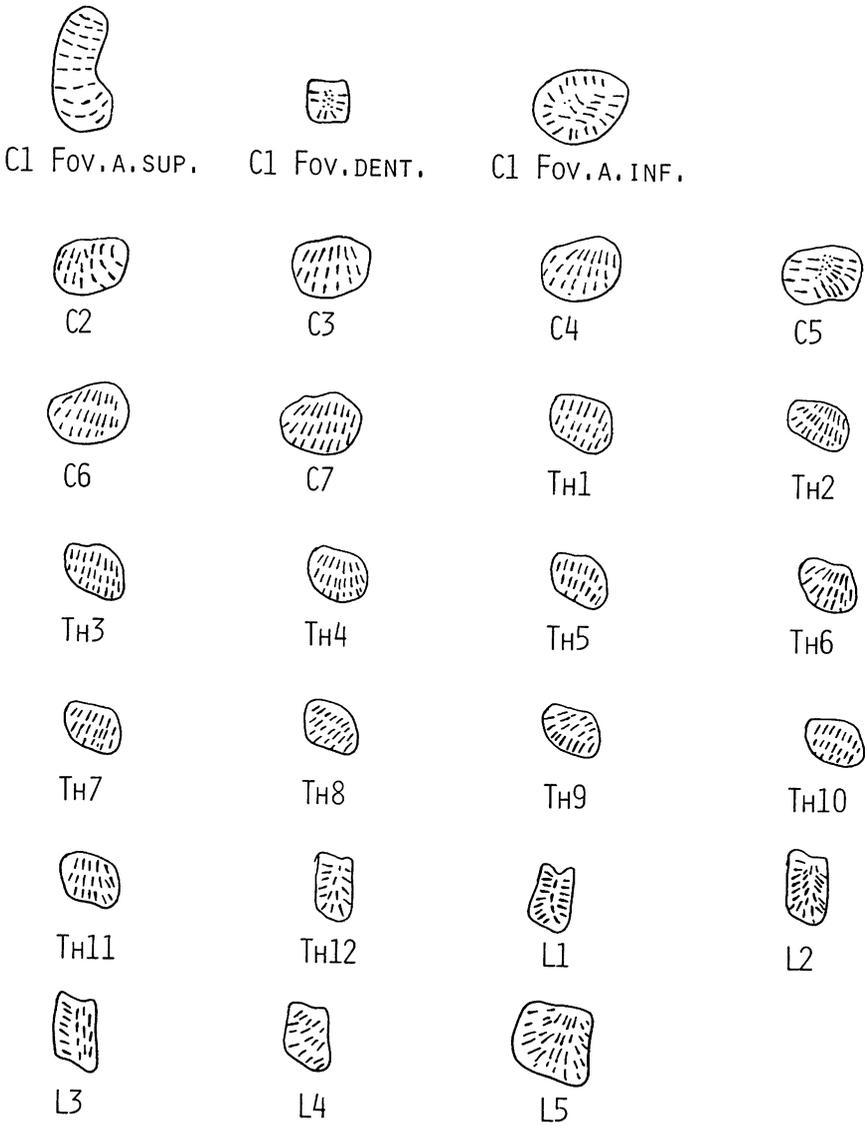


Abb. 7 b

Abb. 7: Spaltlinien der oberflächlichen Knorpelschicht der Wirbelgelenke (faserige Veränderungen - punktiert)

a Proc.articulares superiores

b Proc.articulares inferiores

### 3.1.3 Flächengrößen der Wirbelgelenke

Bestimmungen der Größe der knöchernen Grundlage der Gelenkflächen ("Flächengröße") wurden von STOFFT und MÜLLER (1971) und von LEY (1974) an mazerierten Wirbelsäulen durchgeführt. Die absoluten Werte der Flächengrößen sind dabei weniger von Interesse als die Größenunterschiede der zusammengehörigen Gelenkflächen der einzelnen Wirbelgelenke. Für die Wirbelgelenke gilt allgemein, daß die Flächen der korrespondierenden Gelenkkörper nicht völlig übereinstimmen (EXNER, 1958). Nach STOFFT und MÜLLER (1971) nimmt die Beweglichkeit im einzelnen Bewegungssegment mit der Differenz der Größe der Gelenkflächen zu. Die größten Flächendifferenzen finden sich im Bewegungssegment  $C_5/C_6$ . Die konkaven Gelenkflächen der Wirbelgelenke haben im allgemeinen eine größere Ausdehnung als die zugehörigen konvexen. Im Hals- und Brustbereich sind die unteren Gelenkflächen jeweils größer als die oberen, im Lendenbereich ist es umgekehrt.

LEY (1974) hat mit der Untersuchung der Flächengrößen auch eine Beschreibung der Kontur der Gelenkflächen sowie deren Variabilität gegeben.

### 3.1.4 Knöcherne Grundlage der Gelenkflächen

Nicht nur die knorpeligen Gelenkflächen sondern auch deren knöcherne Grundlage weisen regional spezifische Charakteristika hinsichtlich ihrer Größe, ihrer Lage und Stellung auf dem Wirbelbogen auf.

#### 3.1.4.1 Lage der Gelenkfortsätze auf den Wirbelbogen

Zur Lagebeschreibung der Gelenkfortsätze auf den Wirbelbogen wurden der transversale Abstand der Gelenkflächen ( $d_1$ ) und ihre sagittale Entfernung vom Wirbelkörper ( $d_2$ ) ermittelt. Als Meßpunkte für  $d_1$  dienten die Mittelpunkte der Gelenkflächen, die in deren angenäherter Kreisform einfach zu bestimmen sind. Als  $d_2$  wurde der Abstand des Zentrums der oberen Endfläche des jeweiligen Wirbelkörpers von der queren Verbindungslinie der Mittelpunkte der zugehörigen Gelenkflächen bestimmt (Abb. 1). Auf die Untersuchung der entsprechenden Meßwerte der *Processus articulares inferiores* wurde verzichtet, da sie in konstanter Relation zu den erhobenen Meßergebnissen stehen und keine zusätzlichen Aufschlüsse erwarten lassen.

#### Transversaler Abstand der Gelenkflächen der *Processus articulares superiores* ( $d_1$ )

Wie Abb. 8 zeigt, differieren die transversalen Abstände von Wirbel zu Wirbel. Auf Grund der graphisch dargestellten Änderungstendenzen lassen sich künstlich vier Bereiche herausstellen, die mit der übrigen Regioneneinteilung nicht übereinstimmen. Im Bereich  $C_3$  bis  $C_7$  weisen die Wirbel die größte durchschnittliche Distanz der Gelenkflächen auf. Sie wird nur von dem Segment  $S_1$  übertroffen. Von  $C_7$  bis  $Th_4$  nehmen die Werte kontinuierlich ab, d. h. die Gelenkflächen nähern sich einander (Abb. 9). Von  $Th_4$  bis  $L_3$  bleibt der Abstand der Gelenkflächen mit einer geringen Streuung nahezu konstant und steigt bis  $L_5$  an.

Interessant ist die unterschiedliche Streuung der Werte in den einzelnen Regionen. Die queren Abstände der segmentalen Gelenkflächen weisen zwar unter allen im Laufe dieser Untersuchung bestimmten Meßgrößen die geringste durchschnittliche Streuung auf, dennoch

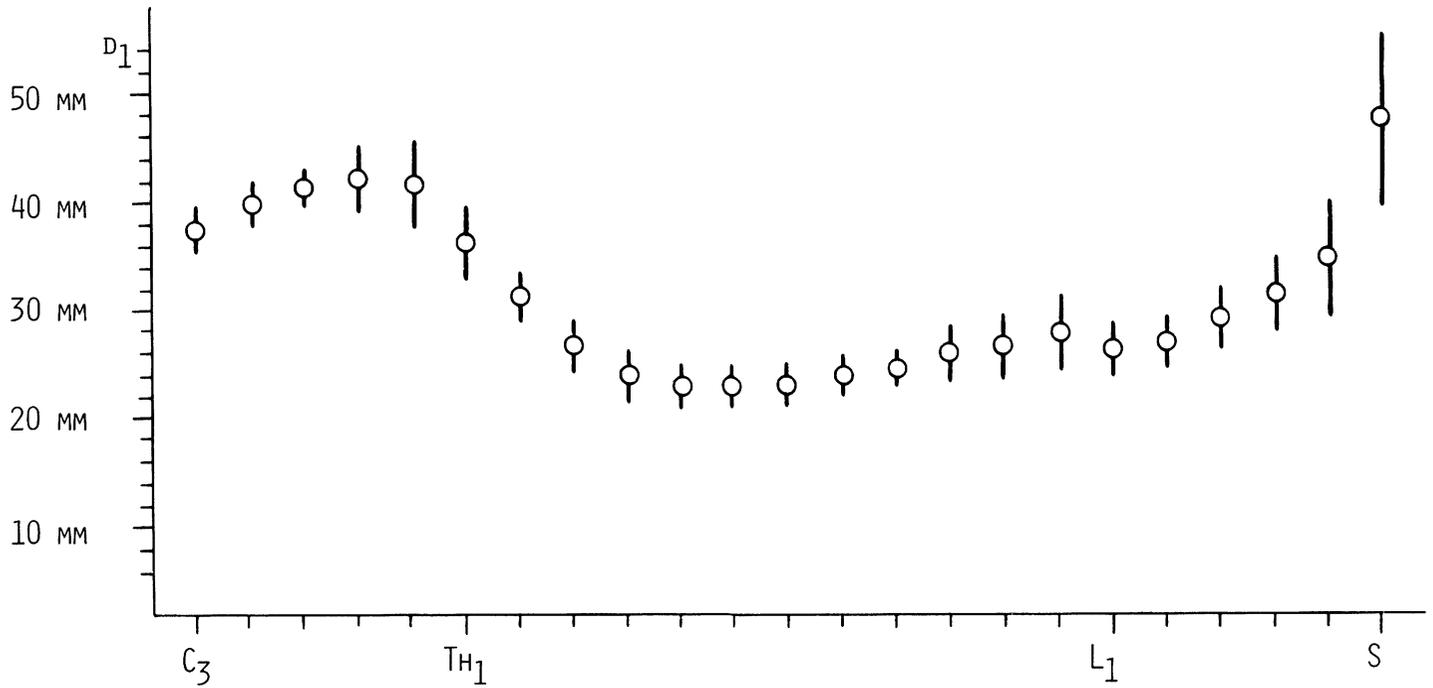


Abb. 8: Transversale Abstände der oberen Gelenkflächen der Wirbel ( $d_1$ ), siehe Abb. 1



Abb. 9: Zervikothorakaler Übergangsbereich (Ansicht von dorsal); die transversale Distanz der Halswirbelgelenke ist größer als an den Brustwirbelgelenken.

ist sie in eng begrenzten Gebieten relativ hoch. Eine im Vergleich zu den anderen Segmenten wesentlich größere Streuung findet man in den Segmenten C<sub>6</sub> bis Th<sub>1</sub>, Th<sub>10</sub> bis Th<sub>12</sub> sowie in L<sub>5</sub> und S<sub>1</sub>. Die Absolutwerte in den einzelnen Regionen der Wirbelsäule betragen in der Halswirbelsäule um 40 mm, in der Brustwirbelsäule um 25 mm und in der Lendenwirbelsäule 25 mm bis 40 mm von L<sub>3</sub> bis S<sub>1</sub> ansteigend. Die gewonnenen Mittelwerte entsprechen jenen von STOFFT (1970), der als Meßpunkte die lateralen Begrenzungen der Gelenkfortsätze verwendete.

### Sagittaler Abstand der Gelenkflächen vom Wirbelkörper ( $d_2$ )

Auch diese Meßwerte lassen sich ähnlich wie die transversalen Abstände in Bereiche gliedern (Abb. 10). Von  $C_3$  bis einschließlich  $C_6$  schwanken die Mittelwerte relativ wenig um 12 mm. Von  $C_6$  bis  $Th_8$  nehmen sie kontinuierlich zu und bleiben bis  $Th_{11}$  relativ konstant. Im Bereich von  $Th_{12}$  bis  $L_5$  erfolgt ein leichter Anstieg der Werte, nur  $L_5$  zeigt wiederum eine deutliche Erniedrigung. Eine größere Streuung der Einzelwerte ist nur in der Lendenwirbelsäule zu finden.

#### 3.1.4.2 Neigungswinkel der Gelenkflächen

Die Einstellung der Gelenkflächen zu den Deckplatten der Wirbelkörper in der Sagittalebene wurde als Neigungswinkel gemessen (Abb. 2). Der Neigungswinkel ( $\alpha$ ) erscheint von besonderer Bedeutung für die Beurteilung der Statik der Wirbelsäule. Er bestimmt die in Abhängigkeit von der Haltung variable Verteilung der Druckbeanspruchung innerhalb des einzelnen Bewegungssegmentes wesentlich.

Wie Abbildung 11 zeigt, treten im Gegensatz zu den übrigen Halswirbeln beim dritten sowie siebten Halswirbel auffallend hohe Werte auf. Der Winkel am ersten Brustwirbel entspricht dem des siebten Halswirbels. Innerhalb der Brustwirbelsäule ist eine kontinuierliche Zunahme des Neigungswinkels bis zum zehnten Brustwirbel festzustellen. Zum Os sacrum hin werden die Neigungswinkel deutlich kleiner. Die Streuung der Einzelwerte ist im oberen Bereich der Wirbelsäule ( $C_3$  bis  $Th_6$ ) wesentlich größer als in den übrigen Wirbelsäulenregionen. Die Befunde von LEY (1974) an den Brustwirbelgelenken stimmen mit unseren Ergebnissen nahezu überein.

#### 3.1.4.3 Öffnungswinkel der Gelenkflächen

Der Öffnungswinkel ( $\beta$ ) wird durch horizontale Tangenten an die Gelenkflächen bestimmt (Abb. 1). Die Meßwerte sind in Abbildung 12 zusammengefaßt. Aus den im Kapitel 2.3 dargestellten Gründen sind die Meßwerte nicht direkt mit den zahlreichen Literaturangaben vergleichbar (HORWITZ und SMITH, 1940; WILLIS, 1959; LUTZ, 1967; PFEIL, 1968; MED, 1977).

Beim dritten Halswirbel liegt der Öffnungswinkel mit 142 Grad signifikant niedriger als bei den übrigen Halswirbeln, bei den Brustwirbelgelenken schwankt er mit Ausnahme des obersten und untersten Brustwirbels nahe um 215 Grad. Auffallend sind die beträchtlichen Unterschiede der Meßwerte von Brust- und Lendenwirbelsäule. Abgesehen von der großen Variabilität der Einstellungsänderung der Gelenkflächen des zwölften Brust- und ersten Lendenwirbels, die in der großen Streuung ihrer Einzelwerte zum Ausdruck kommt, ist auf die Zunahme des Öffnungswinkels vom zweiten Lendenwirbel bis zum Kreuzbein hinzuweisen. Er erreicht an den Processus articulares des Os sacrum Werte um 90 Grad. MED (1972, 1973, 1977) hat den Verlauf der Gelenkspalte mit Zylinderflächen verglichen, die segmental zur Transversalebene geneigt stehen und gibt auch die Lage der zugehörigen Zylinderachsen an. Diese Darstellung ist zwar sehr anschaulich, erscheint aber als Grundlage für funktionelle Überlegungen nicht zweckmäßig.

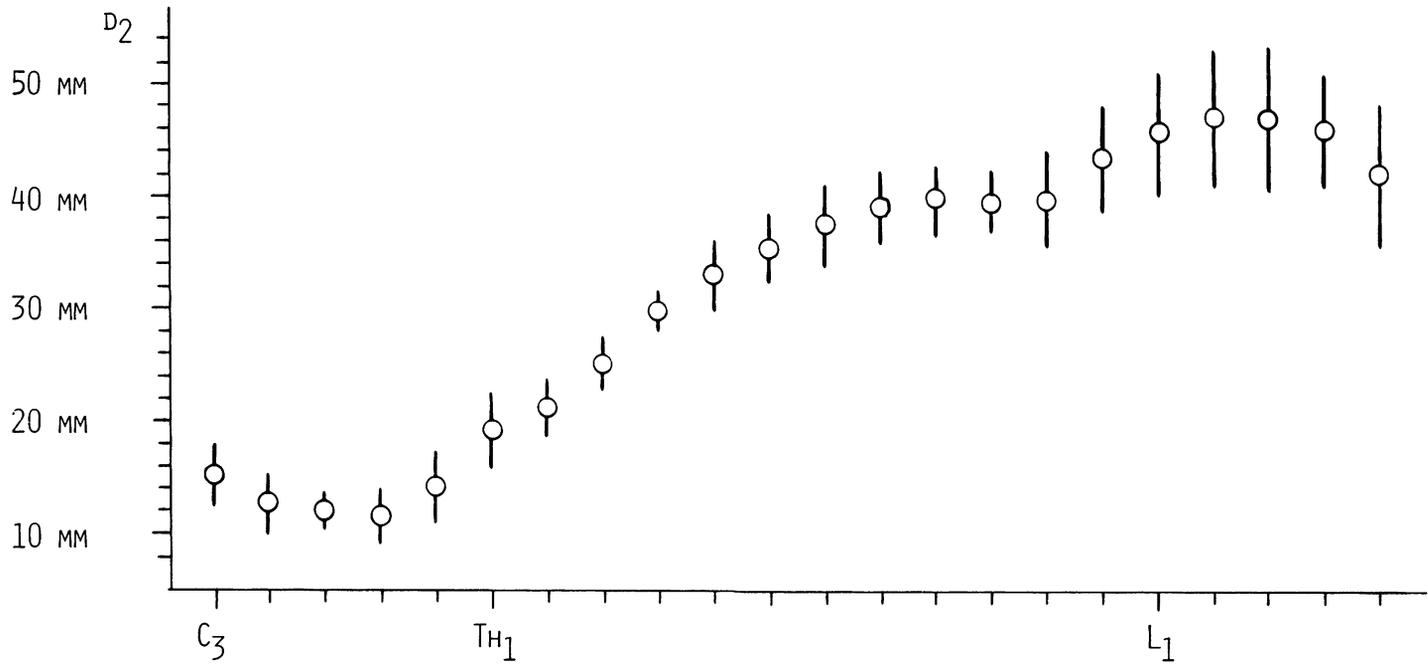


Abb. 10: Sagittale Abstände der oberen Gelenkflächen von den zugehörigen Wirbelkörpern  $(d_2)_i$ , siehe Abb. 1

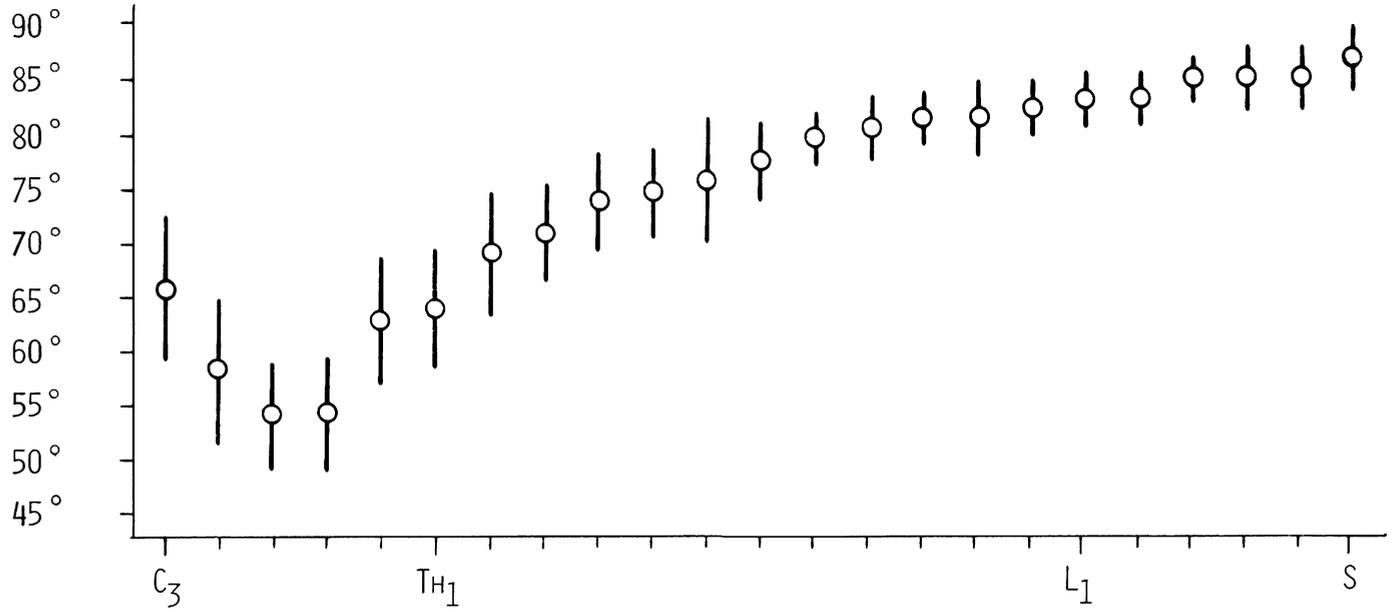


Abb. 11: Neigungswinkel der Gelenkflächen der Proc.art.sup. zu den oberen Flächen der zugehörigen Wirbelkörper ( a ), siehe Abb. 2

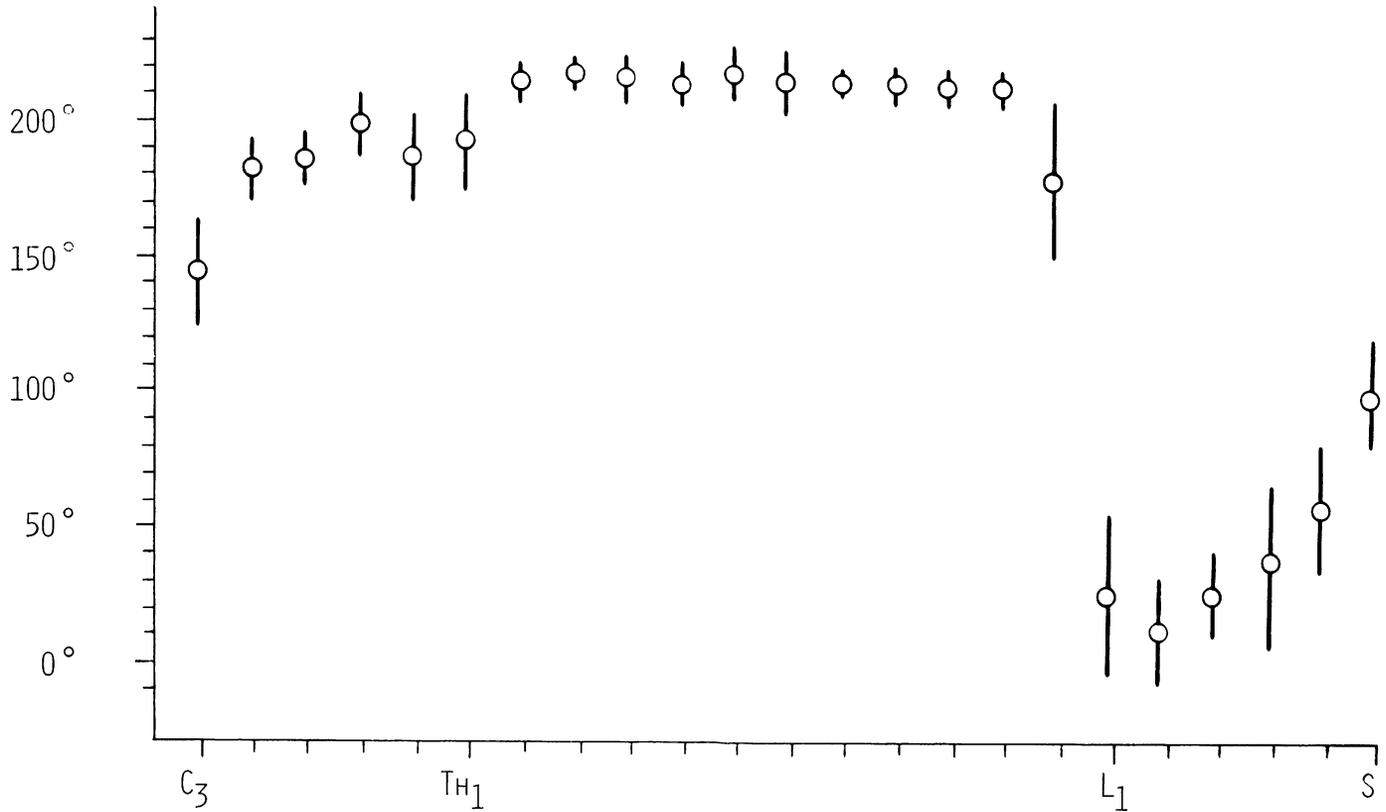


Abb. 12: Öffnungswinkel der Gelenkflächen der Proc. art. sup. ( $\beta$ ), siehe Abb. 2

#### 3.1.4.4 Länge der Gelenkfortsätze und hintere Wirbelkörperhöhe

In den Abbildungen 13 - 15 sind die über das Niveau der Wirbelkörperflächen vorragenden "Längen" der Processus articulares ( $h_1$ ,  $h_2$ ) und die hintere Wirbelkörperhöhe ( $h_3$ ) zusammengestellt (Abb. 1, 2).

Die oberen Gelenkfortsätze sind mit Ausnahme des dritten Halswirbels, bei dem sie die obere Wirbelkörperfläche nur 3 mm überragen, relativ einheitlich. In den lordotischen Anteilen der Wirbelsäule sind die "Längen" allgemein geringer als im Bereich der Brustkyphose. Ein entgegengesetztes Verhalten zeigen die Processus articulares inferiores. Vom dritten zum sechsten Halswirbel nimmt ihre "Länge" ab, bleibt innerhalb der oberen und mittleren Brustwirbelsäule nahezu konstant bei 3 - 4 mm, steigt bis zum ersten Lendenwirbel auf 14 mm an und fällt bis zum fünften Lendenwirbel auf 11 mm ab.

Die hintere Wirbelkörperhöhe nimmt vom dritten (14 mm) bis zum sechsten Halswirbel (13 mm) etwas ab und steigt nahezu kontinuierlich bis auf 29 mm am ersten Lendenwirbel an. Mit Ausnahme des fünften Lendenwirbels, der auf Grund seiner "Keilform" eine relativ verringerte hintere Wirbelkörperhöhe aufweist (24 mm), sind die Wirbelkörper der übrigen Lendenwirbel nahezu gleich hoch.

Die graphische Darstellung der Beziehung zwischen der "Länge" der Processus articulares inferiores ( $h_2$ ) und der hinteren Wirbelkörperhöhe ( $h_3$ ) macht deutlich, daß auch hier regionale Unterschiede bestehen (Abb. 16). Vom dritten bis zum sechsten Halswirbel nimmt die Wirbelkörperhöhe relativ ab, bei den oberen Brustwirbeln verschiebt sich das Verhältnis zugunsten der Gelenkfortsätze. Vom fünften Brust- bis zum ersten Lendenwirbel nehmen beide Werte in gleicher Weise zu. Innerhalb der Lendenwirbelsäule ist keine gesetzmäßige Beziehung zu erkennen.

#### 3.1.4.5 Radiologische Darstellbarkeit der Gelenkspalte

Die Literaturangaben über die radiologische Darstellbarkeit der Wirbelgelenke variieren (BAKKE, 1931; LANGE, 1936; OPPENHEIMER, 1941; LIECHTI, 1948; PICHLER, 1955; HADLEY, 1961; REINHARDT, 1963; ERDMANN, 1964, 1967; MARKUSKE, 1971; REICHMANN, 1972; DECKING und ter STEEGE, 1975), nur für den Bereich der mittleren und unteren Hals- sowie der Brustwirbelsäule findet sich weitgehende Übereinstimmung. Probleme ergeben sich aus der individuellen Schwankung des Verlaufes der Gelenkspalte und der Überlagerung mit anderen Skeletteilen.

Maßgebend für die Einstellung des Zielstrahles zur radiologischen Darstellung der Wirbelgelenke sind Öffnungs- und Neigungswinkel. Zwischen dem dritten Hals- und dem ersten Brustwirbel lassen sich die jeweiligen Gelenkpaare auf Grund eines einheitlichen Öffnungswinkels von ca. 180 Grad im lateralen Strahlengang gemeinsam gut abbilden. Die Darstellung des Gelenkspaltes zwischen zweitem und drittem Halswirbel erfordert die Einstellung des Zielstrahles in einem nach dorsal offenen Winkel zur Sagittalebene von ca. 70 Grad. Eine ähnliche Anweisung war in der Literatur nur bei von TORKLUS und GEHLE (1975) zu finden.

Für den Brustbereich erscheint zur Darstellung der Gelenke ein Winkel zwischen 110 bis 120 Grad zur Sagittalebene (gemessen von dorsal her) am zweckmäßigsten.

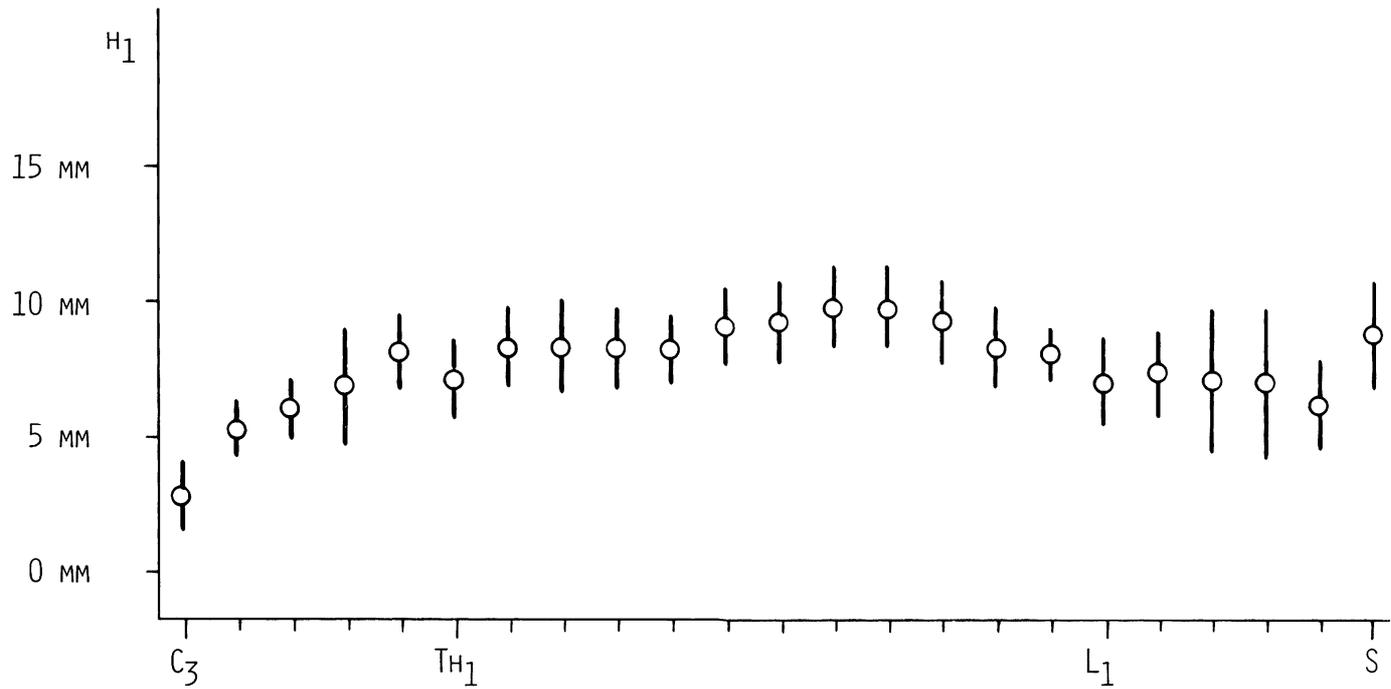


Abb. 13: "Längen" der über das Niveau der oberen Wirbelkörperflächen vorragenden Anteile der Proc.art. sup. ( $h_1$ ), siehe Abb. 2

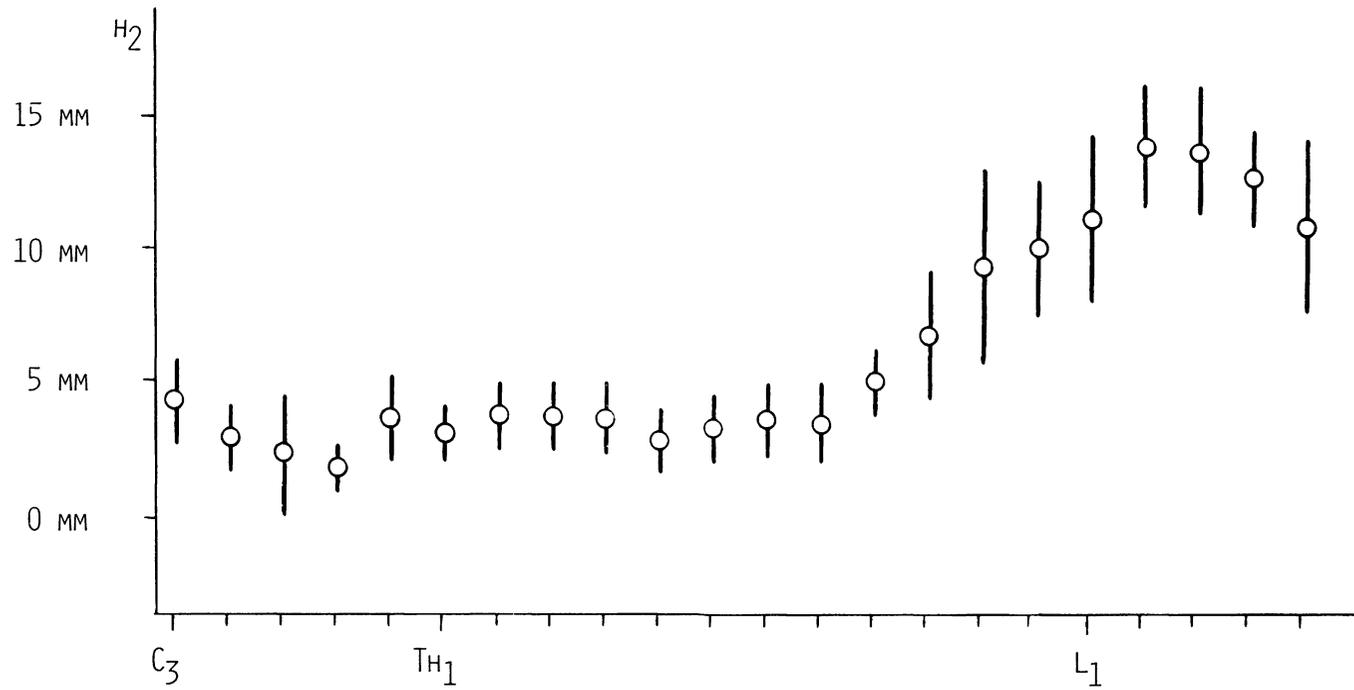


Abb. 14: "Längen" der über das Niveau der unteren Wirbelkörperflächen vorragenden Anteile der Proc. art.inf. ( $h_2$ ), siehe Abb. 2

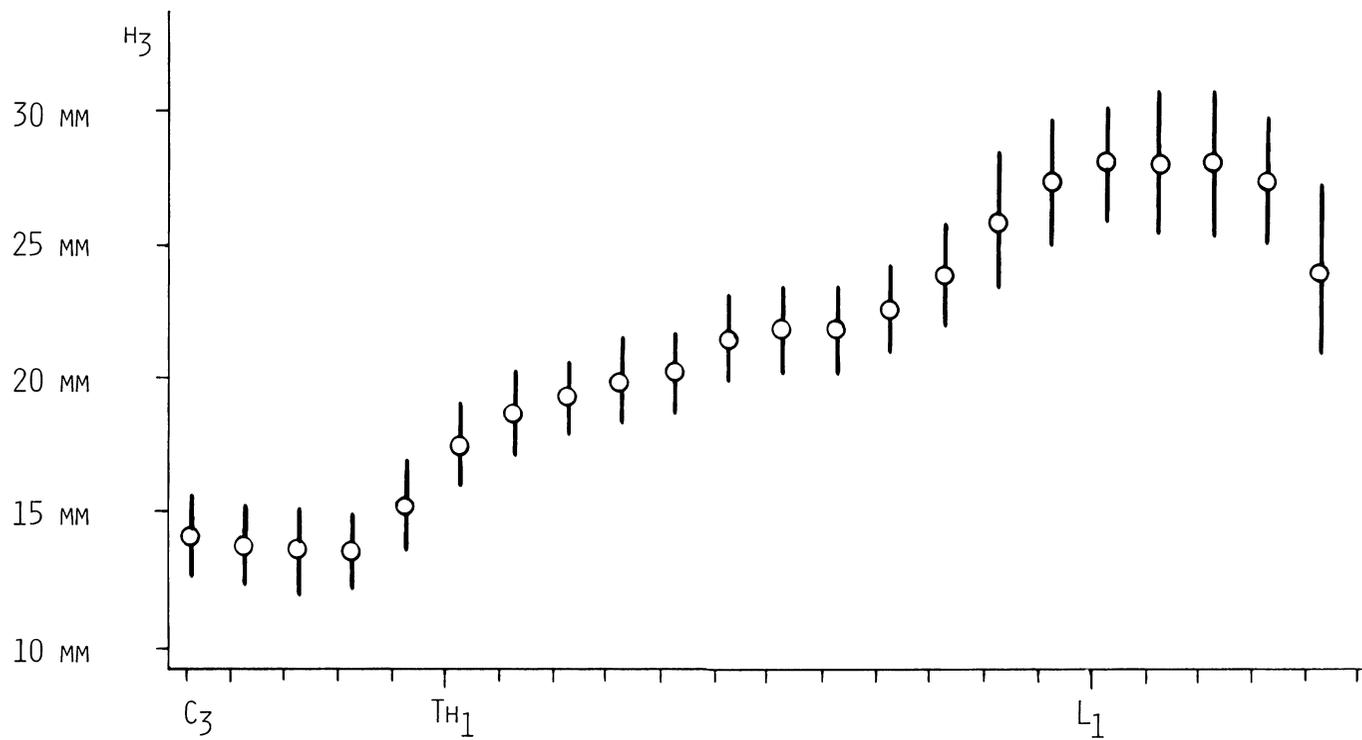


Abb. 15: Hintere Wirbelkörperhöhen ( $h_3$ ), siehe Abb. 2

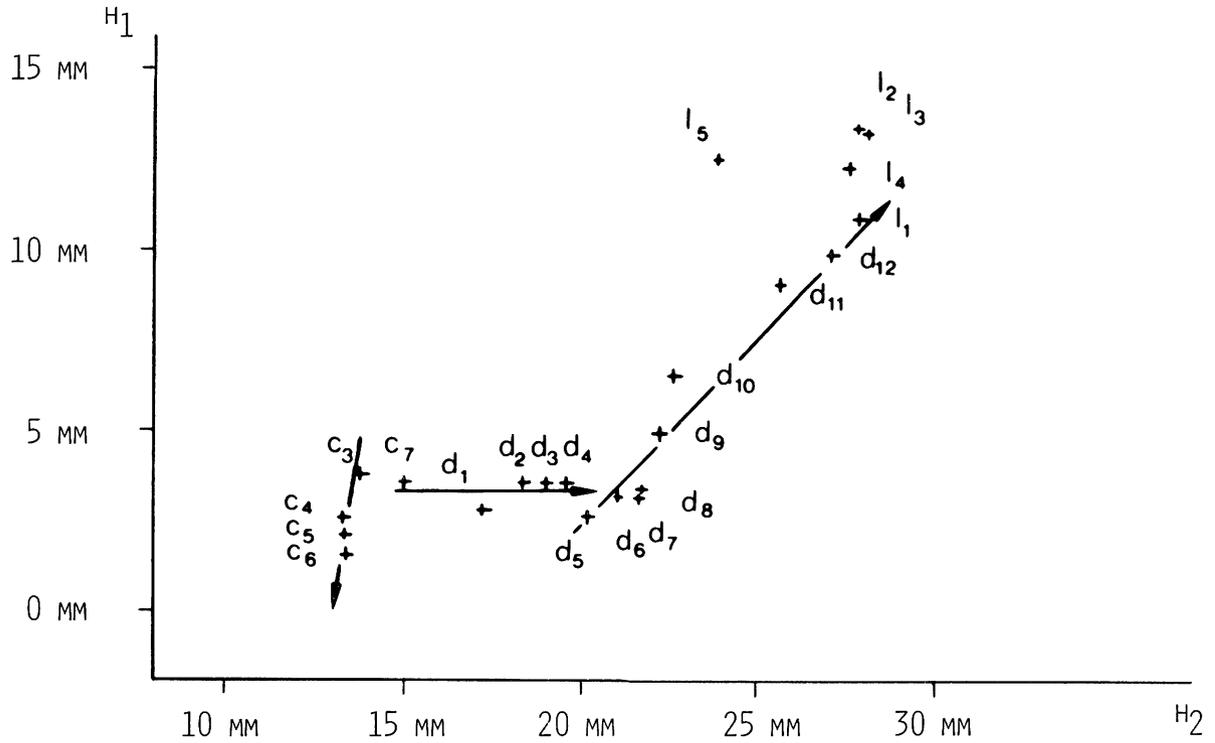


Abb. 16: Korrelation von "Länge" der Proc.art.inf. (h<sub>2</sub>) und hinterer Wirbelkörperhöhe (h<sub>3</sub>)

Die Darstellung der Gelenkspalte im Lumbal- und Lumbosakralbereich wird durch die abgewinkelte Form der Gelenkflächen erschwert. Eine Einstellung von 45 Grad zur Sagittalebene, wie sie in der Literatur mehrfach vorgeschlagen wird (HORWITZ und SMITH, 1940; OPPENHEIMER, 1941; LIECHT1, 1948; HADLEY, 1961; LEWIN, 1968), führt zu einem "Kompromißbild" der lumbalen Gelenke. Die zumeist vorhandene Abwinkelung der Gelenkkörper in der Transversalebene bedingt, daß immer nur ein Teil des Gelenkspaltes orthograd abgewinkelt werden kann (Abb. 4). Die mehr frontal eingestellten Anteile dieser Gelenke sind am besten bei einer Zielstrahleinstellung von 70 - 90 Grad (gemessen von dorsal) darstellbar, während sich die dorsalen, mehr sagittal eingestellten Anteile nur bei einem Winkel von 10 - 30 Grad gut abbilden lassen. Auf Grund der Zunahme des Öffnungswinkels der lumbalen Gelenke nach kaudal erhöht sich dieser Wert für rechtes und linkes Lumbosakralgelenk auf 45 - 60 Grad. Für die allgemeine Orientierung über die Lendenwirbelgelenke wird ein "Kompromißbild" ausreichen, für die spezielle Beurteilung ist aber unter Berücksichtigung der individuellen Variabilität eine Spezialaufnahme in der oben genannten Weise notwendig. Dies gilt besonders für den thorakolumbalen Übergangsbereich, wo die Umstellung vom thorakalen zum lumbalen Einstellungstyp des Gelenkspaltes einer sehr großen individuellen Streuung unterliegt.

Für die Abbildung von Wirbelgelenken, die bei einer Röntgenaufnahme vom Zielstrahl weiter entfernt liegen, ist neben dem Öffnungswinkel auch der Neigungswinkel für eine orthograde Darstellung des Gelenkspaltes maßgeblich von Bedeutung. Je geringer die Einstellung zur Transversalebene und je größer der Abstand vom Zielstrahl ist, desto schlechter läßt sich der Gelenkspalt darstellen.

Neben den herkömmlichen radiologischen Methoden wurde auch die Anwendbarkeit der "axialen Computertomographie" zur Darstellung von Strukturen der Wirbelsäule untersucht (LEE u. a., 1978). Übereinstimmend mit eigenen Untersuchungen ergab sich, daß von den Wirbelgelenken derzeit nur in Ausnahmefällen brauchbare Abbildungen zustandekommen, während die Kontur des Wirbelkanals gut dargestellt wird.

#### 3.1.4.6 Spongiosastruktur der Gelenkfortsätze

Unter Berücksichtigung der Literaturangaben (PAUWELS, 1959; KUMMER, 1959; SCHLÜTER, 1965; TILLMANN, 1977 u. a.) wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen der Struktur der Spongiosa der Gelenkfortsätze und ihrer Beanspruchung herzustellen. Im besonderen wurde geprüft, ob sich im Bereich der Gelenkkörper der Wirbelgelenke Anordnungen der Spongiosabälkchen finden, die auf bevorzugte Beanspruchungsrichtungen schließen lassen. Ergebnisse früherer Untersuchungen lassen vermuten, daß neben reiner Druckbelastung in bestimmten Bereichen der Wirbelsäule auch eine Biegebeanspruchung gegeben sei. Eine Überprüfung unserer Befunde im spannungsoptischen Experiment war uns aus technischen Gründen bislang noch nicht möglich.

#### Processus articulares superiores

In bezug auf die Anordnung der Spongiosa in der Sagittalebene verhalten sich die Gelenkfortsätze aller Wirbel gleichartig. Die entsprechend dem breitbasigen Aufsitzen der Gelenkfortsätze relativ kurzen Knochenbälkchen sind senkrecht auf die Gelenkflächen ein-

gestellt und untereinander durch rechtwinkelig dazu eingestellte Bälkchen verbunden.

Im Gegensatz dazu sind die Spongiosabälkchen in der Transversalebene der Gelenkkörper in den Regionen der Wirbelsäule unterschiedlich angeordnet. Während sie sich in Hals- und Brustwirbelsäule ähnlich wie in der Sagittalebene verhalten, weisen die oberen Gelenkfortsätze der Lendenwirbel eine grundsätzlich andere Anordnung auf. Spongiosabälkchen, die aus der Corticalis der Basis der Gelenkfortsätze hervorgehen, bauen in deren weit nach dorsal und lateral vorragenden Anteilen ein "Spitzbogenmuster" auf (Abb. 17), das in mehreren Ebenen zu beobachten ist. In derselben Weise verhält sich auch die Spongiosa der Processus articulares des Os sacrum. Entsprechend den Literaturangaben läßt sich aus der gefundenen Spongiosaanordnung schließen, daß in den frei ausladenden Enden der Processus articulares superiores der Lendenwirbel eine Biegebeanspruchung in transversaler Richtung gegeben ist.



Abb. 17: Transversalschnitt durch die Proc.art.sup. eines Lendenwirbels (Röntgenaufnahme); die Spongiosabälkchen zeigen eine "spitzbogenartige" Anordnung.

Transversal wirkende Kräfte entstehen bei der Rotation durch lokalen Druck des Processus articularis inferior des nächsthöheren Wirbels und durch die Zugwirkungen von Muskeln und Bändern, die ihren Angriffspunkt am Processus mamillaris haben. Das sind in erster Linie die Musculi rotatores breves und die transversalen Verstärkungszüge der Gelenkkapsel.

#### Processus articulares inferiores

Die Spongiosa der Processus articulares inferiores in der Sagittalebene ist in allen Regionen der Wirbelsäule im Prinzip gleich aufgebaut. Man findet von den Bogenwurzeln ausgehende Spitzbogen-

strukturen, die auf eine Biegebeanspruchung in der Sagittalebene schließen lassen. Diese Anordnung kommt an den Lendenwirbeln sehr deutlich zum Ausdruck und stimmt mit den Befunden verschiedener Autoren von der Formveränderung des Gelenkspaltes in extremer Flexions- bzw. Extensionsstellung überein.

Auf Grund der geringen Größe der nach lateral vorragenden Anteile der *Processus articulares inferiores* kann die Anordnung der Spongiosabälkchen in der Transversalebene nicht ausreichend beurteilt werden. Aus den Röntgenaufnahmen isolierter Schnitte läßt sich eine konstante Anordnung nicht mit Sicherheit angeben. Die Spongiosabälkchen scheinen, von einem dorsal der Gelenkfortsätze gelegenen Zentrum ausgehend, radiär senkrecht auf die Gelenkflächen eingestellt. Eine Spitzbogenstruktur, wie sie in den frei vorragenden Enden der Gelenkfortsätze vermutet werden könnte, konnte nicht nachgewiesen werden.

### 3.2 Gelenkkapsel der Wirbelgelenke

Wie bei den übrigen Gelenken bestehen die Gelenkkapseln der Wirbelgelenke aus einer inneren *Membrana synovialis* und einer äußeren *Membrana fibrosa*. Die *Membrana synovialis* besitzt viele in den Innenraum der Gelenke vorragende "Ausstülpungen", denen eine große Bedeutung für die Entstehung von Rückenschmerzen und sogenannten Blockierungen der Wirbelgelenke beigemessen wird. Von Interesse sind deshalb Lage und Ausdehnung sowie histologischer Aufbau dieser Einrichtungen der Wirbelgelenke.

#### 3.2.1 *Membrana synovialis* der Wirbelgelenke

Die *Membrana synovialis* kleidet die *Cavitas articularis* mit Ausnahme der Gelenkknorpel vollständig aus und wird stellenweise durch ein Füllgewebe von der *Membrana fibrosa* getrennt. Besondere Unterschiede im Verhalten zwischen *Membrana synovialis* und *Membrana fibrosa* ergeben sich im oberen und im unteren Anteil der Wirbelgelenke. An den Grenzen der Gelenkflächen liegt die

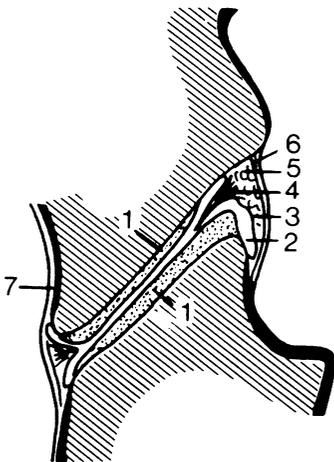


Abb. 18 a

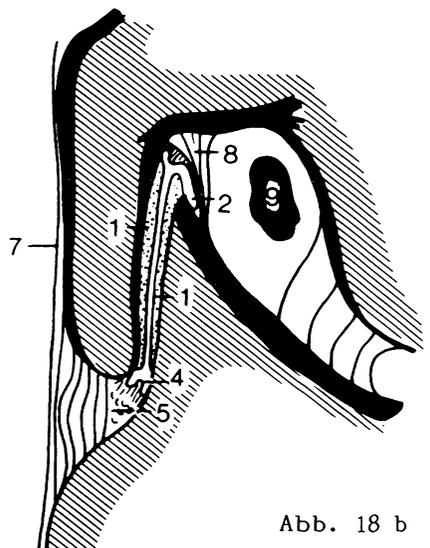


Abb. 18 b

Abb. 18 c

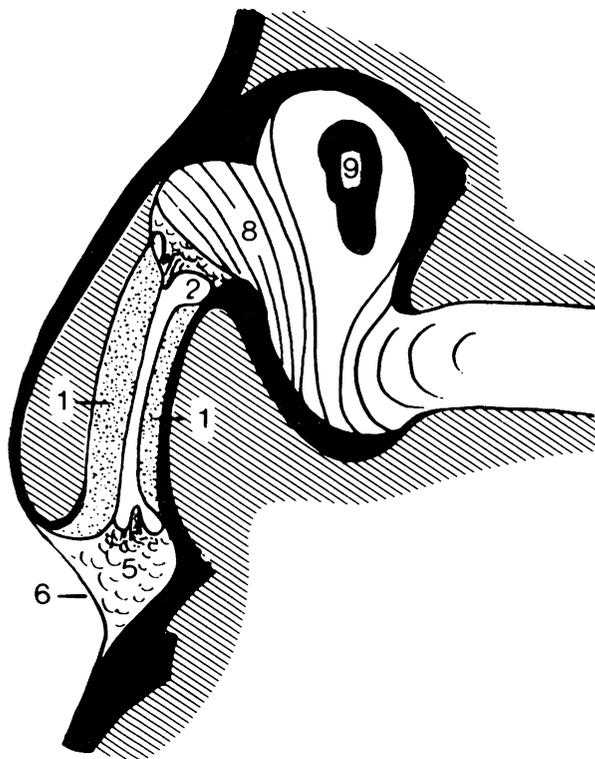


Abb. 18: Schematische Sagittalschnitte durch Wirbelgelenke  
 a Halswirbelgelenke  
 b Brustwirbelgelenke  
 c Lendenwirbelgelenke  
 1 Gelenkkörper  
 2 Recessus des Gelenkspaltes  
 3 Membr. synovialis  
 4 Falten der Membr. synovialis  
 5 Binde- und Fettgewebe  
 zwischen Membr. synovialis  
 und Membr. fibrosa  
 6 Membr. fibrosa  
 7 angrenzendes Periost  
 8 Lig. flavum  
 9 N. spinalis

Membrana synovialis ein Stück dem Periost der Processus articulares an und setzt sich unter Bildung von weiten Ausbuchtungen im Bereich der "Kuppel" und des "tiefsten Punktes" der Gelenkhöhle auf die Membrana fibrosa fort (Abb. 18). Zwischen Membrana synovialis und Knochen lagert sich Binde- und Fettgewebe ein (LEY, 1974). Schon BADGLEY (1941) und LEWIN (1962) weisen auf diese "Recessus" hin. Sie stehen über die seitlichen Ausbuchtungen der Gelenkkapseln, die etwas kleiner ausgebildet sind, miteinander in Verbindung. Funktionell stellen diese Recessus Reserveräume für Extrembewegungen dar.

Rund um die Gelenkflächen sind in allen Wirbelgelenken sehr verschieden aufgebaute und unterschiedlich große Falten (Plicae und Vili synoviales) angeordnet, die häufig weit in den Gelenkspalt vorragen (Abb. 6, 10). Die Lokalisation dieser Gebilde in einzelnen Regionen haben PENNING und TÖNDURY (1964), KOS (1969), LEY

(1974) und BENINI (1978) beschrieben. Eigene Befunde zeigen, daß ihre Anordnung einer sehr großen Variabilität unterliegt und daß sie in den lordotischen Abschnitten der Wirbelsäule besonders zahlreich und ausgedehnt vorhanden sind (Abb. 19).

In der Halswirbelsäule sind größere Plicae synoviales vor allem im Bereich des kranialen und kaudalen Recessus, kleinere am lateralen Umfang der Gelenke ausgebildet (Abb. 20). In den Brustwirbelgelenken findet man vorwiegend kleine Falten rund um die Gelenkflächen, nur vereinzelt treten größere Falten im medialen Anteil der Gelenke auf. Die Lendenwirbelgelenke besitzen besonders viele und verschiedenartige Plicae synoviales (Abb. 21). Sie liegen vor allem im medialen und kranialen Anteil des Gelenkspaltes und stehen mit den Fetteinlagerungen im Bereich der Recessus in Verbindung. Während die Falten in Hals- und Brustwirbelgelenken meist breitbasig von der Gelenkkapsel ausgehen, sind sie in den Lendenwirbelgelenken vorwiegend gestielt und ragen bis zu 6 mm frei in den Innenraum der Gelenke hinein.

Von besonderem Interesse ist der Aufbau der Synovialfalten. In zahlreichen Arbeiten wird versucht, auf Grund histologischer Untersuchungen bestimmte Bezeichnungen zu begründen und damit gleichzeitig einen Hinweis auf ihre funktionelle Bedeutung zu geben. SCHMINKE und SANTO (1932) haben sie als "Disci articulares" beschrieben. Zutreffend wurden die Vorstülpungen der Membrana synovialis in den Halswirbelgelenken von TÖNDURY (1940, 1958) als "meniskoide Falten" benannt. Der Ausdruck "Menisci", wie er vielfach verwendet wurde (ZACCHEO und REALE, 1956; HADLEY, 1961; DÖRR, 1962; LEY, 1974), mag für einzelne Falten gelten, erscheint aber als allgemeine Bezeichnung nicht geeignet, weil die Verschiedenartigkeit des Aufbaues der meniskoiden Falten nicht zum Ausdruck kommt.

ZUKSCHWERDT und Mitarbeiter (1960) sowie EMMINGER (1954, 1967) beschreiben Ähnlichkeiten im Feinbau mit entsprechenden Einrichtungen an vielen kleinen Gelenken des menschlichen Körpers, z. B. Finger- und Zehengelenken. KOS und WOLF (1972), auch BENINI (1978) vertreten die Meinung, daß alle "Menisci" bzw. "meniskoiden Falten" der Wirbelgelenke, im besonderen der Lendenwirbelgelenke, im Prinzip in ein- und derselben Weise aufgebaut seien. Sie unterscheiden einen an die Kapsel fixierten peripheren Anteil, der vornehmlich aus Fett aufgebaut ist, einen mittleren gefäßreichen Abschnitt und eine freie, gefäßlose Randzone aus dichtem kollagenem Bindegewebe, in dem sich mitunter Knorpelzellen befinden sollen.

In den Halswirbelgelenken fanden sich große, derbe Falten, zu denen die Beschreibung "Menisci" am ehesten paßt, vor allem in den Articulationes atlantoaxiales laterales (Abb. 22). Das dicht gepackte Bindegewebe, das diese Falten zum Großteil aufbaut, geht in die Membrana fibrosa der Gelenkkapsel über und umschließt nur im Bereich der Basis Einlagerungen von Fettgewebe.

Die Falten der Brustwirbelgelenke bestehen ebenfalls fast ausschließlich aus festem Bindegewebe, ihre dünnen freien Ränder sind häufig sehr aufgefasert, als wären sie eingerissen.

In den Lendenwirbelgelenken zeigen die Faltenbildungen sowohl von der Gestalt als auch vom Gewebenaufbau her die größte Vielfalt (Abb. 23, 24). Sie sind überwiegend aus Fettgewebe aufgebaut, das reichlich von Blutgefäßen durchzogen wird, und liegen vor

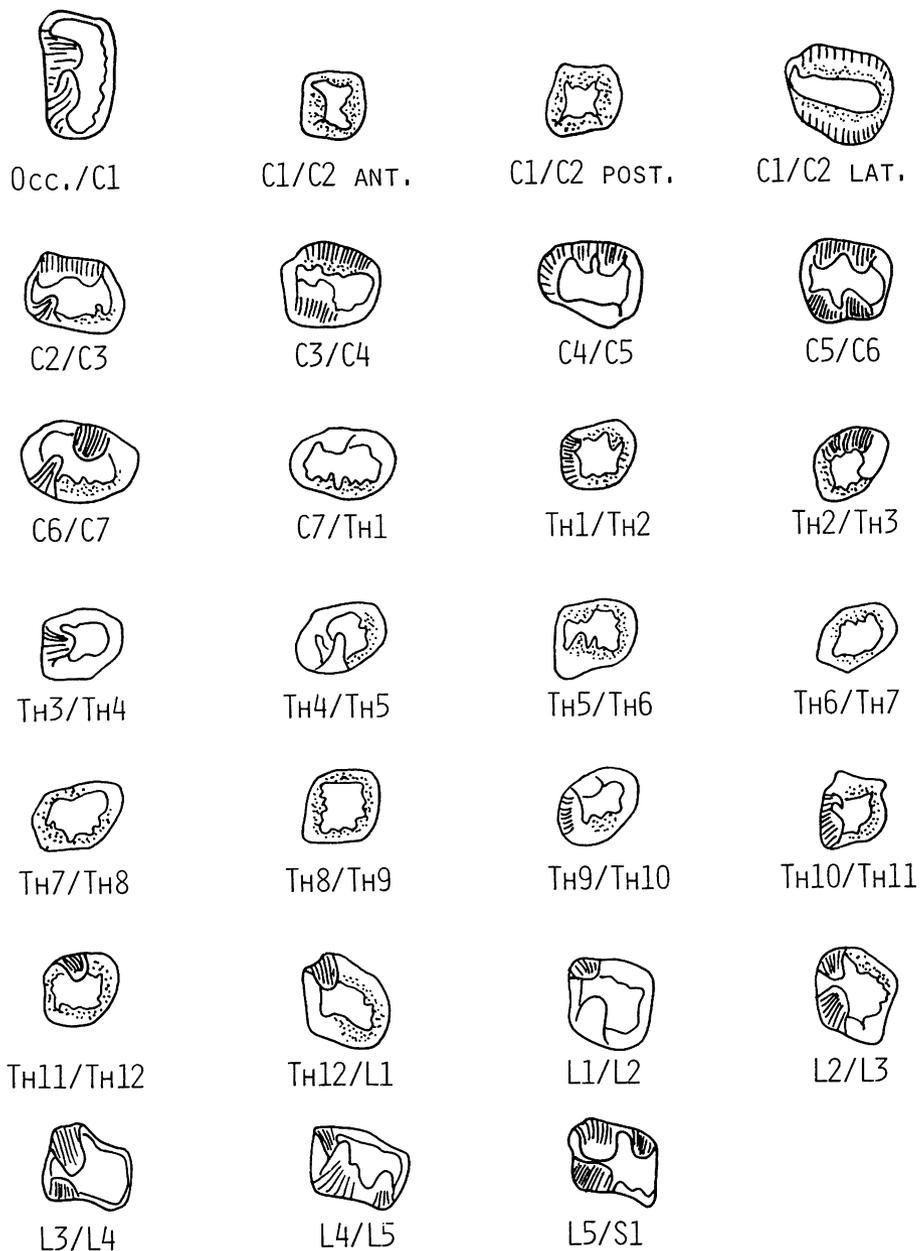


Abb. 19: Anordnung der meniskoiden Falten in den Wirbelgelenken (derbfibröses Bindegewebe - punktiert, Fettfalten - schraffiert)



Abb. 20: Meniskoide Falten in Halswirbelgelenken; sie erfüllen vor allem die kranialen Recessus der Gelenkspalte.



Abb. 21: Meniskoide Falten in einem Lendenwirbelgelenk; sie sind sehr vielgestaltig und treten vor allem in den medialen Anteilen der Gelenke auf.

allen im medialen Gelenkbereich. Einzelne Falten bestehen nahezu ausschließlich aus dicht gepacktem Bindegewebe, das breit mit der Membrana fibrosa in Verbindung steht. Ihre freien Ränder sind oft ausgefranst, im Gelenkspalt findet man manchmal kleine abgerissene Teile davon. Selbstverständlich treten Übergangsformen auf.



Abb. 22: Art.atlantoaxialis lat. und kaudal anschließende Halswirbelgelenke (Sagittalschnitt); die meniskoiden Falten der Halswirbelsäule sind besonders fest gebaut.

Die meniskoiden Falten sind keine Reservefalten der Gelenkkapsel für umfangreichere Bewegungsausschläge; dazu sind genügend Reserveflächen im Bereich der Recessus vorhanden. An Ausgußpräparaten konnte gezeigt werden, daß sie unabhängig von der Füllung der Cavitas articularis und der Verschiebung der Gelenkkörper auch bei größeren Bewegungsausschlägen bestehen bleiben. Sie sind begrenzt verformbare Füllkörper, die sich offensichtlich unabhängig vom Aufbau den Veränderungen des Gelenkspaltes anpassen. Bei allen untersuchten Präparaten wurde auch bei pathologischen Verhältnissen eine genaue Übereinstimmung der Konturen gefunden (Abb. 24). Die fester gebauten meniskoiden Vorstülpungen spielen bei der Druckübertragung in den Gelenken eine Rolle. Ihre Wirkung hängt allerdings von umliegenden Muskeln und Bändern ab, die in bestimmten Haltungen auf Grund ihres Verlaufes von außen her eine Druckwirkung ausüben. Eine derartige Situation ist etwa in den Articulationes atlantoaxiales laterales gegeben.

Eine etwaige "Blockierung" der Wirbelgelenke (ZUKSCHWERDT und Mitarbeiter, 1960) kann bestenfalls durch kleine meniskoide Falten hervorgerufen werden, während eine Beteiligung der größeren, dichter gebauten schwer vorstellbar ist.



Abb. 23: Meniskoide Falte eines Lendenwirbelgelenkes (hist. Schnitt); sie ist reichlich mit Fettgewebe durchsetzt und läuft gegen den freien Rand in faseriges Bindegewebe aus.



Abb. 24: Meniskoide Falte eines pathologisch veränderten Lendenwirbelgelenkes (hist.Schnitt); der Gelenkknorpel ist z. T. zerstört, die Falte gleicht die entstandenen Niveauunterschiede aus.

### 3.2.2 Membrana fibrosa der Wirbelgelenke

In der Literatur finden sich wenige Hinweise über die Membrana fibrosa der Wirbelgelenke. Von einigen Autoren wird sie allgemein als schlaff bezeichnet, von anderen regionentypisch als schlaff oder straff beschrieben. Daraus wird zumeist eine Beziehung zur Beweglichkeit innerhalb der einzelnen Wirbelsäulenregionen hergestellt.

Das kollagene Bindegewebe der Gelenkkapseln geht aus dem angrenzenden Periost hervor. Es bildet je nach Wirbelsäulenregion verschieden große Membranen aus, in denen sich Verstärkungszüge entwickeln, die sich aber nicht als selbstständige Bänder von der Kapsel trennen lassen. Nach den vorliegenden Untersuchungen unterscheidet sich die Membrana fibrosa der Gelenkkapseln der einzelnen Wirbelsäulenregionen neben ihrer Dicke durch den Verlauf ihrer Verstärkungszüge und die Beziehung zu den angrenzenden Bändern und Muskeln.

Die Anheftungslinie der Membrana fibrosa der Gelenkkapsel verläuft in allen Regionen der Wirbelsäule ähnlich (Abb. 25 - 27). Die Spitzen der zugehörigen Gelenkfortsätze ragen frei in die Cavitas articularis vor. An der Basis der Processus articulares setzt die

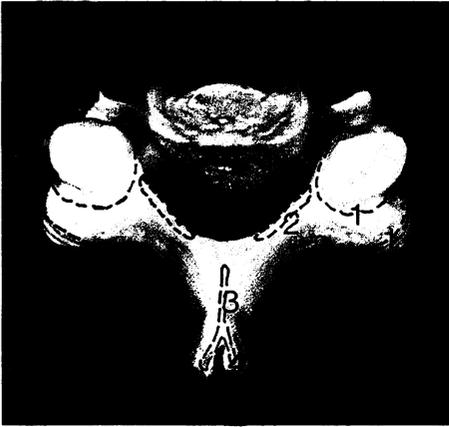


Abb. 25 a

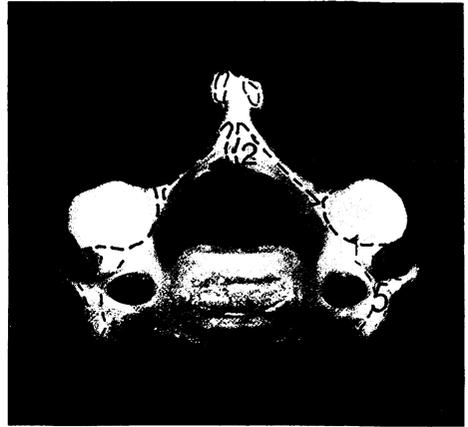


Abb. 25 b

Membrana fibrosa - vor allem in Brust- und Lumbalbereich - weit vom Rand der Gelenkflächen entfernt an. Oft sieht man dabei eine tiefe Rinne, die noch innerhalb der Gelenkhöhle zu liegen kommt. Medial ist hier die Membrana fibrosa sehr dünn, so daß "intra-kapsuläres" Füllgewebe und extrakapsuläres Gewebe scheinbar in Verbindung stehen.

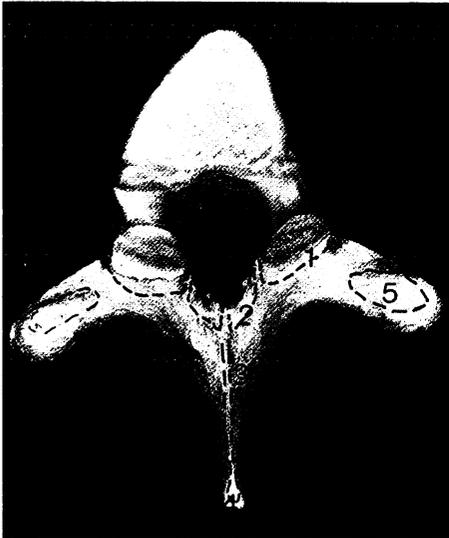


Abb. 26 a

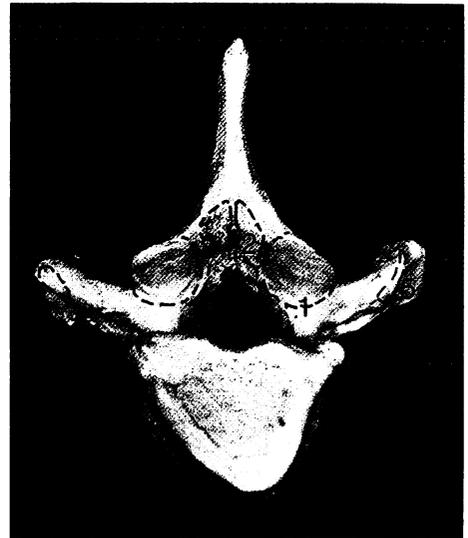


Abb. 26 b

Abb. 27 a



Abb. 27 b

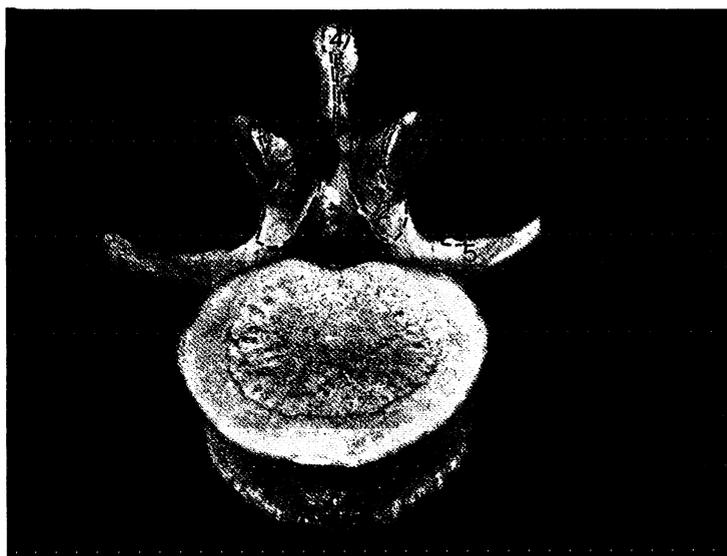


Abb. 25 - 27: Jeweils benachbarte Hals-, Brust- und Lendenwirbel mit eingezeichneten Ansatzflächen von Gelenkkapseln und verschiedenen Bändern

a kraniale Fläche

b kaudale Fläche

1 Membr.fibrosa

2 Lig.flavum

3 Lig.interspinale

4 Lig.supraspinale

5 Lig.intertransversarium

### 3.2.2.1 Verstärkungszüge der Membrana fibrosa

Die Ausprägung der bandhaften Verstärkungszüge der Membrana fibrosa bestimmt Festigkeit der Gelenkkapsel und Beweglichkeit der Gelenkkörper.

Kräftig ausgebildete Faserzüge verlaufen in den Lendenwirbelgelenken von den Außenkanten der Processus articulares inferiores zu den Processus mamillares und den kaudal davon liegenden Anteilen der Processus articulares superiores (Abb. 28, 29). Sie sind transversal eingestellt und in den mittleren Abschnitten der Gelenkkapseln besonders stark ausgebildet, häufig divergieren sie fächerartig nach lateral. Die nach kranial und kaudal anschließenden Anteile sind dagegen wesentlich dünner und lockerer gebaut und lassen kein geordnetes Fasermuster erkennen.

Transversale Verstärkungszüge findet man in allen Gelenken, deren Gelenkspalt die gleiche Einstellung wie die Lendenwirbelgelenke aufweist, also auch fallweise in der untersten Brustwirbelsäule. Auf Grund ihres Verlaufes hemmen sie vor allem das Ausmaß der Ventralflexion. In geringerem Grad begrenzen sie durch die Einschränkung einer Dorsalverschiebung des jeweils kranial davon gelegenen Wirbels Rotation und Dorsalflexion.

In Hals- und Brustwirbelgelenken sind die Kapseln wesentlich dünner als an den Lendenwirbelgelenken (Abb. 30, 31) und weisen keine bandhaften Verstärkungszüge auf. Die äußeren Fasern der

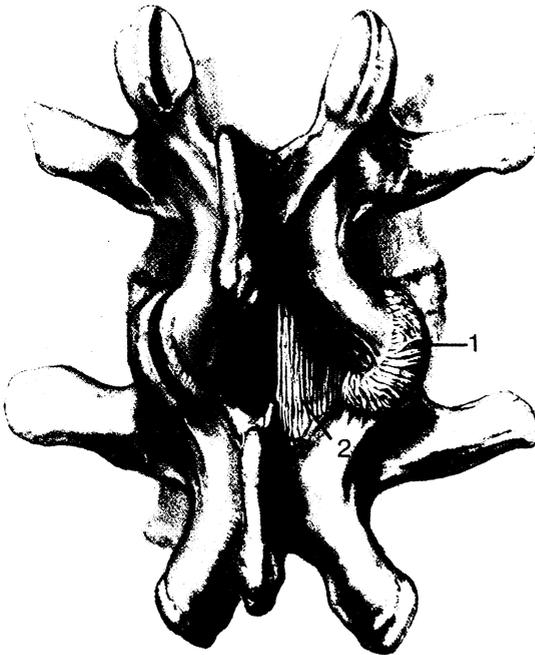
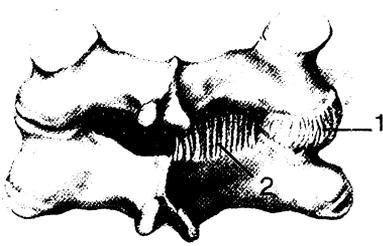


Abb. 28: Lendenwirbelgelenke (Ansicht von dorsal)

- 1 Gelenkkapsel
- 2 Lig. flavum

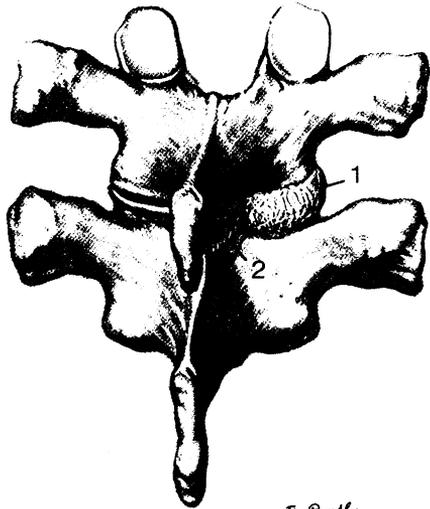


Abb. 29: Polarisationsoptische Aufnahme des dorsalen Anteiles der Gelenkkapsel eines Lendenwirbelgelenkes (hist. Schnitt); die transversalen Verstärkungszüge (1) der Gelenkkapsel liegen ohne Übergangszone den longitudinalen Fasern (2) der Membr. fibrosa an.



*F. Bratke*

Abb. 30: Halswirbelgelenke (Ansicht von dorsal); Erläuterungen siehe Abb. 28



*F. Bratke*

Abb. 31: Brustwirbelgelenke (Ansicht von dorsal); Erläuterungen siehe Abb. 28

Membrana fibrosa sind in der Halswirbelsäule ungefähr longitudinal eingestellt und etwas stärker ausgebildet, während sie an den Brustwirbelgelenken lockerer und weniger geordnet erscheinen. Auf die Beweglichkeit haben sie keinen nennenswerten Einfluß.

### 3.2.2.2 Beziehung der Membrana fibrosa zur benachbarten Muskulatur

In Hals- und Brustbereich liegen die am tiefsten gelegenen Muskelbündel der autochthonen Muskulatur den Gelenkkapseln locker auf, ohne daran zu entspringen. Die Musculi rotatores longi benützen bei ihrer Kontraktion an der ventralflektierten Brustwirbelsäule die Processus articulares inferiores und die angrenzenden Gelenkkapseln als Hypomochlion (Abb. 32).

Faserbündel des Musculus multifidus entspringen an den Kapseln der Lendenwirbelgelenke bis einschließlich der Processus mamillares (Abb. 33) und können so eine Kapselspannung herbeiführen. Bei der Kontraktion der autochthonen Rückenmuskulatur als ganzes entsteht in der sie umschließenden osteofibrösen Röhre eine Druckerhöhung. Besonders bei starker Ventral- und Lateralflexion, aber auch bei der Rotation wird die Gelenkkapsel mit ihren meniskoiden Falten in den Gelenkspalt gepreßt, wodurch eine Vergrößerung der druckaufnehmenden Flächen zustande kommt.

### 3.2.2.3 Beziehung der Membrana fibrosa zu benachbarten Bändern

Im periartikulären Gebiet verlaufen einige Bänder, die in unterschiedlicher Weise zur Membrana fibrosa in Beziehung treten. Die überwiegend kollagenen Bänder werden nach ihren Insertionsstellen benannt (Ligamenta intertransversaria, Ligamenta interspinalia), während die elastischen Faserbündel als Ligamenta flava (früher Ligamenta interarcualia) bezeichnet werden.

In den Abbildungen 25 - 27 ist dargestellt, wie sich die Insertionsgebiete der periartikulären Bänder in den einzelnen Regionen der Wirbelsäule zur Ansatzlinie der Gelenkkapseln verhalten. Sowohl in Hals- und Lendenwirbelbereich der Wirbelsäule treten die Ligamenta intertransversaria in sehr enge Beziehung zur Gelenkkapsel, gehen allerdings nur im Lendenbereich direkte Verbindungen mit der Membrana fibrosa ein. Im thorakalen Abschnitt sind Ligamenta intertransversaria und Gelenkkapsel deutlich voneinander getrennt.

Obwohl die Bänder in den einzelnen Wirbelsäulenregionen entsprechende Teile der Wirbelbogen miteinander verbinden, sind sie in bezug auf ihre Masse und Ausdehnung nicht immer regional vergleichbar. Vor allem die Ligamenta intertransversaria verlaufen in sehr unterschiedlichen Richtungen, weil im Laufe der Phylogenese die Processus transversi in den einzelnen Regionen verschieden in die Wirbelbogen einbezogen wurden.

Im Halsbereich enden die Processus transversi vor und nur wenig lateral von den Processus articulares. Die Ligamenta intertransversaria sind zart und grenzen an den ventrolateralen Umfang der Membrana fibrosa. Sie weisen eine Reihe von kleineren Foramina auf, durch die Blutgefäße und Nerven auf die Außenfläche der Wirbelbogen gelangen.

Die Processus transversi der Brustwirbel (I - X) ragen dagegen weit nach lateral bzw. schräg dorsal vor. Die Ligamenta intertransversaria sind entsprechend der Ausrichtung der Processus nahezu frontal eingestellt und lassen nach medial hin einen großen Raum zum Durchtritt von Gefäßen und Nerven frei.

Im Lumbalbereich entsprechen den Processus transversi der übrigen Wirbelsäule die Processus accessorii. Zwischen diesen Fortsätzen,



Abb. 32: Mm.rotatores breves (1) und Mm.rotatores longi (2) in der Brustwirbelsäule



Abb. 33: Ursprung des M. multifidus von den Verstärkungszügen der Gelenkkapseln (Pfeile) der Lendenwirbelgelenke (Lendenwirbelsäule von dorsal - linke Seite)

die sich in enger Nachbarschaft zu den Processus articulares befinden, ziehen Fasern, die ihrer Lage nach auch in diesem Bereich als Ligamenta intertransversaria bezeichnet werden müssen. Sie erscheinen jedoch nur als der mediale Rand einer sehnigen Platte, die sich nach lateral hin in das tiefe Blatt der Fascia lumbodorsalis fortsetzt. Die genannten Faserzüge begrenzen große Löcher, durch die die Rami dorsales der Spinalnerven sowie Gefäße hindurchtreten. Sie nehmen damit eine gewisse Schutzfunktion für diese Gebilde wahr.

Die Ligamenta flava verbinden die Wirbelbögen, sie treten im Bereich der Halswirbel mit ihrem lateralen Rand als schmale, vertikal eingestellte Platte schräg an die Gelenkkapsel heran. Dazwischen bleibt ein kleiner Raum frei, der mit lockerem Gewebe erfüllt ist. Im Bereich der unteren Halswirbel rückt das Ansatzfeld der Ligamenta flava an der kaudalen Fläche der Wirbelbögen weiter nach vorne und nach lateral, der Raum zwischen Ligamentum und Gelenkkapsel wird wesentlich eingeengt. Die Ligamenta flava der Brustwirbelsäule divergieren in jedem Segment nach kranial und sind zudem nach vorne geneigt. Dadurch erhalten sie eine dachziegelartige Ausrichtung. Sie umfassen die Spitzen der Processus articulares superiores teilweise von medial und legen sich eng an die Gelenkkapseln an (Abb. 34).

Auch in der Lendenwirbelsäule werden die Processus articulares superiores bis zur Basis der Processus articulares inferiores hin von den lateralen Anteilen der Ligamenta flava umgriffen. An der kaudalen Seite der Wirbelbögen ist im Vergleich zu den übrigen Wirbeln die Ansatzfläche noch weiter nach lateral ausgedehnt. (1976 konnte FASANA ähnliche Verhältnisse an Cercopithecidae -



Abb. 34 a

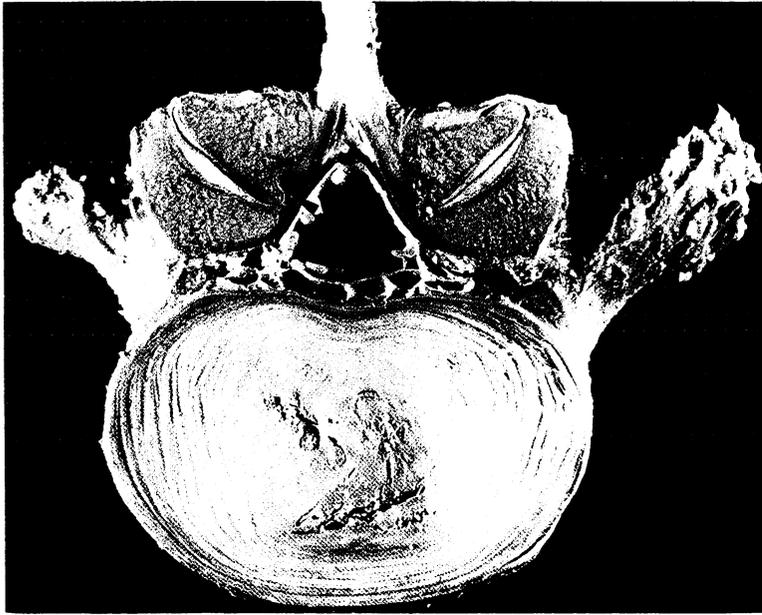


Abb. 34 b

Abb. 34: Lagebeziehung der Ligg.flava zu den Wirbelgelenken (Transversalschnitte)

a Brustwirbelgelenke, kranialer Anteil; die Ligg.flava umgreifen die Spitzen der Proc.art.sup..

b Lumbosakralgelenke, mittlerer Anteil; die Ligg.flava sind im medialen Bereich der Gelenke wulstartig verdickt und umgreifen die Proc.art.sup..

meerkatzenartige Affen - feststellen.) Nach den vorliegenden Befunden ersetzt das Ligamentum flavum nicht die Membrana fibrosa der Gelenkkapsel, wie dies von LEWIN (1968) und YONG - HING und Mitarbeitern (1976) dargestellt wird.

Im thorakolumbalen und im lumbosakralen Übergangsbereich findet man im Anheftungsbereich der Ligamenta flava bei sehr vielen Präparaten scharfe Knochenzacken, die in Faserrichtung verlaufen (Abb. 35, 36). Diese Zacken sind manchmal sehr groß und im seitlichen Röntgenbild sichtbar. Meist werden sie jedoch von anderen Strukturen überlagert, so daß ihre Größe erst am anatomischen Präparat erkennbar ist. In der Literatur wird nur vereinzelt auf derartige Zacken hingewiesen (BAKKE, 1931; LIECHTI, 1944; JUNGHANN, 1968), die als Ausdruck einer allgemein chronisch - degenerativen Veränderung angesehen und zum Formenbild der Arthrosis deformans gerechnet werden. Das Auftreten dieser Knochenzacken steht offenbar nicht in direktem Zusammenhang mit dem Lebensalter. Abbildung 36 zeigt derartige Veränderungen am Brustwirbel eines juvenilen Individuums.



Abb. 35 a

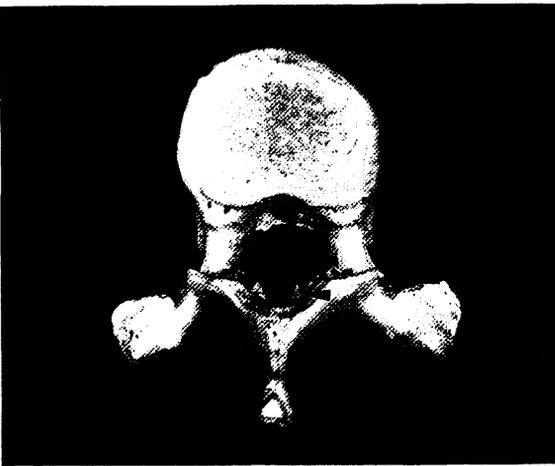


Abb. 35 b

Abb. 35: Kochenzacken (Pfeil) im Ansatzgebiet der Ligg.flava eines 10. Brustwirbels

a Ansicht von dorsal

b Ansicht von kaudal

STOFFT, WIEBECKE und MÜLLER (1968) fanden im Insertionsgebiet der Ligamenta flava Knorpel­einlagerungen. THURNER und BODNER (1963) beschreiben Umbauvorgänge, die zum Auftreten von Knochen­spornen auf Sehnenansatz­flächen führen können.

Die am weitesten lateral gelegenen Knochen­zacken sind dem vorderen Anteil der Gelenkkapsel der Wirbel­gelenke benachbart. Diese enge topographische Beziehung kann Ursache für Funktions­störungen und Schmerzen der Wirbel­gelenke werden.

Die Ligamenta interspinalia grenzen zwar nicht unmittelbar an die Gelenkkapseln, sind jedoch auf Grund ihres Faserverlaufes für deren Funktion von Bedeutung. Nach den Untersuchungen von HEYLINGS (1978) ziehen sie nicht in Längsrichtung der Wirbelsäule, wie vielfach angenommen wird, sondern verlaufen in einer S-Form annähernd fächerförmig von der Wurzel des Processus spinosus des kaudalen Wirbels zur Unterkante des kranial angrenzenden Processus spinosus (Abb. 37). Damit stehen sie einer Spreizung der Processus spinosi nicht im Wege, verhindern aber eine Verschiebung des jeweils kranial gelegenen Wirbels nach dorsal. Nur BRAUS - ELZE (1921, 1954) geben in einer schematischen Darstellung einen ähnlichen Bandverlauf wieder, gehen jedoch auf die Konsequenzen nicht ein, die sich daraus für die Beweglichkeit ergeben.

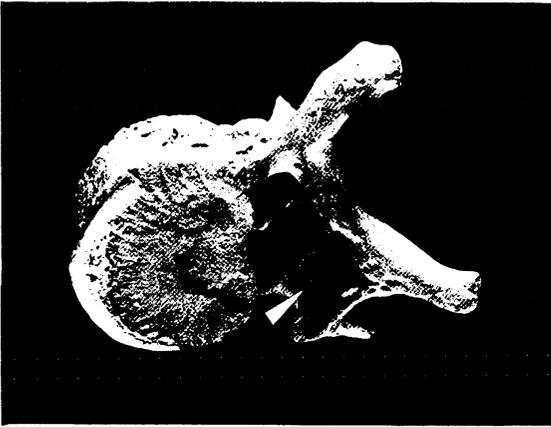


Abb. 36: Knochenzacken (Pfeile) im Ansatzgebiet der Lig.flava eines Brustwirbels von einem noch nicht erwachsenen Individuum

*Lig. intersp.*

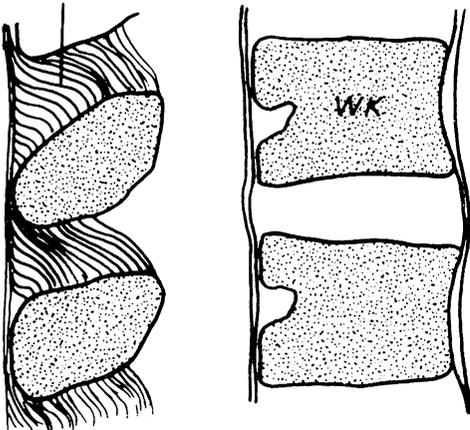


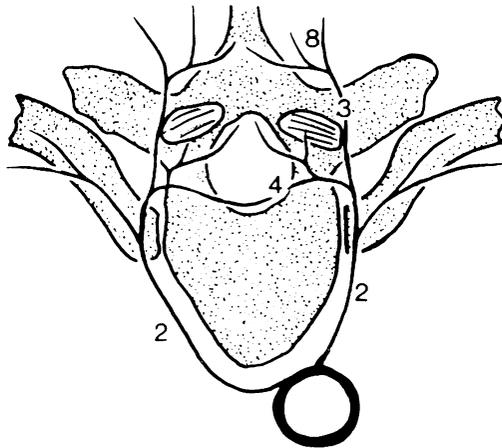
Abb. 37: Anordnung der Faserbündel des Lig.interspinale (unter Verwendung einer Abb. von HEYLINGS, 1978)

### 3.3 Gefäßversorgung der Wirbelgelenke

#### 3.3.1 Arterielle Versorgung

Die arterielle Versorgung der Wirbelgelenke und ihrer näheren Umgebung erfolgt in den einzelnen Regionen in unterschiedlicher Weise. Die Äste zur Gelenkkapsel stammen an Brust- und Lendenwirbelsäule aus Segmentalarterien (*Arteriae intercostales posteriores*, *Arteriae lumbales*, für das am weitesten kaudal gelegene Foramen intervertebrale die *Arteria iliolumbalis*). Die Wirbelgelenke des Halses werden von Ästen der *Arteria vertebralis*, der *Arteria pharyngea (cervicalis) ascendens*, die unteren zusätzlich von Ästen der *Arteria cervicalis profunda* (CLEMENS, 1957, 1970; PERNKOPF, 1960; KOS, 1969) sowie der *Arteria intercostalis suprema* (JELLINGER, 1966) versorgt.

Im zervikothorakalen Übergangsbereich soll eine Versorgung auch über die *Arteria thyroidea inferior* (YU CHE, 1966) erfolgen.



**Abb. 38:** Schema der segmentalen arteriellen Versorgung der Wirbelsäule (Brustwirbelsäule - Transversalschnitt); Erläuterungen siehe Abb. 39

Die genannten Arterien geben nahe dem lateralen Ausgang des jeweiligen Foramen intervertebrale den *Ramus dorsalis* ab (Abb. 38), der sich in den *Ramus spinalis*, den *Ramus cutaneus medialis* sowie den *Ramus cutaneus lateralis* aufteilt. Für die Versorgung der *Processus articulares superiores* und *inferiores* ist in erster Linie der *Ramus cutaneus medialis* verantwortlich (Abb. 39 - 41).

Aus dem *Ramus cutaneus medialis* tritt von der lateralen Seite regelmäßig je eine kleine Arterie an den *Processus articularis superior* sowie an den *Processus articularis inferior* heran. RUNGE und ZIPPEL (1976) nennen diese Gefäße *Arteria arcus vertebrae*



Abb. 39: Arterielle Versorgung der Halswirbelgelenke

- 1 A.vertebralis
- 2 Segmentalarterie (A.intercostalis)
- 3 R.dorsalis
- 4 R.spinalis
- 5 intersegmentale Anastomose
- 6 A.arcus vertebrae lateralis superior
- 7 A.arcus vertebrae lateralis inferior
- 8 Muskel- und Hautäste

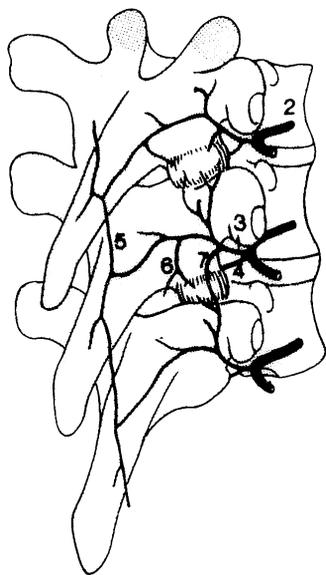


Abb. 40: Arterielle Versorgung der Brustwirbelgelenke; Erläuterungen siehe Abb. 39

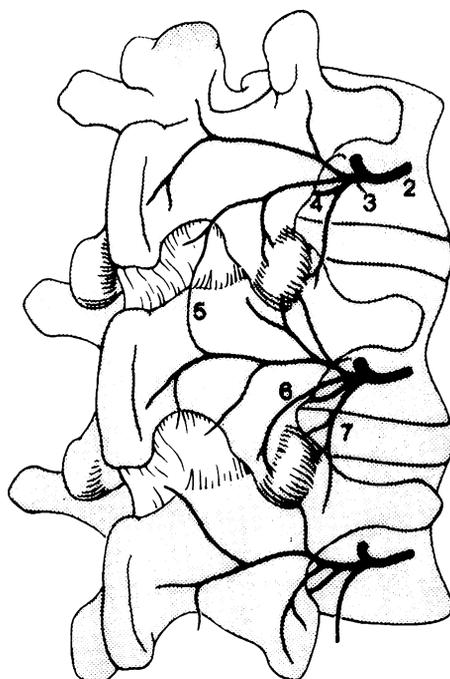


Abb. 41: Arterielle Versorgung der Lendenwirbelgelenke; Erläuterungen siehe Abb. 39

lateralis superior und inferior (Abb. 42). Feine Ästchen, die entweder aus diesen Arterien oder aus dem Ramus cutaneus medialis stammen, treten hier mit dem lateralen und unteren Anteil der Gelenkkapsel in Kontakt. Die Versorgung des oberen Antei'es der Gelenkkapsel erfolgt durch direkte Äste aus dem Ramus dorsalis.



Abb. 42: Injektionspräparat (Plastoid - Brustwirbelsäule) der A. arcus vertebrae lateralis superior (6) et inferior (7)

Der Ramus cutaneus medialis verläuft über die Basis des zugehörigen Processus spinosus hinaus kranialwärts bis in die Höhe des Ligamentum flavum. Nach LEWIN (1968) erreichen seine Verzweigungen auch den medialen Teil der Gelenkkapsel, die hier mit dem Ligamentum flavum in enger Verbindung steht. Der Autor stellt aber selbst in Frage, ob die Kapselwand auf diese Weise ausreichend mit Blut versorgt werden kann, da nach HERZOG (1949) die Blutgefäße des Ligamentum flavum vom zwanzigsten Lebensjahr an hyalin degenerieren. Am vorliegenden Material konnte beobachtet werden, daß von den feinen Ästchen, die aus dem Ramus dorsalis

zum kranialen Teil der Gelenkkapsel ziehen, zumeist Ausläufer bis zu ihrem medialen Umfang verlaufen.

Die arteriellen Verzweigungen, die um das einzelne Wirbelgelenk ein Rete articulare aufbauen, versorgen auch das angrenzende Periost und damit den Knochen, von dem die Membrana fibrosa entspringt.

Am lateralen und unteren Umfang der Basis der Processus articulares superiores sowie an der lateralen Fläche der Processus articulares inferiores treten feine Arterienverzweigungen durch größere Foramina in den Markraum des Knochens. Sie entspringen zum geringeren Teil aus dem Ramus dorsalis, öfter stammen sie aus dem Ramus cutaneus medialis (YU CHE, 1966). Nach CLEMENS (1961) erfolgt die Versorgung des Knochengewebes selbst vom Periost aus über die Volkmann'schen Kanäle.

Die von den Rami dorsales aufgebauten arteriellen Netze der Wirbelgelenke stehen mit Netzen der gleichen und der Gegenseite in Verbindung, wie sich an Injektionspräparaten zeigen ließ (FERGUSON, 1950; CROCK und YOSHIZABA, 1977; LOUIS, 1978). Dies ist in allen Wirbelsäulenregionen der Fall.

Besondere Verhältnisse ergeben sich für die arterielle Versorgung der Kopf Gelenke (Abb. 43). Wie in der übrigen Halsregion übernehmen auch hier die Äste der Arteria vertebralis die Versorgung der Wirbelgelenke (FISCHER u. a., 1977). Nach dem vorliegenden Material bestehen zusätzliche Anastomosen zu den vorderen tiefen Halsarterien. Eine Verbindung zur Arteria carotis interna, wie sie von SCHIFF und PARKE (1973) beschrieben wurde, konnte nicht gefunden werden.

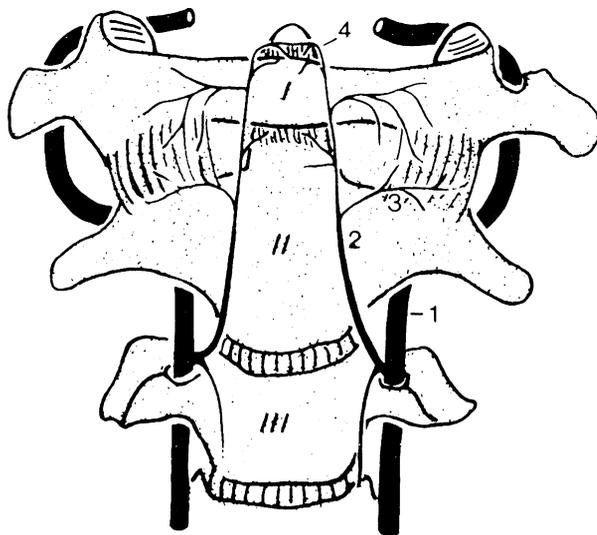


Abb. 43: Schema der arteriellen Versorgung der Kopf Gelenke (unter Verwendung einer Abb. von SCHIFF und PARKE, 1973)

- 1 A.vertebralis
- 2 A.ascendens anterior
- 3 Rr.articulares
- 4 Arcus apicalis axis

An den Kopfgelenken ziehen zu den dorsalen Anteilen der Gelenkkapseln Äste aus der Arteria vertebralis, die den Rami dorsales der Segmentalarterien entsprechen. Die vorderen Anteile werden von der Arteria ascendens anterior versorgt (SCHIFF und PARKE, 1973). Sie entspringt aus der Arteria vertebralis unterhalb des Axis, zieht an dessen Vorderfläche nach kranial und bildet zur Gegenseite hin den Arcus apicalis axis aus. Die Processus articulares superiores des Axis werden von dorsal her erreicht, am lateralen Umfang des Foramen vertebrale tritt ein direkter Ast der Arteria vertebralis in den Axisbogen ein.

### 3.3.2 Venöser Abfluß

In der Nähe der Wirbelgelenke erstrecken sich zwei dichte Venenplexus, die von BATSON (1957) und CLEMENS (1961) im Detail beschrieben wurden. Der Plexus venosus vertebralis externus posterior liegt zwischen der Basis der Processus spinosi sowie den Processus transversi den Wirbelbogen und damit den Gelenken dorsal an. Im Wirbelkanal ziehen in Längsrichtung Venen, die untereinander durch Queranastomosen in Verbindung stehen und den Plexus venosus vertebralis internus posterior bilden. Knochenvenen der Wirbelbogen und damit der Processus articulares münden in die benachbarten Plexus. Nach CLEMENS (1961) kann sich die Strömungsrichtung innerhalb der Plexus venosi vertebrales ändern, da diese klappenlos sind. Das Blut aus den Wirbelbogen und den Processus articulares kann in Anpassung an die jeweiligen örtlichen Druckverhältnisse entweder in den dorsalen oder in den ventralen Plexus abfließen.

Nach eigenen Injektionsuntersuchungen stehen die Plexus durch kleine Venen mit den Venae intercostales, Venae lumbales und der Vena vertebralis in Verbindung. Diese Venen verlaufen parallel zu den Arterien, die die Gelenkkapsel versorgen.

### 3.4 Nervenversorgung der Wirbelgelenke

Die Wirbelgelenke werden von Ästen der in den zugehörigen Foramina intervertebralia verlaufenden Spinalnerven versorgt. Vor Austritt aus dem Foramen intervertebrale gehen aus dem Nervus spinalis der Ramus dorsalis und der Ramus meningeus hervor (Abb. 44). Der Ramus dorsalis verläuft in einer Rinne zwischen Processus articularis superior und Processus transversus des jeweils tiefer liegenden Wirbels und ist hier gemeinsam mit begleitenden Gefäßen eng von den medialen Ausläufern des Ligamentum intertransversarium eingeschleitet (BRAUS - ELZE, 1921, 1956). Der Ramus dorsalis zieht um die Basis des Processus articularis dorsal herum und erreicht weiter medial, der Lamina arcus anliegend, die Basis des Processus spinosus (Abb. 45). Er versorgt mit einem Ramus medialis und Ramus lateralis Gelenkkapsel, Muskulatur und Haut. In den Arcus vertebrae treten nach STILLWELL (1956) beim Rhesusaffen (*Macacus rhesus*) kleine, dünne Äste ein.

Der Ramus meningeus zieht rückläufig in das Foramen intervertebrale und in den Canalis vertebralis, wo er einen nervösen Plexus aufbaut.

Auf Grund seines Verlaufes und seines Verhaltens zum Venenplexus des Foramen intervertebrale wurde der Ramus meningeus von LUSCHKA (1862) als Nervus sinu-vertebralis bezeichnet, manchmal wird er als Ramus recurrens beschrieben. CLARA (1959) nennt ihn

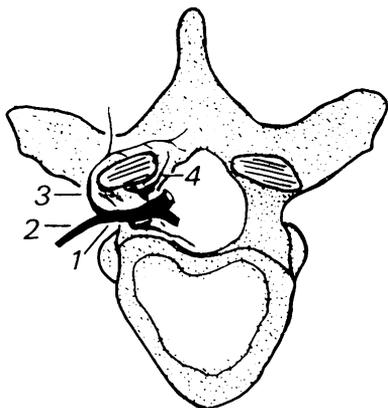


Abb. 44: Schema der segmentalen Nervenversorgung der Wirbelsäule (Brustwirbelsäule - Transversalschnitt)

- 1 N.spinalis
- 2 R.ventralis
- 3 R.dorsalis
- 4 R.meningeus

Ramus duralis, was weitgehend dem heutigen Terminus entspricht. Dem Ramus meningeus wird für die Schmerzempfindung im Bereich der Wirbelsäule eine besondere Bedeutung beigemessen (HROMADA, 1961; VELE, 1968; CLEMENS, 1971; EDER und TILSCHER, 1978).



Abb. 45: Brustwirbel von dorsal; der R.dorsalis und seine Verzweigungen - R.medialis (1) und R.lateralis (2) - ziehen in einem Kanal zwischen Proc.art.sup., Proc.art.inf. und Lig.intertransversarium zur Dorsalseite.



Abb. 46: Verzweigung des R.dorsalis (1); intersegmentale Anastomosen (2) versorgen M.multifidus und Mm.rotatores.



Abb. 47: 5. Lendenwirbel mit verknöcherten Anteilen des Lig.intertransversarium (Pfeil)

Während verschiedene Autoren, wie EMMINGER (1954), PEDERSEN, BLUNCK und GARDNER (1956), LEWIN (1962, 1968), CLEMENS (1971), FRICK, LEONHARDT und STARCK (1977) für die Versorgung der Wirbelgelenke ausschließlich den Ramus dorsalis nennen, geht aus den Untersuchungen anderer Autoren (LAZORTHES, 1966; LOEWENECK, 1966; GRIEVE, 1975; KUNERT, 1975) und eigenen Präparaten hervor, daß auch Verzweigungen des Ramus meningeus zum vorderen Anteil der Gelenkkapsel ziehen. Nach STOFFT (1977) entspringt der Ramus meningeus mitunter aus dem Ramus dorsalis. GRIEVE (1975) bringt ihn in engen Zusammenhang mit dem Sympathikussystem und fand, daß der Ramus meningeus im zervikalen Bereich aus dem sympathischen Geflecht der Arteria vertebralis, im thorakalen Abschnitt aus den Ganglien des Grenzstranges hervorgeht.

An den Kopfgelenken stammen die Nervenäste für die dorsalen Anteile der Kapseln aus dem Ramus ventralis der Spinalnerven von C<sub>1</sub> und C<sub>2</sub> (LOEWENECK, 1966). Zusätzlich treten direkte Äste aus dem Ramus meningeus an die Kapseln, vor allem an den ventralen Anteil der Articulatio atlantoaxialis lateralis. Die Gelenkkapseln der lumbalen Wirbelgelenke sollen nach LOEWENECK (1966) ausschließlich vom Ramus dorsalis des zugehörigen Spinalnerven versorgt werden. Einen ähnlichen Befund erhob STILLWELL (1956) an Rhesusaffen.

Eine Reihe von Autoren (LAZORTHES, 1966; CLEMENS, 1971; KUNERT, 1975; STOFFT, 1977) stellt fest, daß das Versorgungsgebiet der einzelnen Nervi spinales nicht auf das Wirbelgelenk des zugehörigen Bewegungssegmentes beschränkt bleibt; Anastomosen zwischen benachbarten Rami dorsales lassen sich vor allem im Lumbal- sowie im Halsbereich regelmäßig darstellen (Abb. 46). Nach den Untersuchungen von PEDERSEN, BLUNCK und GARDNER (1956) an Katzen verlaufen Nervenverzweigungen aus dem jeweils kranial gelegenen Ramus dorsalis über die Wirbelgelenke hinweg zu den kaudal davon liegenden Ligamenta interspinalia. SCHMORL - JUNGHANNS (1968) weisen ebenfalls darauf hin, daß ein Bewegungssegment nie monoradikular versorgt wird und begründen dies mit "Grundvorgängen der Segmentierung der Wirbelsäulenanlage und ihrer Anhänge".

Auf eine besondere Varietät soll in diesem Zusammenhang aufmerksam gemacht werden, die bisher im Schrifttum nicht beschrieben wurde. Die am weitesten medial gelegenen Bindegewebszüge der Ligamenta intertransversaria können verknöchern. Da in diesem Bereich die Rami dorsales von Arteria und Nervus spinalis verlaufen, ist hier die Entwicklung eines schmerzhaften Engstellensyndroms denkbar (Abb. 47).

## 4 Entwicklung der Wirbelgelenke

### 4.1 Allgemeines zur Entwicklung der Wirbelsäule

Während sich die Gelenke der Extremitäten durch Spaltbildungen in einheitlichen, mesenchymalen Blastemen ausbilden ("Abgliederung", STARCK, 1975), entstehen die Wirbelgelenke durch Aneinanderlagerung von bereits weitgehend differenzierten Anteilen der Wirbelbogen. Im Verlaufe dieses als "Angliederung" bezeichneten Entwicklungsvorganges bilden sich im Berührungsgebiet der Vorstufen der *Processus articulares* zuerst Spalträume ("Schleimbeutel"), aus denen unter Einfluß der Funktion die Gelenkspalte hervorgehen.

Die Primitiventwicklung der Wirbelsäule beginnt beim Keimling in der vierten Embryonalwoche (SSL = ca. 2 - 3 mm) mit der Auswanderung von Zellen aus den "Sklerotomen", die intersegmental von kleinen Gefäßen begrenzt werden, in Richtung auf die *Chorda dorsalis* (TÖNDURY, 1958; RUNGE und ZIPPEL, 1976). Die Sklerotom-derivate bauen um die *Chorda dorsalis* die "Perichordalröhre" auf. In jedem Segment ordnet sich das Zellmaterial rasch in je ein kaudales, zell dichteres und ein kraniales, etwas lockereres Blastem, die "Skleromiten" (Abb. 48). Nach SENSENIG (1949) soll eine Sklerotomfissur an der Stelle der späteren kaudalen Wirbelkörperenden auftreten. Die ursprünglich zwischen den Sklerotomen gelegenen Blutgefäße kommen nach Abschluß des Umgliederungsvor-

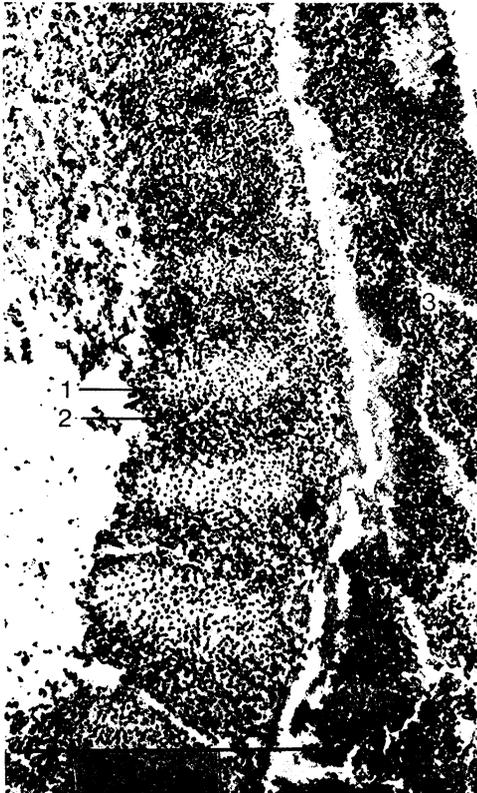


Abb. 48: Sagittalschnitt durch die Brustwirbelsäule eines menschlichen Embryos (ca. 5. EW, SSL 10 mm)  
 1 kranialer Skleromit  
 2 kaudaler Skleromit  
 3 Rückenmarksanlage

ganges intrasegmental und damit an die Seite der sich bildenden Wirbelkörper zu liegen. Unklarheiten bestehen nach wie vor über die Zuordnung der Skleromitenanteile zu Wirbelkörpern einerseits und Zwischenwirbelscheiben andererseits (REITER, 1943; PRADER, 1947; TÖNDURY, 1958; BAUR, 1969). Von den dichteren Skleromiten sprossen ab der fünften Embryonalwoche (SSL = ca. 10 mm) nach dorsal Zellen aus (Abb. 49), die als *Processus neurales* beiderseits der Rückenmarksanlage zu liegen kommen. Zugleich differenzieren sich die Zellen im Gebiet der zukünftigen *Disci intervertebrales*. Diese werden von kranial und kaudal her zunehmend eingedellt und lassen eine innere und äußere Zone erkennen. Fibrillen sind nach TÖNDURY bereits ab einer SSL von ca. 20 mm (sechste Embryonalwoche) zu erkennen; sie strahlen in die angrenzenden nunmehr knorpelig ausgebildeten Wirbelkörper ein, die aus dem locker gebauten Skleromit hervorgegangen sind. Die Fasern des peripheren Anteiles der *Disci intervertebrales* werden mit Fortschreiten der Entwicklung mehr und mehr durch den Druck des *Nucleus pulposus* nach außen vorgebuchtet. Sie strahlen in den Anteil der Wirbelkörper ein, aus dem später die *Wirbelkörperpiphysen* hervorgeht (Abb. 50).



Abb. 49: Sagittalschnitt durch die Brustwirbelsäule eines menschlichen Embryos (ca. 5. EW, SSL 10 mm)

- 1 *Proc. neuralis* (*Arcus vertebrae*)
- 2 *Membr. interdorsalis*
- 3 *Spinalnervenanlage*

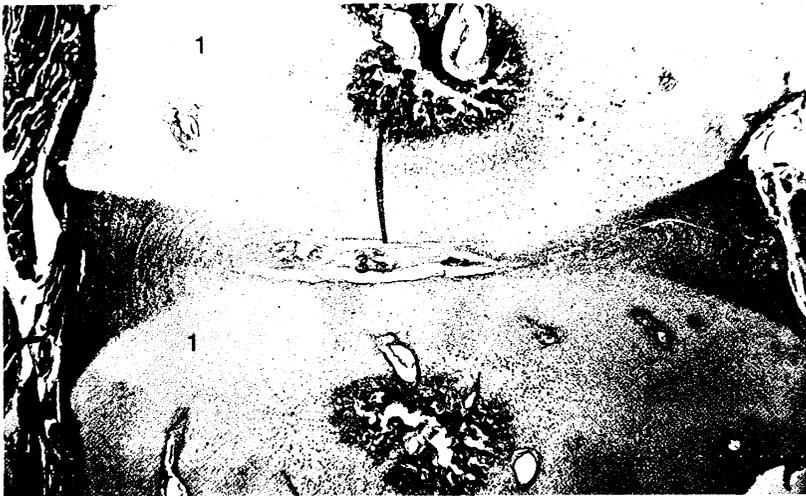


Abb. 50: Frontalschnitt durch die "Wirbelkörper-Bandscheibensäule" (Brustbereich) eines menschlichen Fetus (ca. 3.FM, SSL 80 mm)

- 1 knorpeliger Wirbelkörper
- 2 Knochenkern des Wirbelkörpers
- 3 Nucleus pulposus
- 4 Anulus fibrosus

## 4.2 Ontogenese der Wirbelgelenke

### 4.2.1 Entwicklung der Gelenkfortsätze

Die Wirbelbogen gehen aus den Processus neurales der primitiven Wirbelanlagen hervor, die jederseits durch die Membrana interdorsalis in Verbindung stehen, und endigen zunächst frei im dorsal der Wirbelkörper gelegenen Bindegewebe. Die beiden kontralateralen Fortsätze werden anfangs durch embryonales Bindegewebe (Membrana reuniens) verbunden (Abb. 51) und vereinigen sich ungefähr in der zehnten Embryonalwoche in der Mittellinie (TÖNDURY, 1958). Die Verknorpelung des Wirbelbogens setzt schon in der fünften Embryonalwoche ein, am äußeren Umfang des Wirbelbogens bleibt lange dichtes Mesenchym erhalten (SCHLEDT, 1955), (Abb. 52). Eine knorpelige Kontinuität des Wirbelbogens ist bei einer SSL von 50 mm erreicht.

Knorpelige Vorstufen der Processus articulares sind nach RUNGE und ZIPPEL (1976) ab einer SSL von 16 - 20 mm als Vorwölbung der Wirbelbogenanlagen vorhanden, die angrenzenden Gelenkfortsätze treten jedoch erst bei einer SSL von 50 mm untereinander in Beziehung (LUTZ, 1967) und ordnen sich dachziegelartig übereinander an (Abb. 53). Die Verknöcherung der Wirbelbogen beginnt ähnlich wie die der Wirbelkörper in der elften bis zwölften Embryonalwoche (SSL = ca. 70 mm) im Hals- und Brustbereich (TÖNDURY, 1958). Der Verknöcherungsprozeß geht jeweils von dem die laterale Begrenzung des Foramen vertebrale bildenden Anteil des Wirbelbogens aus. Als Vorstufe entsteht an dieser Stelle ein Kalkknorpelherd. Dadurch wird innerhalb des Wirbelbogenknorpels

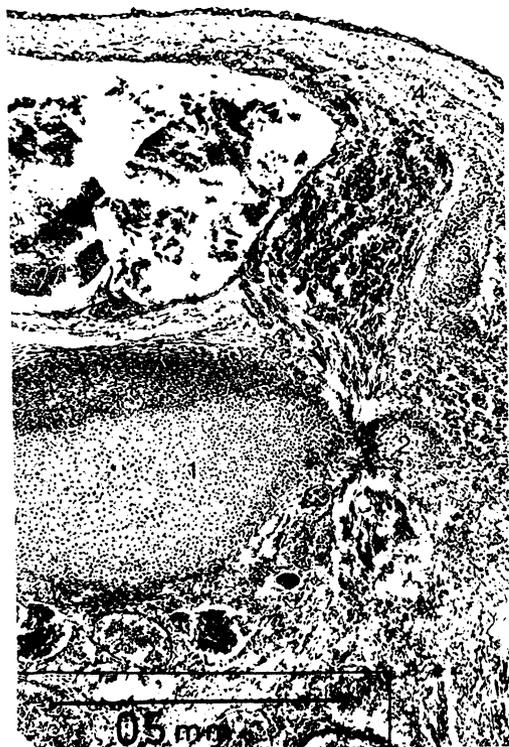


Abb. 51: Transversalschnitt durch die Brustwirbelsäule eines menschlichen Embryos (ca. 5.EW, SSL 10 mm)

- 1 Wirbelkörperanlage
- 2 Rippenanlage
- 3 Wirbelbogenanlage
- 4 Membr.reuniens

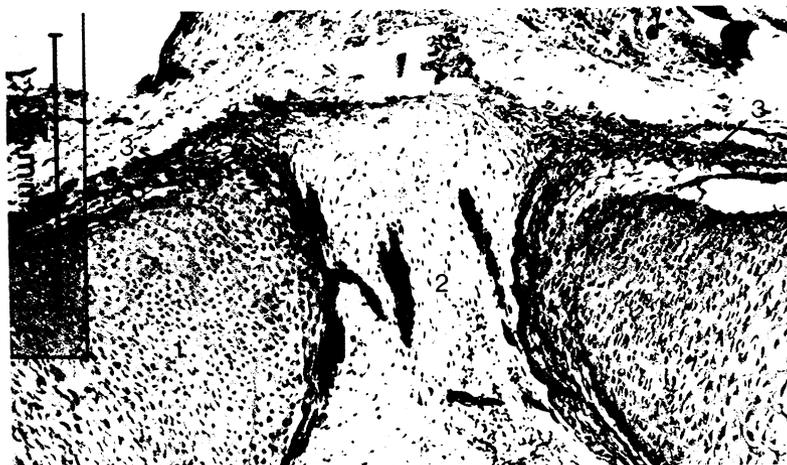


Abb. 52: Transversalschnitt durch den dorsalen Anteil der "Wirbelbogensäule" (Brustbereich) eines menschlichen Fetus (ca. 3.FM, SSL 70 mm)

- 1 knorpeliger Wirbelbogen (Lamina arcus vertebrae)
- 2 fibröses Gewebe zwischen den Wirbelbogenknorpeln (Membr.reuniens)
- 3 dichtes, mesenchymales Gewebe am äußeren Umfang der Wirbelbogenknorpel

eine Säulenknorpelbildung ausgelöst, zusätzlich entsteht in der Folge einer dichten Gefäßaus sprossung eine Osteoblastenschicht unter dem Perichondrium. Von diesen Zellen wird im Bereich des späteren Pediculus arcus primär perichondrales Knochengewebe aufgebaut, dem unter Auflösung des Kalkknorpelherdes die Ausbildung enchondraler Knochenbälkchen folgt (SCHIEDT, 1955). Die Bedeutung dieses Verknöcherungsablaufes besteht in der Erhaltung der Festigkeit jedes Wirbels in jeder Phase der Entwicklung (TÖNDURY, 1958).

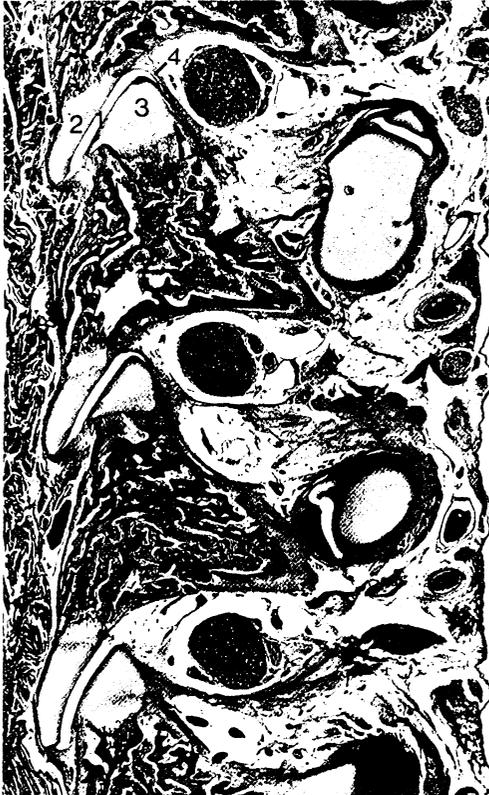


Abb. 53: Sagittalschnitt durch die "Wirbelbogensäule" (Brustbereich) eines menschlichen Fetus (ca. 4.FM)

- 1 Gelenkspalt, dachziegelartig ausgerichtet
- 2 Proc.articularis inferior
- 3 Proc.articularis superior
- 4 Gelenkkapsel

Das perichondrale Knochengewebe erstreckt sich anfangs von der Bogenwurzel auf die dorsale Fläche der Lamina arcus. Die Processus articulares bleiben noch längere Zeit knorpelig (LARCHER, 1947). Wachstum und Ausgestaltung des einzelnen Wirbelbogens erfolgen in den angrenzenden Knorpelbezirken, also im Pediculus arcus, an der

Basis des Processus spinosus sowie an der Basis des oberen und unteren Processus articularis. In den enchondralen Knochenkernen entstehen relativ weite Markräume. Zum Zeitpunkt der Geburt sind die Processus articulares als kleine Knochenerhebungen angedeutet, um das dritte Lebensjahr sind die Gelenkfortsätze mit Ausnahme des Gelenkknorpels ossifiziert (RUNGE und ZIPPEL, 1976). In diesem Zeitraum wird das Foramen vertebrale durch einen Knochenring umschlossen. Nach dem ersten Lebensjahr synostosieren die beiden Anteile des Arcus, die Verschmelzung mit dem Wirbelkörper erfolgt zwischen drittem und sechstem Lebensjahr (STARCK, 1975). Das Größenwachstum der Gelenkfortsätze ist ungefähr bis zum 18. Lebensjahr abgeschlossen. Parallel dazu ändert sich der Neigungswinkel der Gelenkflächen und damit die Einstellung des Gelenkspaltes.

Die Entwicklung der Nebenknochenkerne (sekundäre Epiphysen) im Bereich der Processus articulares der Lendenwirbel wird in der Literatur unterschiedlich beschrieben. Nach KEIBEL - MALL (1910) können zwischen dem 16. und 20. Lebensjahr sekundäre Verknöcherungszentren an den dorsalen Rändern der oberen Gelenkfortsätze vorkommen. REGENSBURGER (1938) schließt aus der Untersuchung klinischer Fälle, daß "außergewöhnlich angelegte Apophysen" auch im Bereich der unteren Gelenkfortsätze vorkommen. HIPPS (1939) zitiert aus der Literatur 36 Fälle von Spaltbildungen in den Processus articulares inferiores und beschreibt das histologische Bild eines operativ entfernten Anteiles eines Processus articularis inferior, der mit der Basis des Processus in fibröser Verbindung stand. HIPPS bezeichnet das isolierte Knochenstück als "epiphysäre" Bildung. HADLEY (1956) fand "sekundäre Ossifikationszentren" vor allem im Bereich des zweiten und des dritten Lendenwirbels (siehe auch MÜLLER, 1931; FARMER, 1936; BAILEY, 1939; HORWITZ, SMITH, 1940; ROWE, ROCHE, 1953; WENT, 1958; RETTIG, 1959; REINHARDT, 1963; KURLANDER, DIHL, 1967; JUNGHANNS, 1968; BROCHER, 1970). Eine Zusammenstellung sekundärer Ossifikationszentren stammt von OPPENHEIMER (1940, 1942). In anatomischen Atlanten (z. B. TOLDT - HOCHSTETTER, 1975 u. a.) werden vor allem sekundäre Epiphysen am Processus articularis superior des ersten Lendenwirbels gezeigt. Nach LUTZ (1967) bilden sich an der Spitze der kaudalen Gelenkfortsätze häufig postpubertär sekundäre Knochenzentren. KÖHLER - ZIMMER (1967) bilden neben einem Schema isolierte Anteile der oberen Gelenkfortsätze ("persistierende Apophysen") ab. Ähnliche Befunde sind bei EPSTEIN (1976) sowie in GRAY's Anatomy (1973) dargestellt.

JUNGHANNS (1968) gibt an, daß nach röntgenologischen Statistiken in 1,3 % aller untersuchten Lendenwirbel Nebenknochenkerne an den Gelenkfortsatzspitzen vorkommen. WENT (1958) fand sie in 1,4 %, die sich im Verhältnis 2 : 1 auf männlich und weiblich verteilten. INGELMARK und LEWIN (1968) konnten im Verlauf von Untersuchungen zur Entstehung der physiologischen Skoliose an einigen Neonati im Bereich der oberen Lendenwirbel unterteilte Processus articulares inferiores finden. Am vorliegenden Material ergaben sich keine Hinweise dafür, daß als Normalfall im Laufe der Entwicklung an den oberen Gelenkfortsätzen der Lendenwirbel sekundäre Epiphysen auftreten. Dieser Widerspruch zu den zahlreich zitierten Angaben erklärt sich daraus, daß von den Autoren die Knochenkerne der Processus mamillares oder der Processus accessorii nicht von Spitzen der oberen Gelenkfortsätze unterschieden wurden.

Sekundäre Epiphysen treten an der Spitze der genannten Processus regelmäßig auf (Abb. 54).

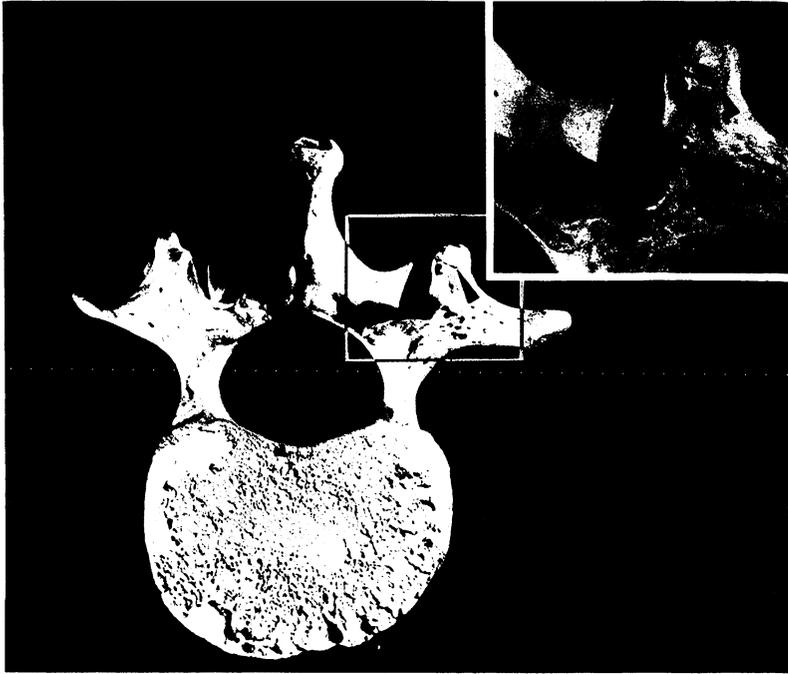


Abb. 54: Sekundäre Epiphyse am Proc.mamillaris bei einem ca. 17-jährigen Individuum

"Akzessorische Knochenkerne der Processus articulares superiores" an Lendenwirbeln von Erwachsenen können demnach als persistierende sekundäre Epiphysen der Processus mamillares aufgefaßt werden, vor allem wenn sie etwas nach lateral versetzt sind. Daneben ist jedoch eine sekundäre Abgliederung der Spitzen der Processus articulares als Folge wahrscheinlich mechanischer Bedingungen denkbar. Diese geht aus den Untersuchungen von REMPE (1956) hervor, der die Entstehung von Unterteilungen der Processus articulares inferiores des fünften Lendenwirbels als "Processolyse" interpretiert und diesen Vorgang der "Spondylolyse", wie sie in der Literatur beschrieben wird, gleichgesetzt (Abb. 55). In diese Richtung weisen auch die Befunde von SICARD und GERARD (1955). Das Auftreten von transversalen Spalten in den Processus articulares muß demnach immer als sekundäre Bildung unabhängig von der normalen Entwicklung verstanden werden.

#### 4.2.2 Entwicklung der Gelenkspalte

Die innerhalb der Membrana interdorsalis nach kranial und kaudal knorpelig aus den Processus neurales hervorgegangenen Gelenkfortsätze treten bei Embryonen mit einer SSL von ca. 50 mm intersegmental in Kontakt. Der obere Gelenkfortsatz überlappt dabei

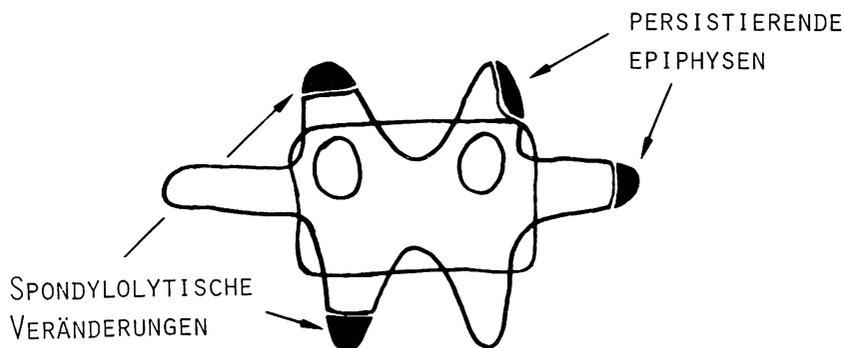


Abb. 55: Lage von "persistierenden Epiphysen" und "spondylolytischen Veränderungen" an den Lendenwirbelfortsätzen

jeweils den unteren, so daß sie einander dachziegelartig überdecken. Durch Dehiszenz im dazwischen verbliebenen zellreichen Gewebe der Membrana interdorsalis entstehen Spalträume, die bei Feten mit einer SSL von ca. 70 mm noch untergliedert sein können (Abb. 56).

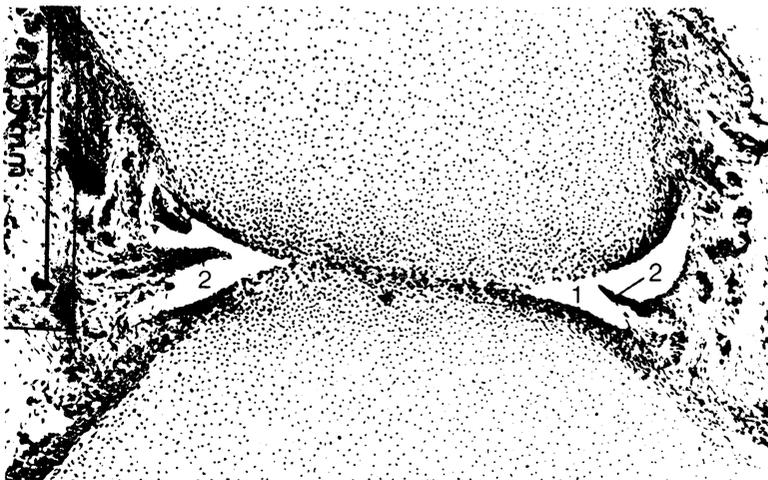


Abb. 56: Sagittalschnitt durch ein Brustwirbelgelenk eines menschlichen Fetus (ca. 3.FM, SSL 70 mm)  
 1 Gelenkspalt (noch nicht vollständig ausgebildet)  
 2 meniskoide Falten  
 3 Gelenkkapsel

Die Ausrichtung der Gelenkspalte zu Frontal- und Transversalebene während der Fetalzeit wird in der Literatur kaum beschrieben. LARCHER (1947), auch TÖNDURY (1958) beschränken sich auf die Feststellung, daß die Gelenkspalte unabhängig von regionalen Unterschieden stark nach vorne geneigt und plan seien. Nur für die Halswirbelsäule beschreibt TÖNDURY eine "Abwinkelung" der Gelenkflächen, die nicht auf beiden Seiten übereinstimmt und Brustwärts undeutlicher werden soll. Lach LUTZ (1967) sind die Gelenkspalte der Lendenwirbelgelenke in einer "nach vorne geneigten Frontalebene" eingestellt.

Ausgehend von der Überlegung, daß die Wirbelsäule des Fetus auf Grund der Muskelverspannungen (Muskeltonus) und der in utero schon ungefähr ab der achten Fetalwoche durchgeführten Bewegungen (REINOLD, 1974) einer den postnatalen Verhältnissen vergleichbaren Beanspruchung ausgesetzt ist, erschienen diese Literaturangaben unbefriedigend. Nach der Auffassung von HESSER (1926) sowie FELL und CANTI (1934), die in neueren Lehrbüchern der Entwicklungsgeschichte (STARCK, 1975) ausdrücklich anerkannt wird, ist die Grundform der Gelenkkörper genetisch determiniert. STARCK (1975) ist der Ansicht, daß die genetisch bestimmte Gelenkform durch den Reiz der Funktion typisch ausgestaltet und bewahrt wird. Berücksichtigen wir dazu neuere Untersuchungen über das Bauprinzip der menschlichen Wirbelsäule (KUMMER, 1960), so ist eine auch den postnatalen Anforderungen entsprechende Einstellung der Wirbelgelenke schon beim Fetus zu erwarten.

Auf Grund der Abdachung der Gelenkfortsätze zueinander besteht vom ersten Auftreten eines Gelenkspaltes an ein nach dorsal abfallender Neigungswinkel. In der zehnten Embryonalwoche beträgt er in Hals- und Brustwirbelsäule etwa 45 Grad. In der Lendenwirbelsäule sind die Gelenkflächen etwas steiler eingestellt. Gegen Ende der Fetalzeit wird der Winkel größer und erreicht im Laufe des ersten Lebensjahres die Werte des Erwachsenen. DECKING und ter STEEGE (1975) beobachteten eine geringe Vergrößerung der Neigungswinkel bis zum dreißigsten Lebensjahr.

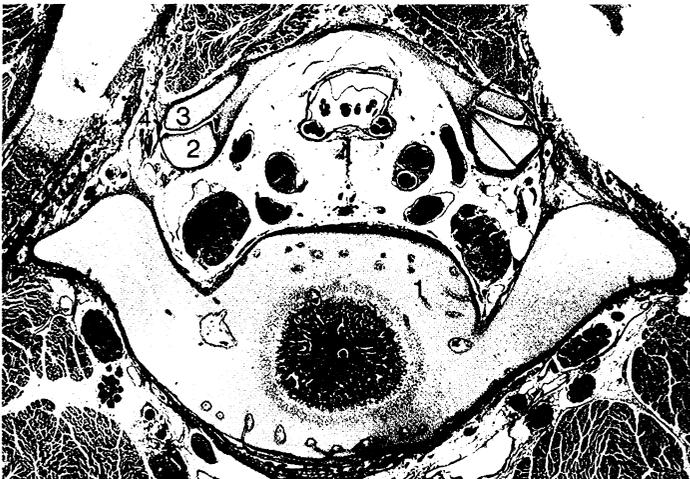


Abb. 57 a

Abb. 57 b



Abb. 57: Transversalschnitt durch die Lumbosakralgelenke eines menschlichen Fetus (ca. 4.FM); die lateralen Anteile der Gelenkflächen sind bereits etwas nach dorsal abgewinkelt.

a Übersicht

b Ausschnitt

1 Wirbelkörper

2 Proc.articularis superior

3 Proc.articularis inferior

4 Membr.fibrosa der Gelenkkapsel

5 meniskoide Falten

In bezug auf den Öffnungswinkel sind vor allem die Verhältnisse in der Lendenwirbelsäule von Interesse. An Transversalschnitten von drei Monate alten Feten ist bereits das Grundprinzip der späteren Ausformung, die Abwinkelung des Gelenkspaltes, zu erkennen (Abb. 57, 58). Während der Fetalzeit ist zwar der mediale Anteil der Gelenkfläche größer, am Rand des lateralen Anteiles tritt aber eine Zellvermehrung auf und zeigt eine Wachstumstendenz an (Abb. 59). REICHMANN (1971) vertritt ebenfalls die Meinung, daß die wesentlichen Merkmale der Lendenwirbelgelenke des Erwachsenen bereits beim Neugeborenen vorhanden seien. Die Abwinkelung wird durch die frühkindliche Ausbildung der Processus mamillares verstärkt, die nicht durch die Entwicklung der Lendenlordose oder durch die Zugwirkung des Musculus multifidus erklärt werden kann.

#### 4.2.3 Entwicklung der Gelenkkapseln

Die Gelenkkapseln gehen aus der mesenchymalen Begrenzung der Spalträume hervor, die sich an den Kontaktstellen der Gelenkfortsätze gebildet haben (Abb. 56). An embryonalen Transversalschnitten ist zu erkennen, daß ihr Blastem auf der lateralen Seite dichter ist als auf der medialen. Aus den jeweils medial an das Kapselblastem anschließenden Anteilen der Membrana interdorsalis



Abb. 58: Transversalschnitt durch Lendenwirbelgelenke eines menschlichen Fetus (ca. 5.FM); die lateralen Anteile der Gelenkflächen (Pfeile) sind nach dorsal abgewinkelt.

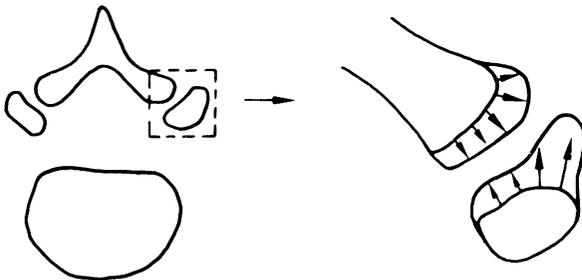


Abb. 59: Schema zur Wachstumsrichtung der lumbalen Gelenkfortsätze (unter Verwendung einer Abb. von REICHMANN, 1970/71); die charakteristische Abwinkelung entwickelt sich schon während der Fetalzeit.

gehen die Ligamenta flava hervor, die sich der medialen Kapselwand anlegen.

Von der inneren Schicht der Gelenkkapsel springen bereits bei der Ausbildung des Gelenkspaltes die Anlagen von meniskoiden Falten vor (Abb. 56, 60). Ihre weitere Entwicklung wurde von einer Reihe von Autoren sehr genau untersucht (SCHMINKE und SANTO, 1932; SANTO, 1935; TÖNDURY, 1940; TÖNDURY, 1958; PENNING und TÖNDURY, 1964; KOS, 1969; LEY, 1974). Die mesenchymalen Vorstülpungen sind anfangs sehr reichlich mit Blutgefäßen durchzogen, die sich mit

Abschluß des Wachstums um das zwanzigste Lebensjahr zurück-bilden sollen (LANG, 1958; KOS, 1969). Fetteinlagerungen, die in der Postnatalzeit sehr häufig auftreten, konnten wir an Fetten nicht nachweisen.



Abb. 60: Sagittalschnitt durch ein Wirbelgelenk ( $C_2/C_3$ ) eines menschlichen Fetus (ca. 3.FM, SSL 80 mm)

- 1 Proc.articularis superior
- 2 Proc.articularis inferior
- 3 Gelenkkapsel
- 4 meniskoide Falte

### 4.3 Fehlbildungen der Wirbelgelenke

Gelenkkörper und Gelenkflächen der Wirbel sind außerordentlich variabel gestaltet. Neben geringeren Schwankungen von Form und Ausdehnung der Gelenkflächen findet man fallweise Fehlformen, die vor allem in Verbindung mit Veränderungen angrenzender Teile der Bewegungssegmente zu Störungen führen können. Fast immer werden sie als Zufallsbefunde aufgedeckt und lassen sich nicht in direkten Zusammenhang mit angegebenen Beschwerden bringen. Sie betreffen meistens die unteren Gelenkfortsätze.

#### 4.3.1 Größenvarianten der Gelenkfortsätze

Die Länge der Processus articulares inferiores variiert in den einzelnen Bereichen der Wirbelsäule in unterschiedlichem Ausmaße (Abb. 14). Eine gewisse Konstanz sowohl der individuellen absoluten Werte als auch der Standardabweichung der Mittelwerte verschiedener Individuen besteht für die Brustwirbelsäule ( $C_7 - Th_9$ ). Im Gegensatz dazu ist die Variabilität innerhalb des lumbodorsalen und lumbosakralen Übergangsbereiches außerordentlich groß. Im Vergleich zu den angrenzenden Wirbeln streuen die Maße des fünften Halswirbels erheblich.

An den Processus articulares superiores liegen dagegen - vom dritten und vierten Halswirbel abgesehen - alle Mittelwerte unseres Materials zwischen 5 und 10 mm (Abb. 13). Ihre Varianz ist sehr gering, ausgenommen der sechste Halswirbel und der dritte und vierte Lendenwirbel.

Grenzformen, die den Streubereich überschreiten, können als Hypo- und Hyperplasien gedeutet werden. Die Hypoplasie wird zumeist als Zufallsbefund festgestellt und scheint auch auf längere Sicht nicht zu Funktionsstörungen bzw. Beschwerden zu führen (RUCKENSTEINER, 1939; LIECHTI, 1944; RAVELLI, 1955; TUSZEWSKI, 1960). Auch die Aplasie von Gelenkfortsätzen wird zumeist als Zufallsbefund entdeckt (MÜLLER, 1932; RUCKENSTEINER, 1939; RAVELLI, 1955; RETTIG, 1959; REINHARDT, 1968; SCHMORL - JUNGHANNS, 1968). Daraus kann geschlossen werden, daß derartige offensichtlich kongenitale Fehlbildungen im Laufe des Wachstums innerhalb des einzelnen Bewegungssegmentes kompensiert werden. Vorwiegend sind die Processus articulares inferiores betroffen, nur RUCKENSTEINER (1939) erwähnt einmal die Aplasie der Processus articulares superiores eines Lendenwirbels. HORVATH und MASSANYI (1962) berichten von deformierten ("aplastischen") unteren Gelenkfortsätzen und stufen sie als "Entwicklungsanomalien" ein.

SCHINZ (1942) und HADLEY (1956) beschreiben hyperplastische Bildungen der Gelenkfortsätze. Nach KELLER (1958) führt dieses Symptomenbild zu einer mangelhaften Ausbildung der Lendenlordose.

#### 4.3.2 Varianten der Öffnungswinkel

In Abbildung 12 sind die Mittelwerte der Öffnungswinkel und ihre Streuung beim Erwachsenen angegeben. Die Variationsbreite dieses Winkels in den einzelnen Segmenten ist vor allem für die Beurteilung von Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule von Bedeutung. Die größte Variabilität findet man im zervikothorakalen Übergangsbereich und innerhalb des unteren Wirbelsäulenanteiles von Th<sub>12</sub> - L<sub>5</sub>. Für die Interpretation der Standardabweichungen in Abbildung 12 muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß sich bei dieser Art der Zusammenfassung der Meßwerte die Kaudal- bzw. Kranialvariation als Vergrößerung der Variabilität in den Übergangszonen äußert.

Von vielen Autoren wurde die Seitengleichheit der Wirbelgelenke untersucht (z. B. JUNGHANNS, 1954; INGELMARK und LEWIN, 1968). Man sah in Ungleichheiten eine mögliche Ursache der Entstehung sonst nicht erklärbarer Rückenschmerzen. Hier kann nur festgestellt werden, daß Asymmetrien in allen Wirbelsäulenregionen, am wenigsten im Brustbereich vorkommen und zumeist als Zufallsbefunde entdeckt werden. Asymmetrien sind auch beim Fetus häufig zu finden.

## 5 Bedeutung der Wirbelgelenke für die Statik der Wirbelsäule

### 5.1. Allgemeines zur Statik der Wirbelsäule

Die Mechanik der Wirbelsäule wurde vielfach untersucht, zumeist wurde dabei die Rolle der "Körper"säule in den Vordergrund gestellt. In Übereinstimmung mit KUMMER (1959), SCHLÜTER (1965) und anderen Autoren ist festzustellen, daß die statische Beanspruchung der menschlichen Wirbelsäule in erster Linie in axialem Druck besteht. Dies gilt für alle normalen Körperstellungen, wie Stehen, Sitzen, Liegen usw., wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß. Durch die Verbindungen der Wirbel durch Ligamenta und Muskeln entsteht innerhalb der Wirbelsäule eine sogenannte "Vorspannung", die qualitativ unabhängig von der Körperstellung den axialen Druck aufrecht erhält. Quantitative Entlastungen vom axialen Druck entstehen durch Hilfsmechanismen, wie die Bauchpresse oder das Aufstützen der Arme am Becken usw.. SCHLÜTER (1965) konnte in spannungsoptischen Versuchen zeigen, daß die Wirbelkörper hauptsächlich für axiale Beanspruchung gebaut sind.

Die Bedeutung der Gelenke für die axiale Druckübertragung wurde bisher kaum untersucht. Man sah in ihnen Einrichtungen der Kinetik; VIRCHOW (1909) und FICK (1911) deuteten sie als "Leitbahnen" der Bewegung. Nur wenige Autoren (RENNER, 1956; MESTDAGH, 1976) haben die Wirbelgelenke funktionell als statische Komponente unseres Achsenorgans interpretiert. Auch die Funktion der Bänder und der Muskulatur in bezug zur Statik des einzelnen Bewegungssegmentes, insbesondere der Wirbelgelenke wurde kaum berücksichtigt.

Als druckübertragende Einrichtungen zwischen den Wirbeln stehen drei "Organe" zur Verfügung: der Discus intervertebralis und die beiden Wirbelgelenke. Auf Grund der physikalischen Eigenschaften der Knorpeloberflächen und der dazwischen befindlichen Synovia ist kaum eine nennenswerte Reibung in den Gelenken vorhanden. Die Druckübertragung erfolgt in den Gelenken frei von Scherkräften und läßt sich damit als punktförmige Übertragung darstellen. Die Bandscheibe dagegen ist auf Grund der Anordnung der Fasern des Anulus fibrosus dazu eingerichtet, neben Druckkräften auch Scherkräfte aufzunehmen. Daraus resultiert eine Aufteilung der Druckbelastung innerhalb des einzelnen Bewegungssegmentes.

Aus der spannungsoptischen Untersuchung von SCHLÜTER (1965) über die Druckverteilung innerhalb des intakten Discus intervertebralis geht hervor, daß der Nucleus pulposus als pralles Zentrum der Bandscheibe bei Belastung eine "Umlenkung" des Druckes auf alle umliegenden Anteile der Bandscheibe bewirkt. Ist eine Veränderung (Fasereintrisse, "Flüssigkeitsverlust" usw.) eingetreten, so erfolgt die Druckübertragung ungleichmäßig. Einzelne Anteile der hyalinknorpeligen Grenzzone werden übermäßig beansprucht.

Beim Jugendlichen erfolgt die Druckübertragung innerhalb der Bandscheibe theoretisch punktförmig in ihrem Zentrum. Mit fortschreitender Alterung werden trotz ihres weiterhin positiven Quelldruckes auch ihre Randpartien einbezogen. Unter Berücksichtigung der gleichzeitig auftretenden Höhenabnahme der Bandscheibe wird damit erst die Entstehung der "Instabilitas intervertebralis" (JUNGHANNS, 1968) funktionell verständlich.

Abgesehen von bleibenden Veränderungen sind auch die Tages-

schwankungen der Bandscheibenhöhen für die statischen Verhältnisse innerhalb des einzelnen Bewegungssegmentes von Bedeutung. Die "Längen"abnahme der Lendenwirbelsäule kann nach KRÄMER (1973) bis zu 15 mm betragen. Bezogen auf die einzelne Bandscheibe erscheint die Höhenabnahme nicht sehr groß, dennoch lockert sich das Gefüge der "Körper"säule, im Bewegungssegment ändert sich die Druckverteilung. Auch geringe Änderungen der Höhe und des Volumens müssen sich auf den Ablauf einer raschen Bewegung oder eines Stoßes auswirken.

Mit Ausnahme der Kopfgelenke ist in jedem Bewegungssegment der Wirbelsäule eine "Dreipunktlagerung" gegeben (Abb. 61), die Größe der dreiseitigen Unterstützungsfläche nimmt von kranial nach kaudal zu (Abb. 62). Die Belastung der Eckbereiche dieser Flächen hängt von der Größe und Lage der gesamten Druckkraft im einzelnen Segment und von ihrem Winkel zu den druckaufnehmenden Flächenanteilen ab.

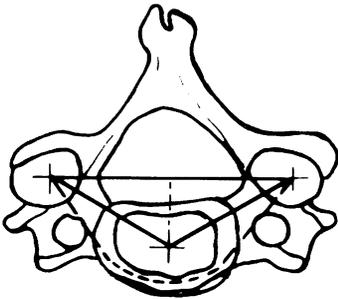


Abb. 61 a

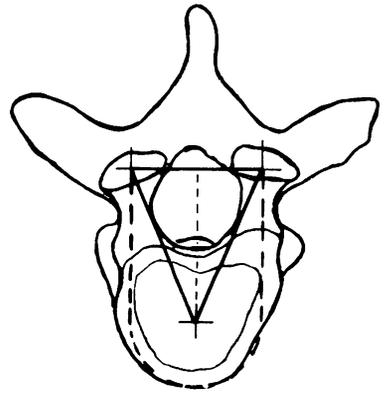


Abb. 61 b

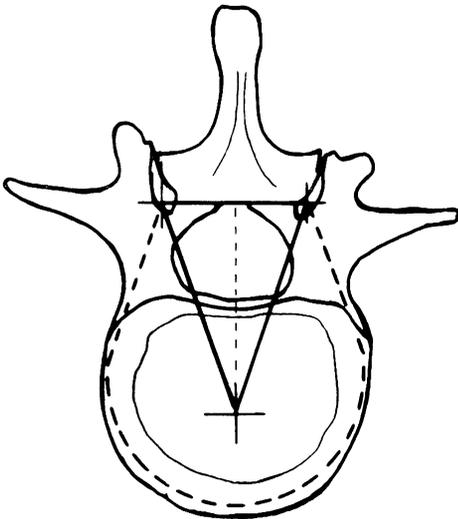


Abb. 61 c

Abb. 61: "Unterstützungsflächen" ("Dreipunktlagerung") der Wirbel

- a Halswirbel
- b Brustwirbel
- c Lendenwirbel

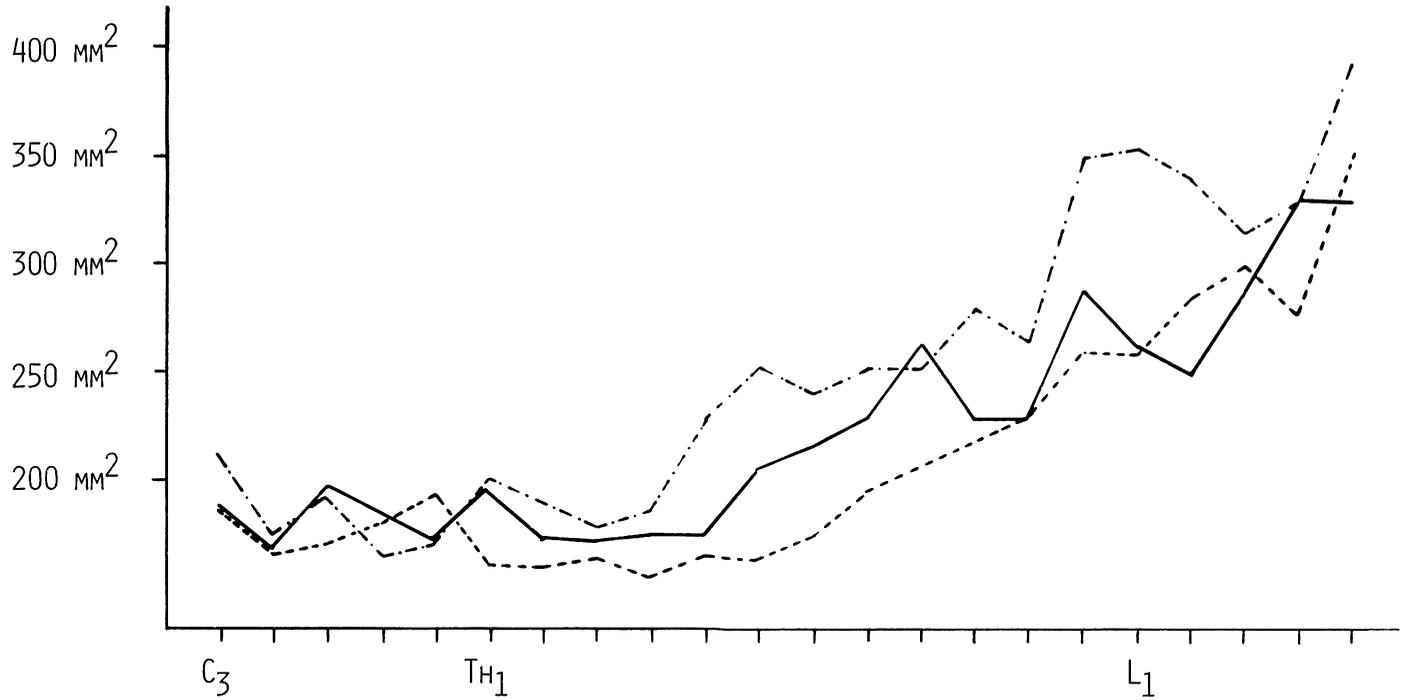


Abb. 62: Größe der "Unterstützungsflächen" der Wirbel in  $\text{mm}^2$  bei drei Wirbelsäulen, siehe Abb. 61

Von Bedeutung ist auch die Ausrichtung der dreiseitigen Unterstützungsfläche. Sie wird am besten durch das Verhältnis des transversalen Abstandes der Gelenkflächen (Abb. 1,  $d_1$ ) zur (sagittalen) Höhe (Abb. 1,  $d_2$ ) beschrieben; in Abbildung 63 ist diese Beziehung graphisch dargestellt. Vom dritten Halswirbel bis zum dritten Brustwirbel ist die Basis größer als die Höhe des Dreieckes, am sechsten Halswirbel beträgt das Verhältnis 4,3 : 1. Vom siebten Halswirbel bis zum dritten Lendenwirbel nimmt die (sagittale) Höhe der Unterstützungsfläche zu, der Querabstand der Gelenkflächen dagegen ab ( $C_7$ ,  $d_1 : d_2 = 3 : 1$ ;  $L_3$ ,  $d_1 : d_2 = 0,6 : 1$ ). Am Os sacrum besteht wiederum ein Verhältnis von  $d_1 : d_2 = 2,2 : 1$ . Dies bedeutet, daß die Unterstützungsflächen der Bewegungssegmente der Halswirbelsäule, der obersten Anteile der Brustwirbelsäule sowie des lumbosakralen Überganges eher transversal, in den übrigen Wirbelsäulengebieten dagegen sagittal ausgedehnt sind.

## 5.2 Prinzip der Druckübertragung in den Bewegungssegmenten

Ein stabiles Gleichgewicht besteht im einzelnen Bewegungssegment dann, wenn die Resultierende der Druckkräfte innerhalb der Unterstützungsfläche verläuft. Daraus ergibt sich, daß die zugfesten Strukturen innerhalb und außerhalb der Bewegungssegmente sowie die zugehörigen Muskeln für die Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes von ausschlaggebender Bedeutung sind. Sie greifen vornehmlich an den Fortsätzen der Wirbel an, die Eckpunkte des Unterstützungsdreieckes werden zu "Hebelpunkten". Auf diese Weise wandeln sich sämtliche Kräfte, die scheinbar im Sinne einer Biegebeanspruchung an der Wirbelsäule angreifen, in axiale Druckbeanspruchungen um. Dieses Prinzip ist am Beispiel der Brustwirbelsäule in den Abbildungen 64 und 65 dargestellt. Von ventral her wird durch die am Thorax angreifenden Kräfte - über die Rippen und deren Verspannungen als Hebelarme - auf die Wirbelsäule eine Biegebeanspruchung ausgeübt. Ihr wirkt die Kraft der an den Fortsätzen der Wirbelbogen angreifenden Rückenmuskulatur entgegen. In den Endphasen der Bewegungen werden zudem die Bänder als Zuggurtung wirksam. Durch dieses Hebelsystem erfolgt eine Umlenkung der Einzelkräfte, ihre Resultierende kann damit entsprechend dem Hebelgesetz ( $K_1 \cdot l_1 = K_2 \cdot l_2$ ) innerhalb der Unterstützungsfläche des Bewegungssegmentes gehalten werden.

Aus der Tatsache, daß die Wirbelsäule exzentrisch innerhalb des Stammes gelegen ist, hat SLIJPER (1947) abgeleitet, daß der einzelne Wirbel einer Biegebeanspruchung ausgesetzt sei. KUMMER (1959, 1960) hat diese Auffassung richtiggestellt und auf die Verspannungssysteme hingewiesen, die über Hebelarme an den Wirbeln angreifen und die ventral der Wirbelsäule angreifenden Kräfte im Gleichgewicht halten. Innerhalb des einzelnen Bewegungssegmentes werden die Druckkräfte von allen zur Druckübertragung geeigneten Strukturen aufgenommen. Der quantitative Anteil wird bestimmt von der Richtung der resultierenden Druckkraft, ihrer Größe, dem Neigungswinkel der Gelenkflächen, bezogen auf die zugehörige Wirbelkörperperdeckplatte ( $\alpha$ ), und dem Neigungswinkel der Wirbelkörperperdeckplatte zur Transversalebene ( $\delta_1$ ).

Da die Art der Krafteinleitung und damit die Richtung der Druckresultanten nur am zweiten Halswirbel genau bestimmt werden kann, sind die Verhältnisse der Druckverteilung innerhalb der Wirbelsäule im Bewegungssegment  $C_2/C_3$  am besten zu überschauen.

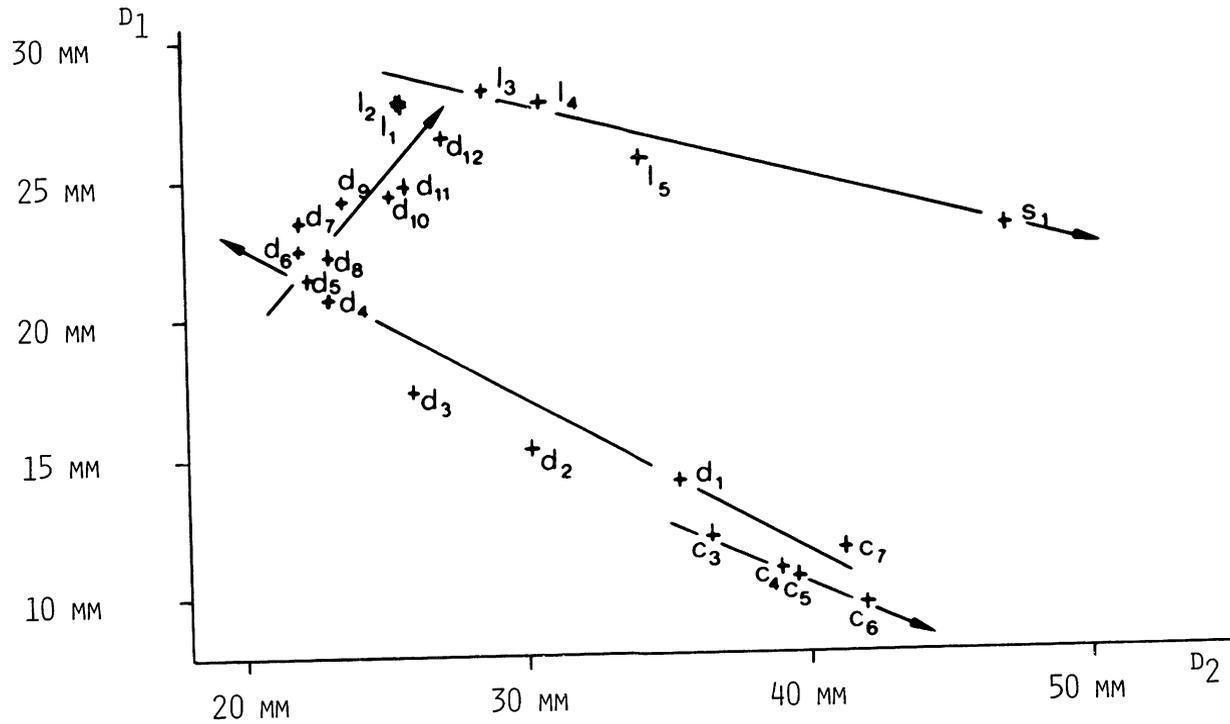


Abb. 63: Korrelation von transversalem Abstand der Gelenkflächen ( $d_1$ ) und ihrer sagittalen Distanz von den Wirbelkörpern ( $d_2$ )

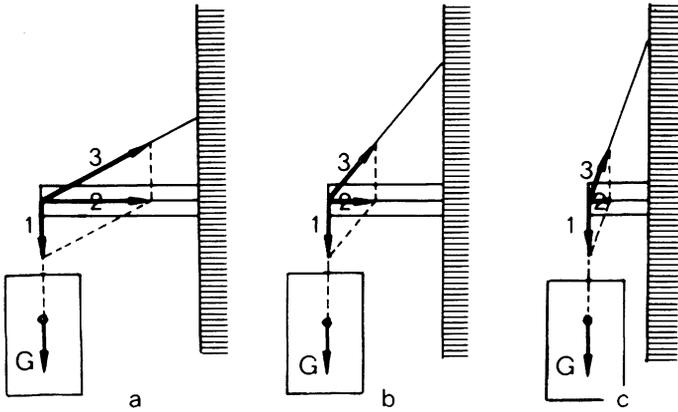


Abb. 64: Schema der im Thoraxbereich wirkenden Kräfte  
 a - c Größe der Kraftkomponenten in Abhängigkeit vom Winkel der Aufhängung und der Distanz zur Wirbelsäule  
 1, 3 Zugkräfte  
 2 Druckkraft  
 G Masse des Thorax und angrenzender Körperanteile, die im aufrechten Stand eine nach kaudal gerichtete Kraft hervorrufen.

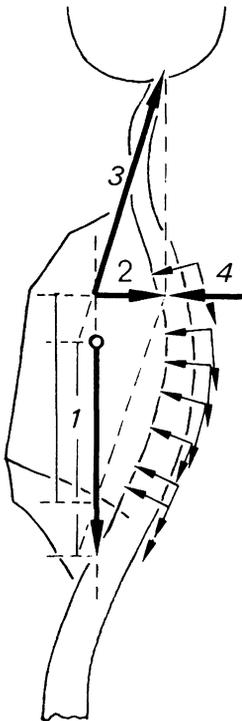


Abb. 65: Vereinfachtes Schema der am Thorax bei aufrechtem Stand angreifenden Kräfte  
 1 nach kaudal gerichtete Kraft (hervorgerufen durch die Masse des Thorax und angrenzender Körperanteile)  
 2 Druckkraft  
 3 Zugkraft der Aufhängung  
 4 Gegenkräfte (greifen an Wirbelbogen und ihren Fortsätzen an)

Die Druckkraft, die bei Normalhaltung auf den Axis wirkt, kann mit dem Gewicht des Kopfes gleichgesetzt werden. Sie wird über die schmale Berührungsfläche eingeleitet, die in der seitlichen Projektion als Punkt gesehen werden kann. Der Druckanteil, den die druckaufnehmenden Flächen übernehmen, hängt sowohl von ihrer Einstellung als auch vom Abstand ihres Mittelpunktes von der Resultanten ab. Die an der Halswirbelsäule ermittelten Neigungswinkel ( $\alpha$ ) und die Einstellung der Wirbelkörperdeckplatten zur Transversalebene ( $\delta_1$ ) sind in Abbildung 66 zusammengestellt (siehe auch Abb. 3). An Röntgenbildern liegt der Abstand des Mittelpunktes der Deckplatte des dritten Halswirbels von der Wirkungslinie der Druckkraft zwischen  $d = 1,9$  mm bis  $d = 3,8$  mm.

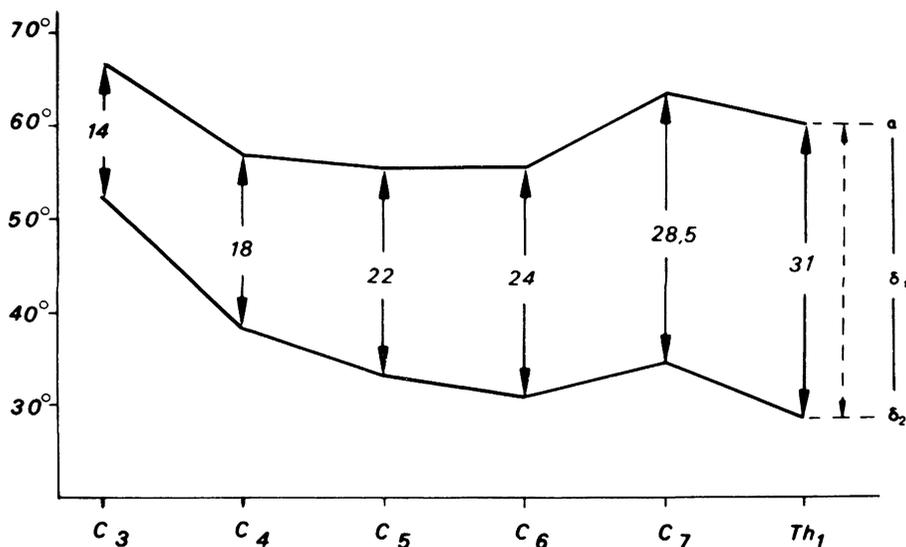


Abb. 66: Ausrichtung der Halswirbel im seitlichen Röntgenbild, siehe Abb. 3

$\delta_1$  Winkel zwischen Transversalebene und oberer Wirbelkörperfläche

$\delta_2$  Winkel zwischen Transversalebene und Gelenkflächen

$\alpha$  Neigungswinkel

An drei Beispielen soll die Abhängigkeit der Druckverteilung von den Flächenwinkeln dargestellt werden. Als Grundlage für Abbildung 67 wurde  $\alpha$  mit 30 Grad,  $\delta_1$  mit 0 Grad und  $d$  mit 3,8 mm gewählt. Aus der Darstellung im "Krafteck" ergibt sich, daß der Hauptteil der Druckkraft von der Bandscheibe aufgenommen wird,

während die Gelenkflächen auf Grund des großen Abstandes vom Kräfteinleitungspunkt einen geringeren Anteil zu tragen haben. Die Druckkraft im Bereich der Wirbelkörperdeckfläche teilt sich ihrerseits in eine axial gerichtete Komponente ( $A_V$ ) sowie eine sagittal gerichtete Komponente ( $A_S$ ). Unter den gewählten Bedingungen wirkt diese Kraftkomponente im Sinne eines Abgleitens des kranialen Wirbels auf dem kaudalen Wirbel nach dorsal.

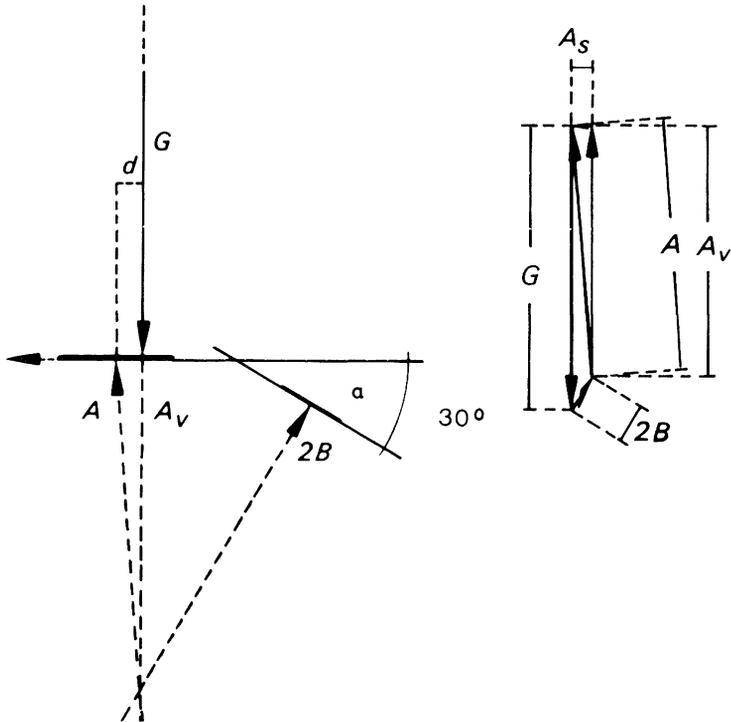


Abb. 67: Schema der Druckübertragung auf zwei zueinander geneigte Flächen - als Situationsmodell des Bewegungssegmentes  $C_2/C_3$  ( $\alpha = 30^\circ$ )

d Abstand des Kräfteinleitungspunktes vom Mittelpunkt der oberen Wirbelkörperfläche

A Kräfte im Bereich des Wirbelkörpers

$A_V$  senkrechte Druckkomponente

$A_S$  sagittale Schubkomponente

B Kräfte im Bereich der Wirbelgelenke

G Masse des Kopfes

Bei einem Einstellungswinkel der Deckplatte von  $\delta_1 = 7,5$  Grad und einem Neigungswinkel der Gelenkflächen von  $\alpha = 50$  Grad, Minimalwerten des vorliegenden Untersuchungsgutes, verändern sich die Teilkräfte wesentlich (Abb. 68). Die sagittale Kraftkomponente ist,

wenn auch in geringem Ausmaß, gegensinnig, d.h. nach ventral gerichtet.

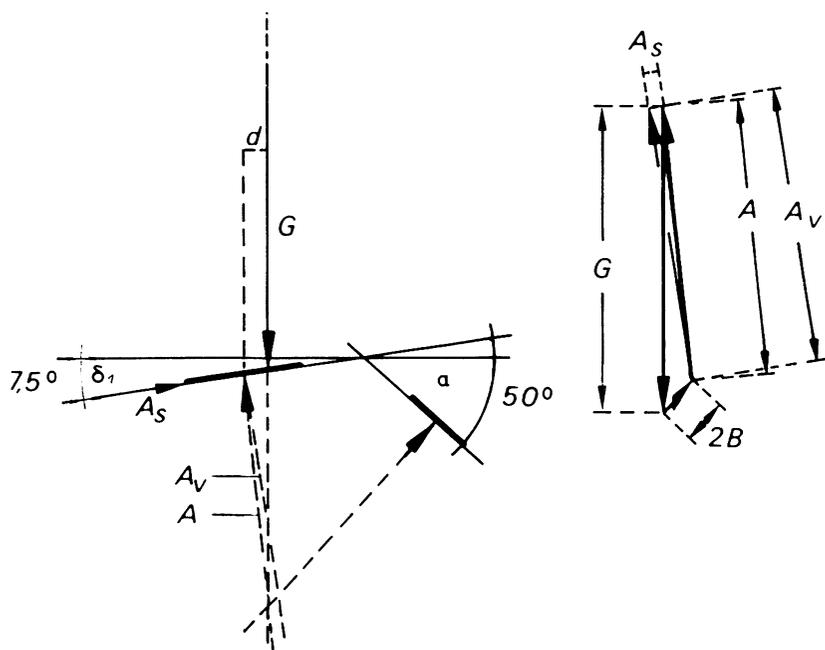


Abb. 68: Schema der Druckübertragung auf den 3. Halswirbel bei einer Einstellung der oberen Wirbelkörperfläche von  $\delta_1 = 7,5^\circ$  und einem Neigungswinkel von  $\alpha = 50^\circ$ ; Erläuterungen siehe Abb. 67

Wird der Einstellungswinkel auf  $\delta_1 = 15$  Grad vergrößert – der Durchschnittswert des Materials liegt bei  $\delta_1 = 14$  Grad –, so verstärkt sich diese Tendenz (Abb. 69), und die ventral gerichtete Schubkomponente wird beträchtlich größer. Dem Abgleiten des kranialen Wirbels nach ventral muß die Zugspannung der Muskeln, der Bänder und des Anulus fibrosus entgegenwirken. Vom dritten Hals- bis zum ersten Brustwirbel nehmen die Einstellungswinkel nahezu linear zu; damit geht die Druckaufnahme von kranial nach kaudal zunehmend zu Lasten der Wirbelgelenke.

Die beschriebenen Verhältnisse beziehen sich auf Halswirbelsäulen, die eine ausgeprägte Lordose aufweisen (75 % des vorliegenden Materials). Bei den auch in Normalhaltung eher gestreckt ausgeprägten Halswirbelsäulen verläuft die resultierende Druckkraft durch den Mittelpunkt der Wirbelkörperdeckplatte oder kommt sogar ventral davon zu liegen. Vergleichbare Verhältnisse bestehen allgemein bei vorgebeugter Haltung (Lesehaltung nach GÜNTZ, 1956).

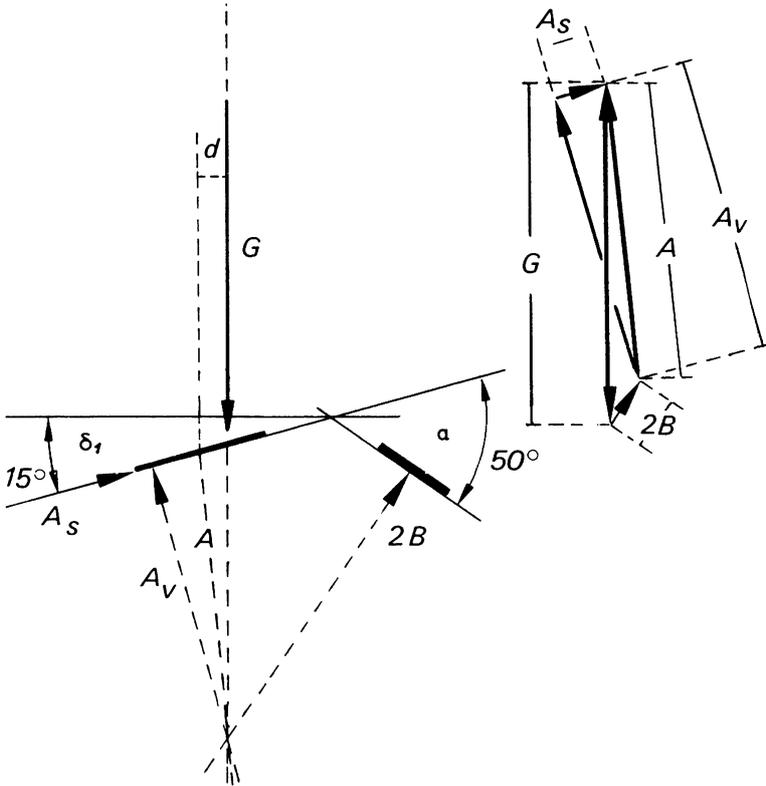


Abb. 69: Schema der Druckübertragung auf den 3. Halswirbel bei einer Einstellung der oberen Wirbelkörperfläche von  $\delta_1 = 15^\circ$  und einem Neigungswinkel von  $\alpha = 50^\circ$  - entsprechend der Situation im Bewegungssegment  $C_2/C_3$ ; Erläuterungen siehe Abb. 67

Die innerhalb des kranialen Teiles der Wirbelsäule wirkenden Kräfte ändern ihre Richtung trotz der "Auskrugung" grundsätzlich nicht. Als Hauptbeanspruchung bleibt der axiale Druck bestehen. Die Zugkräfte, die Halswirbelsäule und Kopf im Gleichgewicht halten, müssen als Reaktionskräfte zu den eigentlichen Druckkräften addiert werden.

Die Zugwirkung wird vom Ligamentum nuchae und den Bändern, die Wirbelbogen und deren Fortsätze miteinander verbinden, sowie von der Rückenmuskulatur ausgeübt. Die Faserbündel des Ligamentum nuchae fächern sich von der Spitze des Processus spinosus des siebten Halswirbels und des ersten Brustwirbels zu den Dornfortsätzen der übrigen Halswirbel auf (Abb. 70). KUMMER (1959, 1960) beschreibt an quadrupeden Säugern eine ähnliche Verspannung (Zuggurtung) der Halswirbelsäule, die eine axiale Druckbeanspruchung der Wirbelkörper ohne Rücksicht auf die Haltung gewährleistet.



Abb. 70: Verlauf der Faserbündel des Lig.nuchae

Für die Verteilung der Druckkräfte innerhalb des Unterstützungsdreiecks eines jeden Wirbels ist der Verlauf der Wirkungslinie der Druckkraft maßgeblich. Diese Abhängigkeit wird in Abbildung 71 und 72 an einem Beispiel dargestellt. Für das einzelne Bewegungssegment (ausgenommen  $C_1/C_2$  und  $C_2/C_3$ ) läßt sich die Wirkungslinie allerdings nicht bestimmen. Die druckaufnehmenden Flächen sind so zur Längsachse der Wirbelsäule eingestellt, daß sie eine Verteilung der vertikalen Druckkräfte herbeiführen, die den Wirbelkanal aussparen. Das Foramen vertebrale liegt offensichtlich in einem Gebiet reduzierter Spannung.

Den Wirbelgelenken kommt auch die Aufgabe zu, bei der Übertragung von Druckkräften im Sinne des Hebelgesetzes als Hebelpunkte zu wirken. In der "bequemen" aufrechten Haltung trifft dies vor allem in Brust- und Lendenwirbelsäule zu, wo die tiefen Anteile der autochthonen Rückenmuskulatur jeden einzelnen Wirbel aktiv fixieren. Nur so erscheint die Änderung des Neigungswinkels der Gelenkflächen der Brustwirbel gegenüber denen der Halswirbel verständlich. Durch die relativ langen Hebelarme der Brustwirbeldornfortsätze und die als Hebelpunkte wirkenden Gelenke wird gesichert, daß die resultierende Druckkraft senkrecht auf die Unterstützungsfäche des einzelnen Wirbels trifft. Damit kann auch die funktionelle

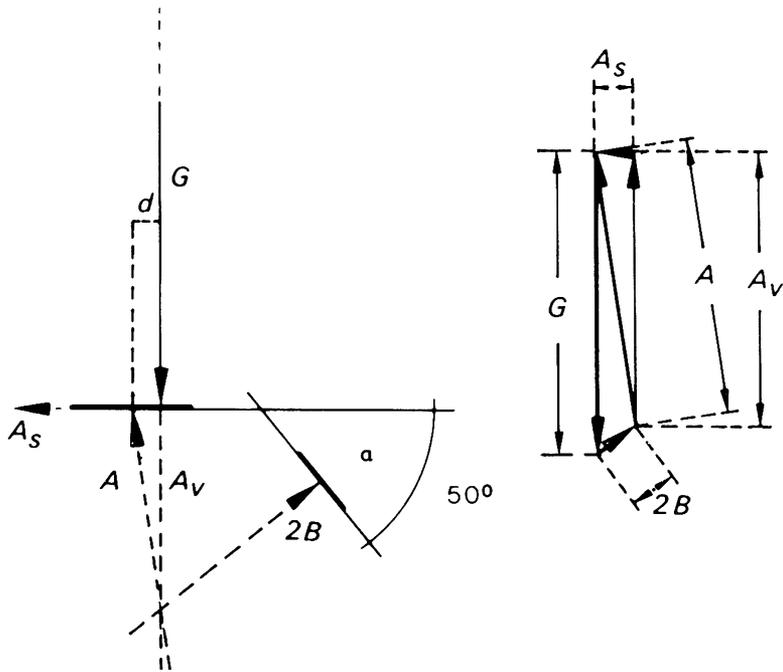


Abb. 71: Schema der Druckübertragung bei einem Neigungswinkel von  $\alpha = 50^\circ$  und einem Abstand des Kräfteinleitungspunktes vom Mittelpunkt der oberen Wirbelkörperfläche ( $d$ ), wie er dem Bewegungssegment  $C_2/C_3$  entspricht; ein Großteil der Druckkraft wird vom Wirbelkörper aufgenommen; Erläuterungen siehe Abb. 67

Bedeutung der Form und der Einstellung der Gelenkflächen der Lendenwirbel erklärt werden. Diese sind ausnahmslos so geformt und eingestellt, daß sie sagittal wirkende Kraftkomponenten aufnehmen können, wie sie an diesen Hebelpunkten entstehen. Würde entsprechend einer häufig geäußerten Auffassung die Druckübertragung im Bereich der Lendenwirbel ausschließlich über die Disci intervertebrales erfolgen, so müßten die Gelenkflächen der Lendenwirbel sagittal ausgerichtet sein. Am vorliegenden Material konnten keine derartigen Präparate gefunden werden.

### 5.3 Rolle der meniskoiden Falten bei der Druckübertragung in den Wirbelgelenken

In allen Wirbelgelenken findet man als besondere Einrichtungen meniskoiden Falten, die in unterschiedlicher Weise rund um die Gelenkflächen angeordnet sind (Kap. 3.2.1). Die meniskoiden Falten der Wirbelgelenke werden von vielen Autoren als Puffer und Schutzeinrichtungen gegen Überlastung angesehen. Sie sollen die Gelenkflächen vor schädigenden Einwirkungen bewahren. Ihre Einklemmung im Gelenkspalt ruft nach KOS (1969) und KOS und WOLF (1972) Beweglichkeitsstörungen (Blockierung) und Schmerzen hervor.

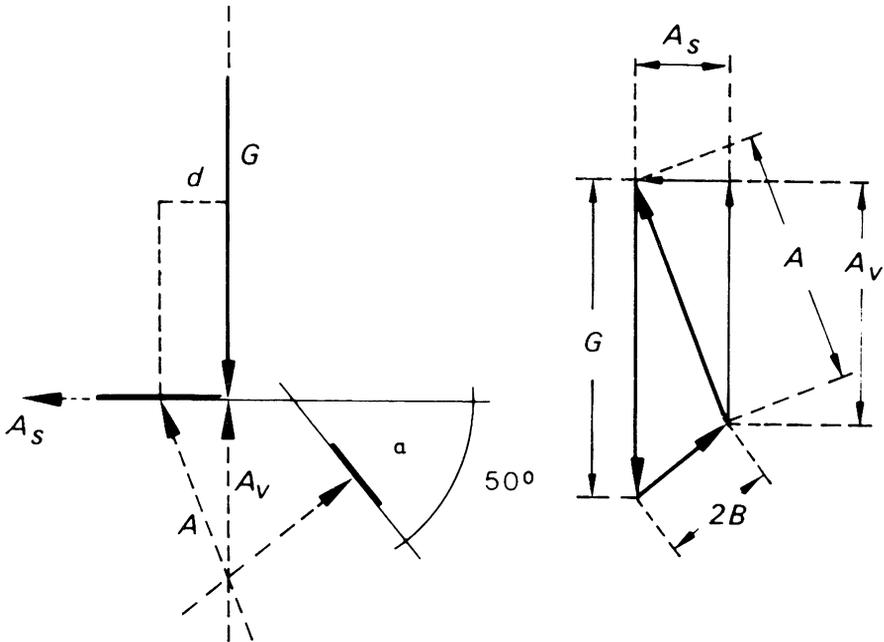


Abb. 72: Schema der Druckübertragung nach Dorsalverschiebung des Kräfteinleitungspunktes gegenüber der Situation in Abb. 71; die von den Wirbelgelenken aufzunehmenden Teilkräfte erhöhen sich wesentlich; Erläuterungen siehe Abb. 67

Die meniskoiden Falten müssen in bezug auf ihre normale Funktion im Zusammenhang mit ihrer Befestigung an der Gelenkkapsel und den angrenzenden Bändern und Muskeln gesehen werden. Sie sitzen der Gelenkkapsel zumeist breitbasig auf und werden zwischen die Randbereiche der Gelenkflächen gedrückt. Sie passen sich der von der Gelenkstellung abhängigen Formänderung des Gelenkspaltes an.

Der Innendruck der Wirbelgelenke ist wie in den übrigen Gelenken in der Ruhestellung gleich dem Umgebungsdruck und damit gleich dem äußeren Luftdruck. Im Gegensatz zu anderen Gelenken des menschlichen Körpers kann in den Wirbelgelenken in bestimmten Stellungen ein Unterdruck entstehen, weil der gelenkige Kontakt aufgehoben wird. Als Beweis dafür mag der Nachweis des Vakuumphänomens (R. FICK'sches Zeichen, RAVELLI, 1955) gelten. Dieses tritt immer dann auf, wenn die Gelenkflächen teilweise oder ganz voneinander getrennt werden und die Gelenkkapsel und deren synoviale Vorstülpung den Konturen der Gelenkkörper nicht folgen. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem Druck im Gelenkinnenraum und der Spannung der Gelenkkapsel ein. FUIKS und GRAYSON (1950) haben das Vakuumphänomen in den lumbosakralen Gelenken nachgewiesen. Ein derartiges Klaffen der Gelenkspalte gehört zur normalen Funktion aller Wirbelgelenke.

An den Stellen, an denen Gelenkkapseln den wulstartig aufgeworfenen Knorpelrändern der Gelenkkörper aufliegen, sind sie von dicht gelagertem Bindegewebe unterfüttert, von dem die meniskoiden Falten ausgehen. Der dreiseitig begrenzte Raum an der Basis der Falten wird von verformbarem Füllmaterial, Fettgewebe und lockerem Bindegewebe, ausgefüllt. Bei Extremstellungen werden im klaffenden Bereich der Gelenkspalte demnach nur die basalen Anteile der Falten an die Membrana fibrosa gepreßt und können Druckkräfte aufnehmen. Dort, wo der Gelenkspalt nicht klafft, kann jeweils die gesamte Falte zur Druckübertragung dienen. Die freien Ränder der groß und kompakt gebauten Falten von Hals- und Brustwirbelgelenken enthalten häufig Knorpelgewebe. Dies spricht dafür, daß in diesen Bereichen die Druckkräfte die Hauptbeanspruchung darstellen.

Für die Funktion der meniskoiden Falten scheint - abgesehen von der Spannung der Gelenkkapseln als Folge der Verschiebung der Gelenkkörper während der Bewegung - auch die Beziehung der autochthonen Rückenmuskulatur zur Gelenkkapsel von Bedeutung zu sein. Die tiefen Muskelbündel liegen den Kapseln direkt an und benutzen die Oberränder der Processus articulares superiores fallweise als "Hypomochlia", z.B. bei starker Ventralflexion oder Rotation. Bei ausgiebiger Kontraktion des Musculus erector spinae wird der Druck innerhalb der osteofibrösen Röhre erhöht, in der die autochthone Rückenmuskulatur liegt. Damit werden die Gelenkkapseln und meniskoiden Falten von dorsal her in den Gelenkspalt hineingepreßt. Die Ligamenta flava üben in den Lendenwirbelgelenken bei jeder größeren Verschiebung der Gelenkkörper eine ähnliche Wirkung von ventral her aus (Abb. 73).

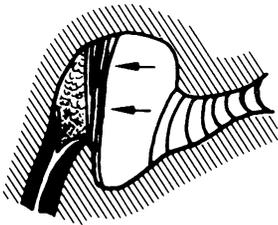


Abb. 73: Meniskoide Falten und Lig.flavum; bei Ventralflexion werden die meniskoiden Falten durch die Spannung des Lig.flavum in den Gelenkspalt gepreßt.

Druckübertragungen durch meniskoide Falten dürften besonders in den Extremstellungen einzelner Bewegungen eine Rolle spielen. Der von mehreren Autoren (HADLEY, 1956 u.a.) erhobene Befund, daß verschiedene Falten zum Teil reichlich von Nervenfasern durchzogen sind, widerspricht dieser Auffassung nicht, da diese so reichlich in Fett- und Bindegewebe eingebettet sind, daß eine direkte Druck- oder Quetschwirkung ausgeschlossen erscheint.

## 6 Bedeutung der Wirbelgelenke für die Kinematik der Wirbelsäule

### 6.1 Allgemeines zur Kinematik der Wirbelsäule

Die Beweglichkeit der Wirbelsäule beruht auf der Verschieblichkeit innerhalb des einzelnen Bewegungssegmentes. Dadurch ist unser Achsenorgan in der Lage, zwei in gewissem Sinne gegensätzliche Aufgaben zu erfüllen. Einerseits wird im Zusammenhang mit den Extremitäten über die Summation vieler Einzelbewegungen unsere nähere Umgebung erreichbar, andererseits können durch die Hintereinanderschaltung der Bewegungssegmente Stoßbelastungen aufgefangen werden.

Der Begriff des Bewegungssegmentes (JUNGHANNS, 1933) hilft zwar bei der Beschreibung morphologischer Einzelheiten und ihrer Veränderungen, läßt jedoch leicht übersehen, daß bei jeder Bewegung eines Wirbels alle angrenzenden, verbindenden Strukturen mitbeteiligt sind (STEIN, 1953). Für die Beurteilung der kinematischen Funktion muß die Wirbelsäule anders gegliedert werden. Auf Grund morphologischer Merkmale der Wirbel lassen sich "Bewegungsregionen" abgrenzen, innerhalb der besondere funktionelle Beziehungen bestehen.

In jeder Bewegungsregion sind Segmente unterschiedlicher Beweglichkeit zusammengefaßt, die sich aus differenten Neigungs- und Öffnungswinkeln, unterschiedlichen Gelenkfortsatzlängen und besonderen Verankerungen einzelner Wirbel ergibt. Ein relativ starres Bewegungssegment bildet jeweils die Basis für kranial folgende Segmente mit größerer Beweglichkeit. Muskeln und Bänder stellen integrierende Führungseinrichtungen dar. Als Bewegungsregionen werden somit nicht die herkömmlichen Abschnitte Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule betrachtet, sondern funktionell geschlossene Wirbelgruppen. Die Grenzen der Bewegungsregionen liegen jeweils im knöchernen Bereich eines Wirbels. Als funktionell geschlossene Bewegungsregionen werden unterschieden:

- "Kopfgelenke" bis 3. Halswirbel (Obere Halswirbelsäule),
- 3. Halswirbel bis 1. (2.) Brustwirbel,
- 1. (2.) Brustwirbel bis (11.) 12. Brustwirbel,
- (11.) 12. Brustwirbel bis Kreuzbein.

Diese Einteilung darf nicht als starres System betrachtet werden, sondern bezieht sich auf gemeinsame Merkmale des Bewegungsablaufes in den Segmenten einer Region. Die Variabilität der Grenzen kann als Ausdruck der Kranial- oder Kaudalvariation innerhalb der Wirbelsäule angesehen werden.

Innerhalb des einzelnen Bewegungssegmentes decken sich in der Normalhaltung die entsprechenden Gelenkflächen weitgehend, abgesehen von der unterschiedlichen Ausdehnung der absoluten, korrespondierenden Gelenkflächen. Die Beschreibung geringer Abweichungen von der normalen Lagebeziehung der Gelenkflächen in der Normalhaltung hat in der Literatur zu einer gewissen Verwirrung geführt.

Häufig werden Begriffe verwendet, die eigentlich einen pathologischen Zustand bezeichnen ("Subluxation", HADLEY, 1951; "Pseudoluxation", BAILEY, 1952; "Telescoping subluxation", REINHARDT, 1963 u.a.). Nur ERDMANN (1964, 1968, 1973) hat neutrale Begriffe, wie "Kippstellung" oder "Verschiebestellung" bzw. "Paßstellung" oder "Facettenschluß" benutzt.

LEWIN (1968) hat als einziger versucht, durch die Ausmessung der Abstände zwischen den Wirbelbogen benachbarter Wirbel eine Abgrenzung dieser Begriffe von pathologischen Inhalten zu erzielen. Eine allgemein verbindliche Definition der Beziehung der Gelenkflächen eines Wirbelgelenkes zueinander war auch ihm nicht möglich, da die flächenhafte Beziehung der Gelenkkörper der Wirbel von der Höhe der Disci intervertebrales und von der Gesamtform der Wirbelsäule abhängt. Ob die Stellung zweier Gelenkflächen zueinander noch als physiologisch oder schon als pathologisch anzusehen ist, kann demnach nur aus der Beurteilung des gesamten Achsenorganes abgeleitet werden.

Während des normalen Bewegungsablaufes verschieben sich die Gelenkkörper gegeneinander, wie es für plane Gelenke mit zwei Freiheitsgraden - als solche sind die Wirbelgelenke im einzelnen zu betrachten - charakteristisch ist. Bei bestimmten Bewegungen kommt es dabei zu einem "Klaffen" der Gelenkspalte (siehe Kap. 5).

Seit VIRCHOW (1911) wird die Aufgabe der Wirbelgelenke innerhalb der Kinematik der Wirbelsäule mit dem Begriff "Leitschiene" verbunden. Nach JENSEN (1959) sind sogar Bewegungen möglich, die dem eigentlichen "Gelenkmechanismus" nicht entsprechen. Er gibt aber keinerlei Hinweise, was darunter in bezug auf die Wirbelgelenke zu verstehen sei. DITTMAR (1930) nennt die Gelenkfortsätze "Träger der Führung und Hemmung der Wirbelbewegungen untereinander .....".

Es reicht nicht aus, wenn man die Kinematik der Wirbelsäule nur auf Grundlage ihrer passiv beweglichen Anteile zu verstehen sucht. Die Wirkungsweise der im einzelnen Bewegungssegment sowie über die Bewegungsregionen hinwegziehenden Muskeln darf nicht vernachlässigt werden. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise sollte das Zusammenwirken der Muskeln untersucht werden und nicht die Funktion des Einzelmuskels, auch wenn seine Individualität durch einen eigenen anatomischen Namen ausgedrückt wird.

Am Beispiel der Musculi rotatores läßt sich eine solche falsche, zu sehr vereinfachende Interpretationsweise besonders deutlich zeigen (BRÜGGER, 1977 u.a.). Jeder Muskel hat bei einseitiger Verkürzung sicherlich eine rotatorische Wirkungskomponente, die in der Namensgebung zum Ausdruck kommt. Dabei geht aber der Blick auf ihre zweite, nicht minder bedeutsame Funktion verloren. Bei gemeinsamer Kontraktion der rechten und der linken Muskeln wird auf Grund ihres Ansatzes an der Basis der Processus spinosi besonders im Bereich der Brustwirbelsäule eine Dorsalflexion herbeigeführt. So kann einer Verstärkung der Kyphose vorgebeugt und der Kontakt der Gelenkflächen unabhängig von der Körperhaltung gewährleistet werden. Die Hauptfunktion der Musculi rotatores ist somit die Dorsalflexion, also eine Haltefunktion.

Ähnliche Überlegungen müßten für alle Muskeln und Muskelbündel gelten, die an Wirbelfortsätzen angreifen. Durch beiderseitiges Zusammenwirken an den Bewegungssegmenten stabilisieren sie die Bewegungsregionen und verhindern das Abgleiten der Gelenke in Extremstellungen. Damit schaffen sie günstige Voraussetzungen für Minimalverschiebungen, die als "Bewegungsspiel" für die normale Funktion der Wirbelsäule notwendig sind.

Lageverschiebungen benachbarter Wirbel zueinander, aus deren

Summation sich die Bewegung innerhalb einer Bewegungsregion ergibt, werden in der Folge mit den gleichen eingeführten Begriffen benannt wie die entsprechende Bewegung. Unter Rotation wird hier die Drehbewegung zweier oder mehrerer Wirbel zueinander um eine longitudinale Rotationsachse (Rotationszentrum) verstanden. Eine Bewegung in der Sagittalebene wird als Sagittalflexion, bei Angabe der Richtung als Ventral- bzw. Dorsalflexion bezeichnet. Für eine Seitwärtsneigung in der Frontalebene wird der Begriff Lateralflexion verwendet, ohne die Richtung im einzelnen anzugeben.

Bei der Darstellung der mechanischen Verhältnisse im einzelnen Bewegungssegment soll versucht werden, die Bewegungsachsen zu beschreiben. Häufig ändert sich deren Lage während des Bewegungsablaufes. Vor allem in der Endphase einzelner Bewegungen kommt es auf Grund der morphologischen Gegebenheiten in einzelnen Bewegungssegmenten zu sprunghaften Verlagerungen dieser Achsen. Dies ist dann der Fall, wenn die Wirbelgelenke in der Endphase einer Bewegung im Sinne einer Bewegungseinschränkung beansprucht und damit zu "Hebelpunkten" werden. Derartige sprunghafte Änderungen der Lage der Bewegungsachsen treten in allen Bereichen der Wirbelsäule auf, in denen durch die besondere Ausformung der Wirbelgelenke im Zusammenwirken mit den Disci intervertebrales und den Ligamenta eine Einschränkung bestimmter Bewegungen gegeben ist. An einzelnen Gelenkflächen können dabei im Gebiet der "Hebelpunkte" Zonen extremer Beanspruchung auftreten.

## 6.2 Vorgänge innerhalb der Bewegungsregion

### 6.2.1 Hauptbewegungen in den Bewegungsregionen

#### 6.2.1.1 "Kopfgelenke" und Bewegungssegment C<sub>2</sub>/C<sub>3</sub> als Bewegungsregion (Obere Halswirbelsäule)

Im Zusammenwirken der sechs Einzelgelenke entspricht die Funktion der Kopfgelenke einem Kugelgelenk. Die Form der Gelenkkörper, der komplizierte Bandapparat und die beteiligte Muskulatur lassen kaum isolierte Bewegungen einzelner Gelenke zu. BROCHER (1970) stellt zurecht fest, daß die Kopfgelenke in bezug auf ihre Hauptbewegungsmöglichkeiten nicht streng segmental zu trennen sind. Betrachtet man die einzelnen Bereiche für sich, so kann dem "Oberen Kopfgelenk" Sagittal- und Lateralflexion zugeordnet werden, während im "Unteren Kopfgelenk" Sagittalflexion und Rotation stattfinden.

Der Atlas weist nach den Untersuchungen von GUTMANN (1956), LEWIT und KRAUSOVA (1963, 1967) und anderen Autoren bei der Flexionsbewegung in der Sagittalebene je nach dem Radius der Bewegung eine paradoxe Beweglichkeit auf. Während sich bei der Nickbewegung die Distanz zwischen Occiput und Arcus posterior atlantis vergrößert, kommt es beim Anziehen des Kinnes an die Brust zu einer Annäherung dieser beiden Knochenpunkte. Der Atlas ist demnach als "knöcherner Discus" zwischen den Condylis occipitales und dem Axis zu verstehen; dabei wird er von kaudal her auch durch sehr feste meniskoide Falten abgestützt. Im "Unteren Kopfgelenk" sinkt nach den Angaben von HENKE (1863), FICK (1911), STRASSER (1913) u.a. bei der Rotation der Atlas auf dem Axis auf einer Schraubenlinie ab. Nach eigenen Beobachtungen (PUTZ und POMAROLI, 1972) vollzieht sich die Rotation während der ersten 20 Grad in einer Transversalebene, erst bei weiterer Drehung sinkt

der Atlas gegen den Axis ab. Das Ausmaß einer geringeren Translation wurde mit 2,4 mm bestimmt.

Voraussetzung für die außerordentlich vielseitige und differenzierte Beweglichkeit der Kopfgelenke ist die besondere Fixierung des Axis auf dem darunter liegenden dritten Halswirbel. Dieser nimmt auf Grund verschiedener Merkmale innerhalb der Halswirbelsäule eine besondere Stellung ein. Der Neigungswinkel seiner oberen Gelenkflächen ist signifikant größer, der Öffnungswinkel dagegen deutlich kleiner als an den übrigen Halswirbeln (Abb. 74). Die Distanz zwischen Wirbelkörper und Gelenkflächen ist ähnlich groß wie beim siebten Halswirbel, der quere Abstand der Gelenkflächen dagegen relativ klein. Die Unterstützungsfläche des zweiten Halswirbels ähnelt somit – wie bei allen Wirbeln – einem gleichschenkeligen Dreieck, dessen Höhe jedoch bedeutend größer ist. Rotation und Sagittalbewegung sind daher innerhalb des Bewegungssegmentes C<sub>2</sub>/C<sub>3</sub> im Vergleich zur übrigen Halswirbelsäule etwas eingeschränkt (VIRCHOW, 1911; FICK, 1911; STRASSER, 1913; BAKKE, 1931; MARKUSKE, 1971 u.a.). Im Zusammenwirken mit der Muskelverspannung (vor allem Musculus semispinalis cervicis) bildet damit der dritte Halswirbel einen relativ stabilen "Sockel" für die Kopfgelenke. Diese Auffassung wird durch die Angaben von MINNE und Mitarbeitern (1970) und von MESTDAGH (1976) gestützt. Nach PICHLER (1955) schränken die Ligamenta intertransversaria die Flexion zwischen zweitem und drittem Halswirbel wesentlich ein.

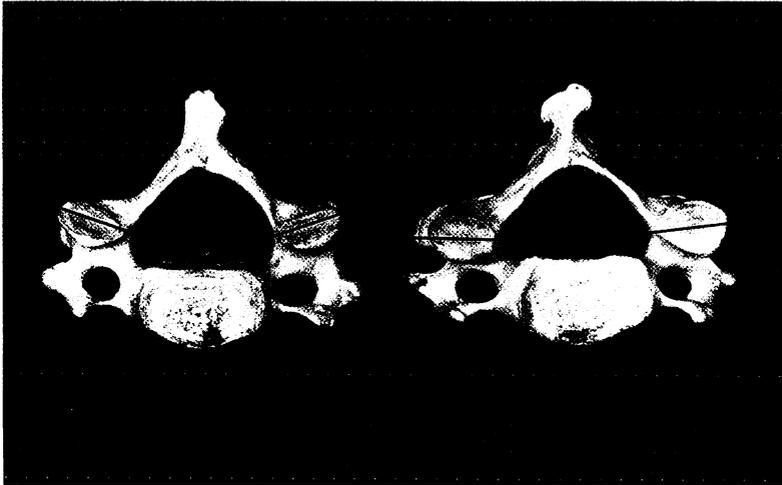


Abb. 74: Öffnungswinkel ( $\beta$ ) des 3.(a) und 4.(b) Halswirbels derselben Wirbelsäule

Die Gelenke zwischen Occiput und drittem Halswirbel bilden demzufolge eine funktionelle Einheit ("Obere Halswirbelsäule"), deren im Vergleich zur übrigen Halswirbelsäule relativ starrer Sockel erst das fein abgestufte Bewegungsspiel des Atlas zwischen Occiput und Axis ermöglicht.

### 6.2.1.2 Bewegungsregion C<sub>3</sub> bis Th<sub>1</sub> (Th<sub>2</sub>)

Bereits in einer früheren Untersuchung (PUTZ, 1976) wurde die Auffassung vertreten, daß der erste Brustwirbel auf Grund einer Reihe von Merkmalen funktionell der Halswirbelsäule zuzuordnen sei. Auch er stellt, ähnlich wie der dritte Halswirbel, einen Sockel für die kranial anschließenden Wirbel dar. Einige morphologische Merkmale, wie Neigungswinkel und Öffnungswinkel, weisen auf diese Sonderstellung hin. Sie entsprechen eher den Verhältnissen des siebten Halswirbels als denen der übrigen Brustwirbel. Auch die Art seiner Verspannung in der oberen Thoraxapertur macht seine Sonderstellung deutlich.

Die Ergebnisse von STOFFT und MÜLLER (1971) unterstützen diese Auffassung. Die Gelenkflächen zwischen dem siebten Halswirbel und dem ersten Brustwirbel nehmen auf Grund ihrer Ausdehnung eine Sonderstellung ein. Aus verschiedenen Bewegungsstudien geht hervor, daß die Beweglichkeit des Segmentes C<sub>7</sub>/Th<sub>1</sub> in Sagittal- und Frontalebene relativ eingeschränkt ist (BAKKE, 1931; LIECHTI, 1944).

Für die Zusammenfassung dieses Bereiches der Wirbelsäule zu einer "Bewegungsregion" spricht auch die Feststellung von WOLFF (1963), daß die Mechanismen der statischen Sicherung des Thorax (Musculi scaleni) im wesentlichen bis zum dritten Halswirbel nach kranial reichen. Nach WOLFF "trägt die mittlere Halswirbelsäule" den Thorax.

In bezug auf die **Rotation** ergeben sich für die Bewegungssegmente der Bewegungsregion C<sub>3</sub> bis Th<sub>1</sub> (Th<sub>2</sub>) gemeinsame Gesichtspunkte. Die Rotationsachse verläuft jeweils knapp dorsal vom Mittelpunkt des Wirbelkörpers. Die zugehörigen Gelenkspalte liegen nicht auf Tangenten der Rotationskreise, sondern sind in einer Flucht angeordnet. Auf diese Tatsache wird in der Literatur vielfach hingewiesen. Sie ist die Ursache dafür, daß die Rotation in dieser Bewegungsregion keine einfache Bewegung bleibt, sondern zwangsläufig mit einer Lateralflexion kombiniert wird. Auf Grund des Neigungswinkels kommt es zu einer Lateralflexion des jeweils kranialen Wirbels nach der Seite der Rotation (Abb. 75). Deshalb ist bei weitgehender Ventralflexion eine größere Rotation möglich als bei gestreckter Halswirbelsäule.

Für die **Sagittalflexion** wurde von PENNING (1964, 1968, 1978) eine transversale Achse bestimmt, die durch die Mitte des Körpers des jeweils kaudal gelegenen Wirbels verläuft. Sie stellt das gemeinsame Bewegungszentrum für die Verschiebung des Wirbelkörpers und der Gelenkfortsätze des jeweils kranial gelegenen Wirbels dar. Die Einstellung des Neigungswinkels der Gelenkflächen, die Ausformung der hyalinen Knorpelaufgabe und die Form der Wirbelkörperdeckplatte machen eine ausgiebige Sagittalflexion möglich. Nach PENNING (1978) liegen die zervikalen Bandscheiben und Gelenkflächen eines Bewegungssegmentes in lateraler Projektion auf einer einheitlichen Bewegungslinie, so daß von der Form der Gelenkkörper her der Flächenkontakt während des Bewegungsablaufes gewährleistet ist. An Funktionsaufnahmen konnte aber gezeigt werden, daß es auch in der Halswirbelsäule bei extremer Ventral- oder Dorsalflexion zu einem Klaffen der Gelenkspalte kommt (Abb. 76). Im einzelnen Wirbelgelenk bleiben dabei die Gelenkflächen nur "linear" in Kontakt. Auf Grund der Verschiebung in die Endstellung dieser

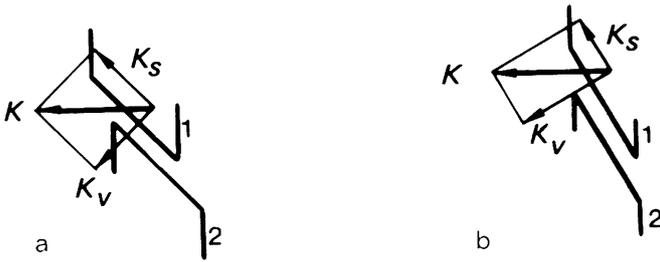


Abb. 75: Zwangsläufige Lateralflexion - Bewegungskoppelung bei der Rotation in Abhängigkeit vom Neigungswinkel (**a**) der Gelenkflächen (1,2) auf der Gegenseite der Rotationsrichtung

**a**  $\alpha = 45^\circ$

**b**  $\alpha = 60^\circ$

**K** nach ventral gerichtete Kraft

$K_v$  Teilkraft, die von der Gelenkfläche aufgenommen wird.

$K_s$  Teilkraft, die zur Kranialverschiebung führt.

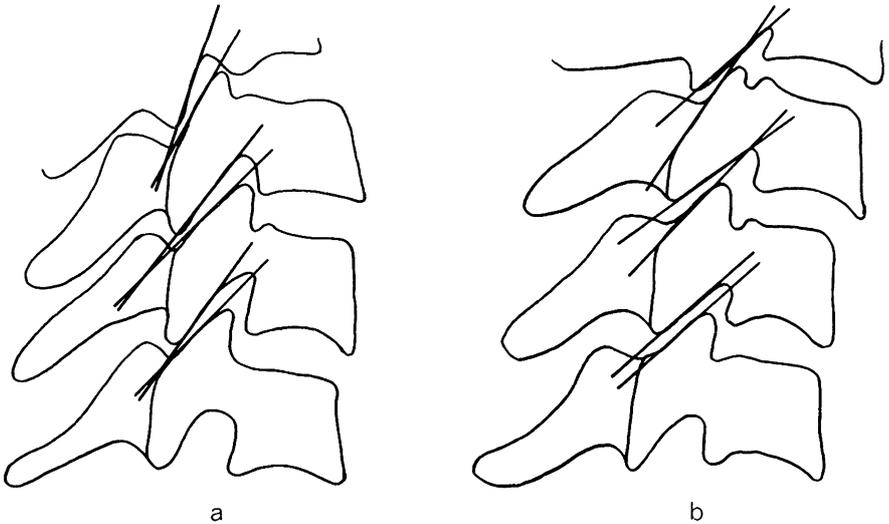


Abb. 76: "Klaffen" der Gelenkspalte der Halswirbelgelenke bei Dorsalflexion (**a**) und Ventralflexion (**b**)

(Röntgenpause von seitlichen Aufnahmen eines 35jährigen Mannes)

Bewegung berühren sich demnach die Oberränder der Gelenkflächen des kaudalen Wirbels mit einer transversal eingestellten, schmalen Zone im mittleren Bereich der Gelenkflächen des zugehörigen kranialen Wirbels.

Auf die zwangsläufige Koppelung von **Lateralflexion** und **Rotation** wurde bereits hingewiesen. Im Zuge der Lateralflexion erhöht sich die Belastung der Gelenkflächen auf der Seite der Bewegungsrichtung (= konkave Seite der Lateralflexion; Abb. 77). Die Lateralflexion ist mit einer Rotation des jeweils kranialen Wirbels in Richtung der Seitwärtsneigung kombiniert, die vom Neigungswinkel abhängt (PENNING, 1968, 1978). Für das Ausmaß der zwangsläufigen Mitbewegung ist nach ARKIN (1950) und JIROUT (1967) neben der Einstellung der Gelenkflächen die Zugwirkung der Weichteile (Bänder, Muskeln) verantwortlich.



Abb. 77: Zwangsläufige Rotation - Bewegungskoppelung bei der Lateralflexion in Abhängigkeit vom Neigungswinkel (a) der Gelenkflächen auf der Innenseite der Flexionsrichtung

a  $\alpha = 45^\circ$

b  $\alpha = 60^\circ$

K nach kaudal gerichtete Kraft

$K_V$  Teilkraft, die von der Gelenkfläche aufgenommen wird.

$K_S$  Teilkraft, die zur Kaudalverschiebung führt.

Die Achse der Lateralflexion verläuft innerhalb des Bewegungssegmentes nicht konstant. Die Gründe dafür liegen in den schon im jugendlichen Alter eintretenden Veränderungen der Disci intervertebrales der Halswirbelsäule und den in der Folge auftretenden unkonvergenten Spalten. Der Bewegungsablauf erfolgt auf Grund der unregelmäßigen Begrenzung dieser Spalte nicht in geometrisch einfach darstellbarer Weise, wie es bei anderen Bewegungen möglich ist. Bei intakten Bandscheiben ist der Radius der Einzelbewegung relativ groß. Auf Grund der Höhenabnahme der Bandscheibe und der Spaltbildungen wird er jedoch wesentlich verkürzt. Die Processus uncinati bilden bei der Lateralflexion in einem schmalen Bereich ihrer nach medial abfallenden Fläche ein Widerlager für die gleichseitige Randzone des jeweils kranial gelegenen Wirbelkörpers. Damit wird jede seitliche Verschiebung verhindert, und die Achse der Lateralflexion liegt in der Endphase annähernd im Krümmungsmittelpunkt des unkonvergenten Spaltes (Abb. 78).

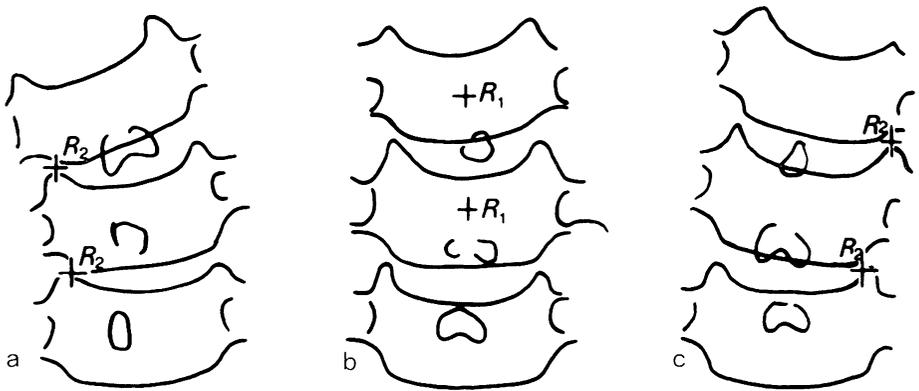


Abb. 78: Lage der Bewegungszentren (R) bei Lateralflexion der Halswirbel (Röntgenpause von a.-p.-Aufnahmen eines 35jährigen Mannes); in der Endphase der Bewegung verlagert sich die Achse in den Bereich des "unkovertebralen" Spaltes.

- a Lateralflexion nach rechts
- b "Normalhaltung"
- c Lateralflexion nach links

#### 6.2.1.3 Bewegungsregion Th<sub>1</sub> (Th<sub>2</sub>) bis (Th<sub>11</sub>) Th<sub>12</sub>

Die Brustwirbelsäule entspricht ungefähr einer Bewegungsregion. Den Sockel seiner relativ eingeschränkten Rotation bildet jeder Wirbel, dessen obere Gelenkflächen noch dem "thorakalen Einstellungstyp" entsprechen, während die unteren Gelenkflächen wie bei den Lendenwirbeln nach dorsal abgewinkelt sind. Die untere Grenze dieser Bewegungsregion variiert als Merkmal einer eventuellen Kaudal- oder Kranialvariation. Innerhalb der Brustwirbelsäule sind zwei Bereiche zu unterscheiden - Th<sub>1</sub> (Th<sub>2</sub>) bis ca. Th<sub>8</sub> und Th<sub>8</sub> bis (Th<sub>11</sub>) Th<sub>12</sub> -, deren Bewegungssegmente sich bei bestimmten Bewegungen verschieden verhalten.

Bei der **Rotation** verläuft die Achse in den meisten Bewegungssegmenten in longitudinaler Richtung ungefähr durch den Mittelpunkt der Wirbelkörper und der Bandscheibe. Unter Berücksichtigung der geringen Krümmung in der Sagittalebene sind die Gelenkflächen eines Bewegungssegmentes als Ausschnitte aus der Oberfläche eines Rotationsellipsoids aufzufassen. Der Oberrand der Gelenkflächen liegt dabei näher einem der Pole des Ellipsoids, der Unterrand näher dem Äquator, ohne ihn jedoch zu überschreiten. Transversale Schnitte durch die Gelenkflächen der Brustwirbelgelenke stellen Ausschnitte aus Kreisbahnen dar, deren Mittelpunkte der Rotationsachse entsprechen (Abb. 79).

Auf den ersten Blick erscheint es paradox, daß in der thorakalen Region der Wirbelsäule so günstige Voraussetzungen für eine Rotation gegeben sind. Dieser scheinbare Gegensatz kann durch den Mechanismus der Begrenzung der Rotation in den einzelnen Bewegungssegmenten erklärt werden. Während das Ausmaß der Rotation in Hals- und Lendenwirbelsäule durch die Form der Gelenkflächen weitgehend begrenzt wird, beteiligen sich die Brustwirbelgelenke

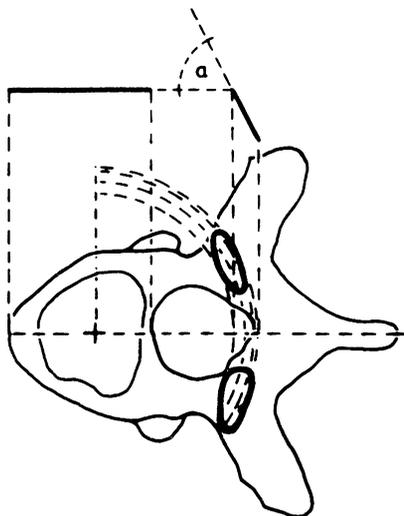


Abb. 79: Kreisförmige Krümmung der Gelenkflächen der Brustwirbelgelenke in der Transversalebene; entsprechend dem Neigungswinkel ( $a$ ) besitzen die kranialen Anteile der Gelenkflächen einen kleineren Krümmungsradius als die kaudalen.

nicht an der Hemmung dieser Bewegung. Über die seitwärts ausladenden Processus transversi, die mit ihnen verbundenen Rippen und die zugehörigen Bänder bestehen in der Brustregion günstigere Hebelverhältnisse zur Begrenzung der sagittalen Kräfte, die in der Endphase der Rotation auftreten (Abb. 80). Dementsprechend weisen die Kapseln der Brustwirbelgelenke auch kaum Verstärkungszüge auf.

Die Rotation ist ab dem dritten Brustwirbelgelenk nicht mit einer Lateralflexion gekoppelt. Der Grund dafür liegt ebenfalls in der kreisförmigen Krümmung der Gelenkflächen in der Transversalebene. Da die Krümmungsmittelpunkte mit der Rotationsachse übereinstimmen, können in der Endphase der Rotation keine in longitudinaler Achse des Körpers ausgerichteten Druckkomponenten auftreten, die eine zwangsläufige Lateralflexion bedingen würden. Eine mit der Rotation kombinierte Lateralflexion ist nur im oberen Bereich der Brustregion möglich, wenn die Gelenkflächen nicht auf einer gemeinsamen konzentrischen Krümmungsfläche liegen.

An der **Sagittalflexion** nehmen in dieser Bewegungsregion in nennenswertem Ausmaß die unteren Brustwirbel teil, während der mittlere und obere Anteil etwas starrer sind. Sie wirken sich nur als geringe Krümmungsänderung des Rückens aus. Man hat den Eindruck, daß sich mittlerer und oberer Bereich der Brustwirbelsäule von den übrigen Elementen des Thorax wie von einer Klammer führen lassen. Bei der Sagittalflexion der unteren Brustwirbelgelenke bleibt der flächenhafte Kontakt auch in Extremstellungen erhalten, so daß keine Beanspruchungsspitzen am Rande der Gelenkflächen auftreten.

Eine geringe **Lateralflexion** ist von der Form der Gelenke her in allen Brustwirbelgelenken möglich, wie die Bewegungsstudien am Lebenden und die Untersuchung der Präparate gezeigt haben. Nach HEINE (1957) lassen sich in dieser Region verschiedene Bewegungstypen unterscheiden. Er findet an einem Teilkollektiv seiner Ver-



**Abb. 80:** Länge der Hebelarme bei Verlagerung der Rotationszentren ( $R - R'$ ) im Ablauf der Bewegung ("Unterstützungsflächen" - schraffiert)

- a Halsregion
- b Brustregion
- c Lendenregion
- K Kräfte
- 1 Proc.spinosus
- 2 Proc.transversus
- 3 Ripper
- 4 Proc.costarius

suchspersonen die Möglichkeit einer Lateralflexion größer als in der gesamten übrigen Wirbelsäule, ein Befund, der an meinem Untersuchungsgut nicht erhoben werden konnte. Bei anderen Versuchspersonen war die seitliche Beugung nicht möglich, und die Brustwirbelsäule blieb bei der Lateralflexion des Rumpfes als "starrer Anteil" gestreckt. Darüber hinaus fand er Mischformen dieser Bewegungstypen. Die Untersuchung der Bewegungsmuster der Brustwirbelsäule wird nach HEINE dadurch erschwert, daß bei jeder Seitneigung zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes Kompensationsbewegungen durchgeführt werden. Die relative Starrheit der oberen Brustwirbelsäule ist nach seiner Ansicht durch die Muskelführung bedingt.

Die bei der Lateralflexion als Teilkräfte einseitig auftretenden Druckkomponenten bewirken eine zwangsläufige rotatorische Mitbewegung. Je mehr der Neigungswinkel gegen das untere Ende der Region hin zunimmt, desto geringer wird diese zwangsläufige Mitbewegung. In Einzelfällen, in denen der Neigungswinkel 90 Grad beträgt, kann keine zwangsläufige Rotation stattfinden.

#### 6.2.1.4 Bewegungsregion (Th<sub>11</sub>) Th<sub>12</sub> bis Os sacrum

Gemeinsames Merkmal der Wirbel dieser Bewegungsregion ist u.a. eine spezifische Ausformung der Gelenkflächen. Diese sind, wie unter Kap. 3.1 ausgeführt, abgewinkelt und bestehen aus einem mehr frontal und einem mehr sagittal eingestellten Anteil. Die Basis dieser Bewegungsregion bildet das Os sacrum, dessen Facies superior zusammen mit den Processus articulares superiores eine dreieckige, nahezu gleichseitige Unterstützungsfläche bildet. Der Öffnungswinkel ist wesentlich größer als an den Lendenwirbeln, wodurch eine große Abstützung gegeben ist.

Mechanismus und Ausmaß der **Rotation** werden durch Abwinkelung der Gelenkflächen maßgeblich beeinflußt. Auf den ersten Blick erscheint eine Rotationsbewegung nicht möglich. Verschiedene Autoren verneinen deshalb jede Rotation innerhalb der Lendenwirbelsäule (SIEGLBAUER, 1958 u.a.), von anderen wird festgestellt, daß das Ausmaß der Rotation unerheblich sei (DITTMAR, 1930; BRAUS - ELZE, 1954; HEINE, 1957 u.a.). Eigene Untersuchungen an Versuchspersonen und an Leichenmaterial haben eindeutig gezeigt, daß bei aufrechter Haltung im einzelnen lumbalen Bewegungssegment eine geringfügige Rotation von 3 - 7 Grad durchgeführt werden kann, die dem Ausmaß der Sagittalflexion direkt proportional ist. Diese Ergebnisse bestätigen die Befunde von GREGERSEN und LUCAS (1967), von LUMSDEN und MORRIS (1968) an Versuchspersonen sowie die

Angaben von MARKOLF (1972), der isolierte Wirbelsäulen untersuchte.

Voraussetzung für die Rotation ist die Erweiterungsmöglichkeit des Gelenkspaltes der lumbalen Wirbelgelenke. Die lateralen Flächenanteile der Processus articulares superiores und inferiores schließen einen nach dorsal offenen spitzen Winkel ein (Öffnungswinkel, Abb. 12, Abb. 81) und konvergieren zudem häufig etwas nach kaudal. Bei der sagittalen Verschiebung der Gelenkflächen im Sinne der Ventralflexion kommt es zwangsläufig zur Verbreiterung des Gelenkspaltes, wodurch die Rotation ermöglicht wird. Innerhalb des lumbosakralen Bewegungssegmentes ist auf Grund des Öffnungswinkels von ca. 90 Grad eine besondere Zunahme der Rotationsmöglichkeit bei Ventralflexion gegeben.



Abb. 81: Lendenwirbel mit einem Öffnungswinkel von  $\beta = 25^\circ$  (Ansicht von kranial)

Die **Sagittalflexion** kann im thorakolumbalen und lumbosakralen Grenzgebiet in sehr großem Maß durchgeführt werden (DITTMAR, 1930; HEINE, 1957; PLATZER, 1978), im mittleren Abschnitt ist sie eher eingeschränkt. Aus der Normalhaltung ist das Ausmaß der Ventralflexion doppelt so groß wie das der Dorsalflexion. Bei beiden Bewegungsrichtungen kommt es zu einer Verschiebung der Wirbel eines Bewegungssegmentes in sagittaler Richtung. Nach REICHMANN (1972) verläuft die Achse der Sagittalflexion durch die Bandscheibe des jeweils tiefer liegenden Lendenwirbels. Sowohl bei Ventral- als auch bei Dorsalflexion tritt ein keilförmiges Klaffen (Abb. 82) des Gelenkspaltes auf (FICK, 1911; SCHENK, 1964; REICHMANN, 1970/71; REICHMANN u.a., 1972). In der Anfangsphase der Ventralflexion wird der Kontakt im dorsalen Anteil des Gelenkspaltes aufgehoben und dadurch die Druckbeanspruchung im vorderen, mehr frontal eingestellten Bereich erhöht. In der Endphase der Ventralflexion werden die Gelenkflächen der Processus articulares inferiores über



Abb. 82: Sagittalschnitt durch Lendenwirbelgelenke in Dorsalflexionsstellung; die Gelenkspalte erweitern sich keilförmig nach kranial.

die kranialen Endzonen der entsprechenden Flächen der *Processus articulares inferiores* "gehebelt". Die vorderen Anteile der Gelenkflächen nehmen die nach ventral gerichteten Teilkräfte auf und sind deshalb frontal ausgerichtet.

In der Endphase der Dorsalflexion geht im kranialen Gelenkanteil der Kontakt der Gelenkflächen verloren. Die Spitzen der in den Gelenken auftretenden keilförmigen Räume weisen nach kaudal. Die Druckaufnahme durch die lateralen Anteile der Gelenkflächen erhöht sich, und die Enden der *Processus articulares inferiores* werden gleichzeitig in die Vertiefungen (*Recessus*) gepreßt, die an die entsprechenden Gelenkflächen des nach kaudal anschließenden Wirbels grenzen. Der Anschlag der sich ineinanderschiebenden Gelenkfortsätze kann dann besonders hart und ruckartig werden, wenn der Öffnungswinkel der *Processus articulares inferiores superiores* gegen null Grad beträgt, wenn also die dorsalen Anteile der Gelenkflächen genau sagittal eingestellt sind. Ist der Winkel größer als null Grad, so ist in der Endphase der Dorsalflexion eine zusätzliche Druckaufnahme über die dorsalen Anteile der Gelenkflächen möglich. Vollzieht sich dieser in der Literatur als "Hyperlordosierung", "Subluxation" oder ähnlich bezeichnete Ablauf ruckartig, so wird er von Schmerzen begleitet (GROHER, 1975). Der Vorgang

an sich ist als normale Endphase der Dorsalflexion zu betrachten (REICHMANN, 1970/71).

Die **Lateralflexion** ist im thorakolumbalen Übergangsbereich und in der oberen Lendenwirbelsäule in größerem Umfang möglich als in ihrem unteren Anteil. Am geringsten ist sie im lumbosakralen Bewegungssegment, was neben der relativ verbreiterten Unterstützungsfläche auf die seitliche Fixierung durch die Ligamenta iliolumbalia zurückgeführt werden kann (LUMSDEN und MORRIS, 1968).

Die seitliche Beugung wird dadurch ermöglicht, daß die dorsalen Anteile der Gelenkflächen zumeist nicht streng sagittal ausgerichtet sind und häufig grubige Vertiefungen aufweisen. Schon eine geringfügige Konvergenz der Gelenkspalte nach kaudal ergibt den für die Lateralflexion notwendigen Spielraum, der bei gleichzeitiger Ventralflexion weiter zunimmt. Dabei kommt es ähnlich wie bei der Bewegung in der Sagittalebene zu einer keilförmigen Erweiterung der Gelenkspalte (REINHARDT, 1963). Zugleich tritt in den Bewegungssegmenten eine zwangsläufige Rotation ein, die zur Seite der jeweiligen Flexion gerichtet ist.

### 6.2.2 Mechanik in der Endstellung einzelner Bewegungssegmente

Der Bewegungsausschlag der Wirbelgelenke kann entsprechend den Prinzipien der allgemeinen Gelenklehre durch verschiedene Mechanismen begrenzt werden. Generell werden Band-, Muskel-, Weichteil- und Knochenhemmung unterschieden (FICK, 1890; PLATZER, 1978). Für die Mechanik der Wirbelsäule spielt die kombinierte Band- und Knochenhemmung die entscheidende Rolle. In der Endphase jeder Einzelbewegung werden innerhalb eines jeden Bewegungssegmentes verschiedene Bänder auf Grund von Hebelwirkungen angespannt, die durch die Form der Gelenkkörper erzwingen werden. Die Beanspruchung in der Endstellung ergibt sich aus dem Zusammenwirken von Gelenkkörpern, Bändern und Muskeln. Bei der Beurteilung von Funktionsstörungen müssen deshalb alle diese Parameter berücksichtigt werden, Einzelbefunde dürfen nicht isoliert bewertet werden.

Das Gleichgewicht zwischen den Kräften, die im Sinne der Bewegung wirken, und den Gegenkräften, die durch die Spannung der Bänder hervorgerufen werden, bestimmt den maximalen Bewegungsausschlag eines Gelenkes. Eine "Verriegelung" der Gelenke in der Endstellung wird durch die Verlagerung der Bewegungszentren (Hebelpunkte) und die damit verbundene Veränderung der Hebelarme herbeigeführt. Die Beanspruchungsgröße im Berührungsgebiet der Gelenkflächen ergibt sich aus der Wechselwirkung der wirkenden Kräfte und ihrer Hebelarme. Voraussetzung für die Abschätzung der Hebelarme ist die Bestimmung der Dreh- und Hebelpunkte für die einzelnen Bewegungsphasen.

#### 6.2.2.1 Rotation

In den Bewegungssegmenten der Region C<sub>3</sub> - Th<sub>1</sub> verläuft - bei von der Normalhaltung ausgehenden Bewegungen - die longitudinale Rotationsachse durch den Nucleus pulposus und knapp dorsal vom Mittelpunkt der Wirbelkörper. In der Endstellung der Rotation verlagert sich der Hebelpunkt der Drehkräfte vom Discus intervertebralis zum lateralen Bereich des der Rotation entgegengesetzt gelegenen Wirbelgelenkes. Dabei nehmen die Zugspannungen innerhalb der die Wirbel verbindenden Bänder sprunghaft zu. Dies trifft vor

allem die Ligamenta intertransversaria und die Ligamenta longitudinalia, während das Ligamentum supraspinale und das Ligamentum nuchae weniger beteiligt sind. Die Ligamenta flava, die im Halsbereich nur schwach ausgebildet sind, drücken dabei die Gelenkkapsel von medial an die Gelenkkörper.

Da die Gelenkflächen geneigt sind und nicht in einer transversalen oder vertikalen Ebene liegen, werden die Wirbelgelenke auf der Gegenseite der Rotationsrichtung in longitudinaler Richtung auseinandergedrängt. Die dort wirksame, nach ventral gerichtete Kraft läßt sich in Abhängigkeit von der Neigung der Gelenkkörper in zwei Komponenten zerlegen. Eine Teilkraft steht als reine Druckkraft senkrecht auf die Gelenkflächen, während die andere Komponente, in der Ebene des Gelenkspaltes verlaufend, eine Kranialverschiebung herbeiführt (Abb. 75, 83). Je größer der Neigungswinkel der Gelenkflächen ist, desto größer ist die senkrecht auf die Gelenkflächen gerichtete Druckkomponente. Dadurch wird die Ausweichmöglichkeit in der Lateralflexion eingeschränkt. Die zwangsläufige Lateralflexion verstärkt die Spannung der beteiligten Bänder zusätzlich und "verriegelt" die Endstellung der Rotation.

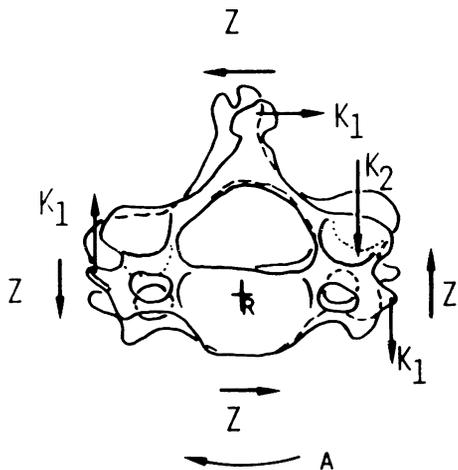


Abb. 83: Kräfte in der Endphase der Rotation in der Halswirbelsäule

R Rotationszentrum

A Rotationsrichtung

$K_1$  Summe der an Proc. spinosus und Proc. transversi angreifenden Zugkräfte

$K_2$  Summe der über die Wirbelgelenke fortgeleiteten Druckkräfte

$Z$  Summe der in Bändern auftretenden Zugkräfte

Der größte Neigungswinkel besteht innerhalb der Halswirbelsäule im Bewegungssegment  $C_2/C_3$ . Da der Öffnungswinkel hier kleiner ist als an den übrigen Halswirbeln (Abb. 74), bleibt das Ausmaß der Rotation zwischen zweitem und drittem Halswirbel gering, und die Endstellung wird besser stabilisiert als in allen anderen zervikalen Bewegungssegmenten. Dies ermöglicht erst das Bewegungsspiel der Kopfgeelenke.

Die Brustwirbelgelenke sind ohne wesentlichen Einfluß auf die Begrenzung der Rotation in dieser Bewegungsregion. Die Form der Fortsätze führt nicht zu einer Einschränkung der Drehbewegung. Das Kräftegleichgewicht wird ausschließlich von den an den Fortsätzen und Rippen angreifenden Kräften und den entgegengesetzten, in den Bändern auftretenden Zugkräften bestimmt. In jeder Phase

der Bewegung verläuft die Rotationsachse innerhalb des jeweiligen Discus intervertebralis (Abb. 84).

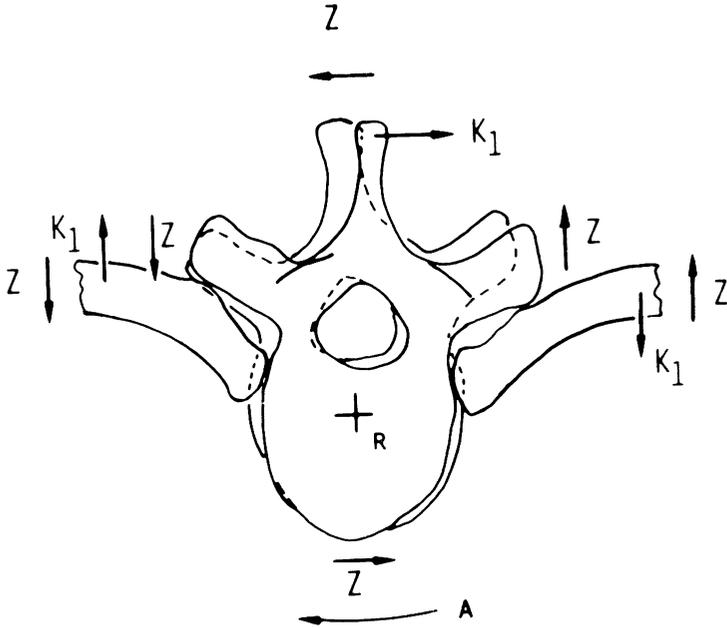


Abb. 84: Kräfte bei der Rotation in der Brustwirbelsäule; Erläuterungen siehe Abb. 83 (Interpretation im Text)

Für die Begrenzung der Rotation der Lendenwirbel spielt die Gliederung ihrer Gelenkflächen in je zwei Anteile eine maßgebliche Rolle (PUTZ, 1977). In der Endphase der nur in geringem Ausmaß möglichen Rotation werden die eher frontal eingestellten, kleineren Anteile der Gelenkflächen zu Widerlagern beträchtlicher Kräfte. Diesen Bereich benützen die wirkenden Momente als Hebelpunkt (Abb. 85). Im lumbosakralen Bewegungssegment sind die Gelenkflächen häufig nicht abgewinkelt, sondern in einem Öffnungswinkel bis ca. 90 Grad eingestellt (Abb. 86). Damit können hier in dorsoventraler Richtung wirkende Druckkräfte auf eine breitere Fläche verteilt werden. Die Rotation führt zu einer Biegebeanspruchung der nach dorsal vorragenden Anteile der Processus articulares superiores, was sich in der Anordnung der Spongiosa ausdrückt. Ihre Knochenbälkchen sind in der Transversalebene spitzbogenartig ausgerichtet. Die Richtung der Beanspruchung ist aus der Anordnung der Bälkchen nicht abzuleiten. Da an den Spitzen der Gelenkfortsätze und der Processus mamillares neben Muskeln die Verstärkungszüge der Gelenkkapsel ansetzen, ist eine Biegebeanspruchung der Fortsätze in beiden lateralen Richtungen anzunehmen. Die im Vergleich zu den Wirbelgelenken der übrigen Regionen außerordentlich festen, transversalen Verstärkungsbänder wirken einer Dorsalverschiebung entgegen, wie sie unilateral im Laufe der Rota-

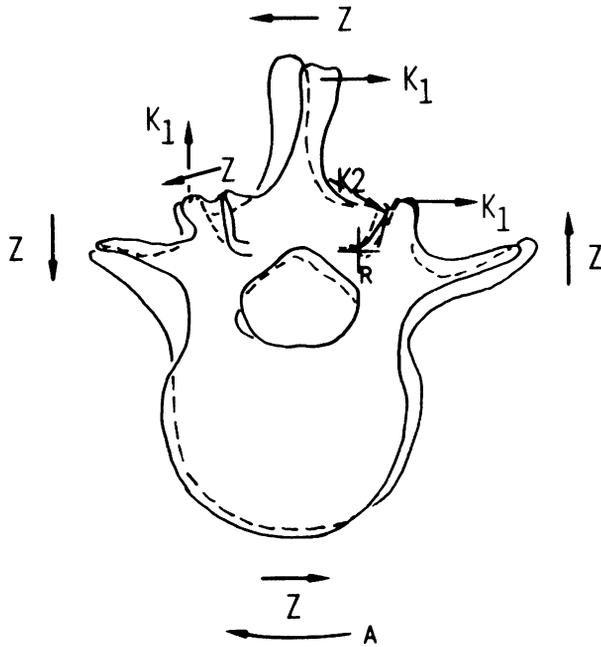


Abb. 85: Kräfte in der Endphase der Rotation in der Lendenwirbelsäule; Erläuterungen siehe Abb. 83 (Interpretation im Text)

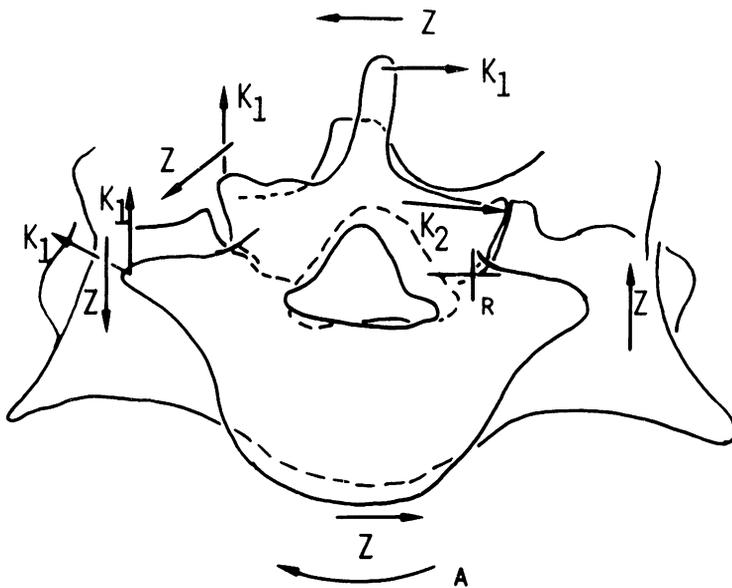


Abb. 86: Kräfte in der Endphase der Rotation im lumbosakralen Übergangsbereich; Erläuterungen siehe Abb. 83 (Interpretation im Text)

tion auftritt. Damit werden in der Endstellung der Rotation in den lumbalen Bewegungssegmenten immer beide Processus articulares superiores im gleichen Sinne auf Biegung beansprucht. Aus den Druckkräften der einen und den Zugspannungen der anderen Seite ergibt sich das Gleichgewicht der Momente in der Endstellung der Rotation.

#### 6.2.2.2 Sagittalflexion

Die Gelenkspalte der meisten Wirbelgelenke verlaufen schief zu Kreislinien, die von den Bewegungszentren aus konstruiert werden können. Dies drückt sich im Neigungswinkel aus. Während der Sagittalflexion ändert sich deshalb der Abstand des jeweils kranial gelegenen Gelenkkörpers vom Bewegungszentrum, und es kommt zu einem Klaffen der Gelenkspalte.

In der Endstellung der **Ventralflexion** ragen die jeweils kranialen Gelenkflächen über die kaudalen Gelenkflächen ein Stück weit nach ventral hinweg, so daß zwischen ihnen nur eine schmale, annähernd transversal eingestellte Kontaktfläche bestehen bleibt. Diese wird in der seitlichen Projektion zum Hebelpunkt der wirkenden Momente. Nach dorsal kaudal erweitert sich der Gelenkspalt zu einer Keilform. Durch die Abhebelung der dorsal vom Kontaktstreifen gelegenen Anteile der Gelenkkörper wird die Spannung der Bänder und Verstärkungszüge der Gelenkkapseln, die einer Ventralverschiebung entgegenwirken, zusätzlich erhöht und erreicht die Größe des ventralflektierenden Moments. Die Größe der im Bereich der schmalen Berührungsfläche der Gelenke wirkenden Druckkraft hängt vom Neigungswinkel ab. Je größer dieser ist, desto geringer müssen die Zugspannungen sein, die einer Ventralverschiebung entgegenwirken.

Die Ventralflexion und ihre sichere Begrenzung werden durch die Bauweise der dorsalen Bänder der Wirbelsäule möglich. Sie sind entweder aus elastischem Material aufgebaut oder weisen eine Anordnung auf, die erst ab einem bestimmten Bewegungsausschlag eine Anspannung herbeiführt.

Dieser Mechanismus wirkt im Prinzip in der gesamten Wirbelsäule. Am besten ist er in der Bewegungsregion C<sub>3</sub>-Th<sub>1</sub> zu überblicken (Abb. 76). Obwohl durch die bereits im zweiten Lebensjahrzehnt beginnende Spaltbildung in den zervikalen Bandscheiben eine weitgehende Gefügelockerung eintritt, wird dadurch eine sichere Fixierung der Endstellung erreicht. In der Brustwirbelsäule ist ein Klaffen röntgenologisch zwar nicht darzustellen, auf Grund der Neigung der Gelenkflächen muß es aber in geringem Maß auftreten.

Die größte Bedeutung hat der geschilderte Begrenzungsmechanismus für die Lendenwirbelsäule und ihre Übergangsregionen (Abb. 87). Die vorderen Anteile der Lendenwirbelgelenke nehmen auf Grund ihrer mehr frontalen Ausrichtung und ihres großen Neigungswinkels den Hauptteil der ventralflektierenden Kräfte auf. Die Abhebelung der Gelenkkörper, die zu einer beträchtlichen Erweiterung des Gelenkspaltes führt, wird vor allem durch das Ligamentum interspinale begrenzt. Seine Fasern verlaufen nicht gerade und werden erst ab einer bestimmten Entfernung der Processus spinosi voneinander gespannt (siehe auch Abb. 37). Da die Ligamenta interspinalia kaudal nahe der Basis des Dornfortsatzes angeheftet sind, wird der Berührungsdruk der Gelenkflächen in der Endphase der Ventralflexion durch die Verkürzung eines Hebels zusätzlich erhöht.

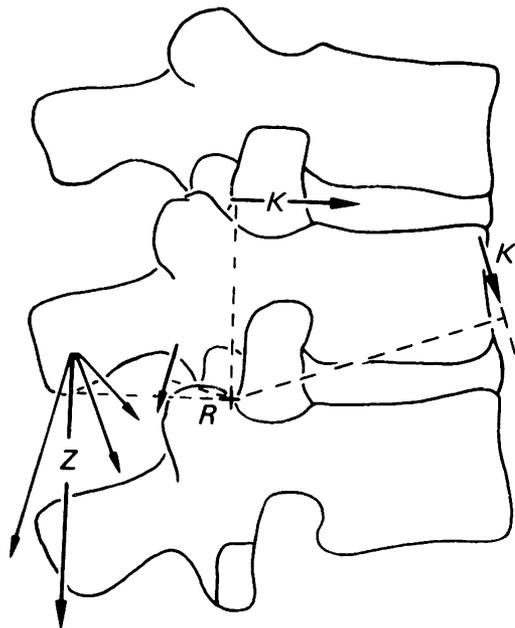


Abb. 87: Kräfte in der Endphase der Ventralflexion der Lendenwirbel (Interpretation im Text)

K in Richtung der Flexion wirkende Kräfte  
 Z entgegengerichtete Zugspannungen  
 R Bewegungszentrum ("Hebelpunkt")

In der Endstellung der Dorsalflexion (Abb. 88) rutschen die Spitzen der *Processus articulares inferiores* etwas über den unteren Rand der Gelenkflächen der *Processus articulares superiores* nach kaudal. Gleichzeitig erweitern sich die Gelenkspalte nach kranial. Unter normalen Bedingungen werden die *Processus articulares* dabei von Verstärkungszügen der Gelenkkapseln in der kaudalen Verschiebe-

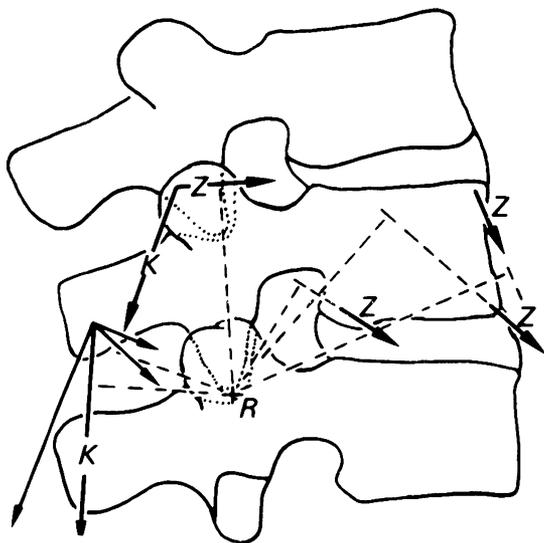


Abb. 88: Kräfte in der Endphase der Dorsalflexion der Lendenwirbel; Erläuterungen siehe Abb. 87 (Interpretation im Text)

stellung festgehalten. Das Ausmaß der Verschiebung des jeweils kranialen Wirbels wird durch die Fasern des Anulus fibrosus und Bänder begrenzt.

Der beschriebene Mechanismus hat nur in den lordotischen Anteilen eine praktische Bedeutung. In der Brustwirbelsäule dagegen wird die Dorsalflexion vor allem durch die Processus spinosi und durch die Verspannungen der Processus transversi und der Rippen eingeschränkt.

Besonders kräftige Bänder zur Fixierung der Processus articulares inferiores in der kaudalen Verschiebestellung findet man in der Lendenwirbelsäule. Sie sind transversal eingestellt, so daß sie die Parallelverschiebung federnd auffangen können. Wenn bei stärkerer Krafteinwirkung dieser Mechanismus nicht ausreicht, werden die Spitzen der Processus articulares inferiores in Rinnen gepreßt, die an die Gelenkflächen der Processus articulares superiores angrenzen und in den lordotisch gekrümmten Regionen der Wirbelsäule häufig zu finden sind (Abb. 89). Sie sind von der Membrana synovialis ausgekleidet und mit verformbarem Füllgewebe unterfütert, das aber nicht zur Druckaufnahme geeignet ist. Gleichzeitig werden alle Faserzüge, die in der Lage sind, eine Dorsalverschiebung zu begrenzen, gespannt. Dazu gehören die Anuli fibrosi aller Wirbelsäulenbereiche, das Ligamentum longitudinale anterius und in der Lendenwirbelsäule das Ligamentum interspinale. Auf Grund des S-förmigen, nach dorsal und kranial ansteigenden Verlaufes seiner Faserbündel spannt sich das Band bei der Dorsalverschiebung an. Eine ruckartige Begrenzung der Dorsalflexion durch den Anschlag der Spitzen der Processus articulares inferiores in die knöchernen Rinnen führt zu einer Biegebeanspruchung des jeweils kaudal gelegenen Wirbelbogens, besonders im Isthmusbereich.



Abb. 89: Lendenwirbel mit knöchernen Rinnen am Unterrand der Proc.art.sup.

In diesem Zusammenhang sind auch neuere Vorstellungen über die Entstehungsweise der "Spondylolyse" zu sehen. RUNGE und ZIPPEL (1976) machen für das Auftreten der Spondylolyse beim Erwachsenen Umbauvorgänge innerhalb des Wirbelbogens verantwortlich. Diese können nach übereinstimmender Auffassung verschiedener Autoren durch Mikrotraumata ausgelöst und aufrechterhalten werden.

### 6.2.2.3 Lateralflexion

Die Endstellung der Lateralflexion (Abb. 90) wird durch das Gleichgewicht zwischen den nach lateral gerichteten Kräften und der Zugspannung der kontralateralen Bänder und Muskeln bestimmt. Die Bewegung erfolgt um eine sagittale Achse, die Randgebiete des Discus intervertebralis und das dazugehörige Wirbelgelenk verbindet. Sie bestimmt die Länge der Hebelarme. Die Beanspruchung der Wirbelgelenke als Hebelpunkte bei der Lateralflexion hängt wiederum vom Neigungswinkel ihrer Gelenkflächen ab. Je kleiner dieser Winkel ist, desto mehr Druck kann von den Wirbelgelenken übernommen werden. Der Neigungswinkel begrenzt das Ausmaß einer zwangsläufigen Rotation, die zur Seite der Lateralflexion gerichtet ist.

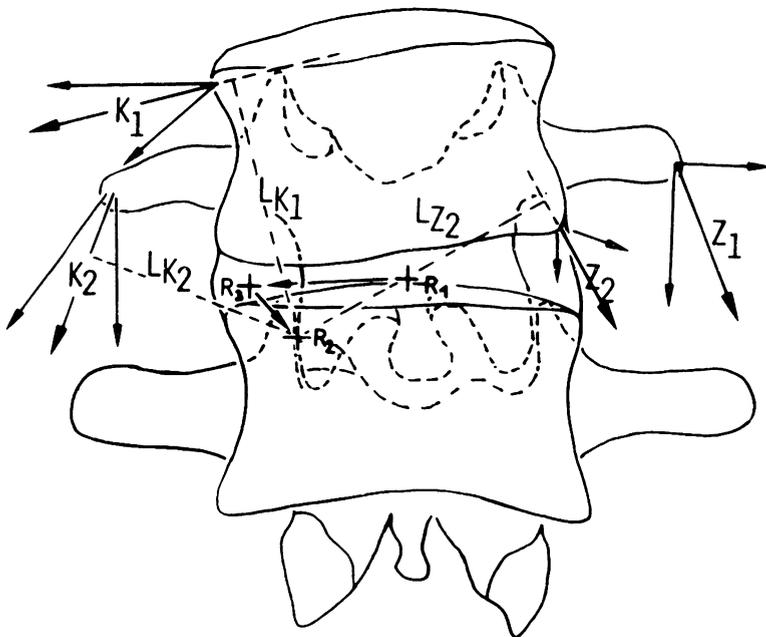


Abb. 90: Kräfte bei der Lateralflexion der Lendenwirbel (Interpretation im Text)

$R_1 - R_2$  Verlagerung des Bewegungszentrums

$K_1$  Summe der am Wirbelkörper angreifenden Kräfte

$K_2$  Summe der am Proc. costarius angreifenden Kräfte

$Z_1, Z_2$  Zugspannungen in Bändern und Anulus fibrosus

$LK_1, LK_2, LZ_1, LZ_2$  Hebelarme zu den entsprechenden Kräften und Zugspannungen

Die seitneigenden Kräfte greifen an Wirbelfortsätzen und Seitenflächen von Wirbelkörpern als Zugkräfte an, im lateralen Bereich der Bandscheiben treten auf der Beugeseite gleichsinnige Druckkräfte auf. Zugspannungen entstehen auf der kontralateralen Seite in den Bändern, die die Fortsätze verbinden, und in den Disci intervertebrales. Auch die Ligamenta longitudinalia und die Ligamenta flava werden gespannt.

In der Bewegungsregion C<sub>3</sub> bis Th<sub>1</sub> verläuft die Achse in Endstellung der Seitneigung durch die "unkovertebrale Spalten" der Disci (Abb. 76). Die aufgebogenen Processus uncinati bilden ein festes Widerlager. Die Schrägstellung der Halswirbelgelenke führt zu einer beträchtlichen zwangsläufigen Rotation. Die Endstellung wird vor allem durch die Spannung der Ligamenta intertransversaria begrenzt.

Die in den Brustwirbelgelenken von kranial nach kaudal zunehmend mögliche Lateralflexion wird – ohne große lokale Druckkräfte – von den Bändern, die zum Teil große Hebelarme besitzen, unter Einbeziehung der Wirbelrippenverbindungen federnd begrenzt. Auch in dieser Region kommt es dabei zu zwangsläufiger Rotation.

In der untersten Bewegungsregion begrenzen die Gelenke auf Grund ihrer Form und der festen Verstärkungszüge der Kapsel die Lateralflexion wiederum durch eine kombinierte Knochen-, Bandhemmung. Bei gleichzeitiger Dorsalflexion kann bei einem Öffnungswinkel um null Grad auch eine reine Knochenhemmung im Gelenkbereich gegeben sein, die durch knöcherne Randzacken weiter gefördert wird. Häufig ermöglichen aber an der Lendenwirbelsäule grubige Vertiefungen in den lateralen Anteilen der oberen Gelenkflächen eine Seitneigung dieser Bewegungsregion bis zur Anspannung der transversalen Bänder der Gelenkkapseln und der seitlichen Anteile der Anuli fibrosi. Die zwangsläufige Rotation wird wie in den übrigen Bewegungsregionen durch die Schrägstellung der vorderen Anteile der Gelenkflächen, vor allem aber durch den der Lateralflexion entgegen gerichteten, transversalen Druck auf deren hintere Anteile hervorgerufen. Das Ausmaß hängt deshalb vom Grad der Dorsalflexion ab.

### 6.3 Bewegungsprinzip der Wirbelgelenke

Die Funktion der Wirbelgelenke ist nur im Zusammenwirken aller Anteile des Bewegungssegmentes zu verstehen. Die zwangsläufig kombinierten Gelenke beeinflussen sich gegenseitig, ihre Bewegung wird durch Muskeln, Bänder und Bandscheiben geführt. Die Mechanik kann deshalb nicht einfach aus der Form der Gelenkkörper abgeleitet werden. Sie ergibt sich als Kompromiß aller an der jeweiligen Bewegung im einzelnen Bewegungssegment beteiligten Einrichtungen. Flächenhafte Parallelverschiebungen – für die meisten Gelenke des Körpers charakteristisch – sind in vielen Wirbelgelenken nur in begrenztem Umfang möglich. Je weiter sich die Gelenkkörper von der Normalhaltung entfernen, desto eher kommt es zu einer partiellen Erweiterung des Gelenkspaltes, der Gelenkkontakt bleibt auf einen schmalen Bereich beschränkt.

Die Wirbelgelenke einzelner Bewegungssegmente dürfen in ihrer Funktion nicht isoliert gesehen werden. Jede Verschiebung beeinflusst die Ausgangssituation der segmental angrenzenden Gelenke. Auf Grund der Beweglichkeit und morphologischer Merkmale kann eine Zusammenfassung von Teilbereichen der Wirbelsäule zu "Bewegungs-

regionen" erfolgen, deren Grenzgebiete eine etwas geringere Beweglichkeit besitzen.

Die integrierenden Bestandteile der Bewegungsregionen sind Muskeln und Bänder, die über mehrere Segmente hinwegziehen. Die "Dreipunkt-Lagerung" jedes einzelnen Wirbels erlaubt es den Muskeln, abgestufte Bewegungen der Wirbel untereinander herbeizuführen. Der einzelne Wirbel, der entweder durch passive Druckübertragung oder aktiven Zug von Muskelbündeln fein einstellbar ist, wirkt als Partner des jeweils angrenzenden Wirbels. Die zu einer Bewegungsregion zusammengefaßten Anteile beeinflussen sich damit gegenseitig bei jeder Lageänderung, deren Ausmaß maßgeblich von der Einstellung der Gelenkflächen der einzelnen Wirbel abhängt. Die Schrägstellung der Gelenkflächen führt in allen Bewegungsregionen zu zwangsläufigen Koppelungen von Bewegungen, deren Achsen senkrecht aufeinander stehen.

In den Endstellungen der einzelnen Bewegungen sind die Wirbelgelenke einer besonders großen Beanspruchung ausgesetzt. Auf Grund der Form ihrer Gelenkkörper vergrößert sich in der Endphase der Bewegungen zumeist der Abstand der Kontaktzone zum Krümmungsmittelpunkt. Dadurch kommt es zu Dislokationen der Gelenkkörper, in deren Folge antagonistische Bänder gespannt werden. Das Bewegungs- (Rotations-) zentrum verlagert sich dabei häufig in die verbliebene schmale Kontaktzone der Gelenkkörper, so daß hier besonders große Drucke auftreten. An diesen Kontaktstellen ("Hebelpunkten") summieren sich die im Bewegungssegment wirkenden Kräfte und Gegenkräfte. Durch die sprunghafte Lageänderung der Bewegungsachsen in den Endphasen einzelner Bewegungen und die damit verbundene Änderung der Momente werden die Gelenke "verriegelt" und besitzen kein Bewegungsspiel mehr.

Die meniskoiden Falten können je nach ihrer Konsistenz an der Druckübertragung mitwirken. In einzelnen Gelenken werden sehr fest gebaute Falten durch die Spannung der Ligamenta flava und der Muskelbündel, die den Gelenkkapseln anliegen, in die Randzone des Gelenkspaltes hineingepreßt und übernehmen damit einen unterschiedlichen Teil der Druckübertragung.

Aus der hohen lokalen Druckbeanspruchung läßt sich das Zustandekommen oft geringgradiger, aber funktionell bedeutsamer Verschiebungen einzelner Wirbel erklären. Dadurch wird auch ihre große Störungsanfälligkeit verständlich.

## 7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit soll die Bedeutung der Wirbelgelenke, *Juncturae zygapophysiales*, für die Funktion des Bewegungssegmentes im einzelnen und in seiner Stellung innerhalb der gesamten Wirbelsäule aufgezeigt werden. Dazu wurden neben den Angaben in der Literatur und einer entwicklungsgeschichtlichen Übersicht eine Vielzahl von anatomischen Einzelbefunden dargestellt. Messungen an Versuchspersonen ergänzen die an Präpariersaalmaterial erhobenen Befunde.

Vor allem wurden Lage und Ausrichtung der Wirbelgelenkflächen auf den Wirbelbogen untersucht. Der Neigungswinkel - der sagittale Winkel zwischen der Wirbelkörperdeckplatte und den Gelenkflächen - beträgt am dritten Halswirbel ca. 65 Grad, verringert sich bis zum fünften Halswirbel auf ca. 53 Grad, von da an steigt sein Wert nach kaudal bis auf 85 Grad am Kreuzbein an.

Der Öffnungswinkel - der transversale Winkel zwischen den Gelenkflächen - ist am dritten Halswirbel signifikant kleiner als in der übrigen Hals- und in der Brustwirbelsäule. Die Gelenkflächen der Lendenwirbel bestehen zumeist aus zwei vertikalen Facetten. Der vordere Anteil ist annähernd in der Frontalebene ausgerichtet, während die dorsale Facette - zumindest an den oberen Lendenwirbeln - mehr in der Sagittalebene steht. Ihr Öffnungswinkel beträgt ca. 10 Grad und vergrößert sich nach kaudal bis 50 Grad. Am Kreuzbein wurde ein Wert von ca. 90 Grad gemessen.

Aus dem queren Abstand der Gelenkflächen und ihrer sagittalen Distanz vom Wirbelkörper wurden die dreiseitig begrenzten "Unterstützungsflächen" der einzelnen Wirbel ermittelt. Sie sind in der Halswirbelsäule mehr transversal ausgedehnt, während in Brust- und Lendenwirbelsäule ihre sagittale Ausdehnung größer ist und nach kaudal zunimmt.

Neben den Spaltlinien der Gelenkknorpel wurden Recessus und Ansatzlinien der *Membrana synovialis* und ihre meniskoiden Falten untersucht. Diese sind in der Halswirbelsäule sehr groß und derb ausgebildet. In der Brustwirbelsäule treten wesentlich dünnere und häufig ausgefrante Formen auf, in der Lendenwirbelsäule sind sie sehr vielgestaltig.

Schließlich wurden die verschiedenartigen Verstärkungszüge der *Membrana fibrosa* in den einzelnen Regionen und ihre Beziehung zur benachbarten Muskulatur beschrieben.

Die vorstehend zusammengefaßten Befunde dieser Untersuchung führen zu dem Schluß, daß die Wirbelgelenke die Statik der Wirbelsäule wesentlich beeinflussen, ihre Dynamik entscheidend bestimmen.

Die regionalen Unterschiede im anatomischen Aufbau der Wirbelgelenke stehen in Zusammenhang mit der differenzierten funktionellen Beanspruchung, der sie in den einzelnen Bewegungssegmenten ausgesetzt sind. Die morphologischen Befunde und die Analyse des funktionellen Zusammenspieles legen die Gliederung der Wirbelsäule in "Bewegungsregionen" nahe, durch die ein besseres Verständnis

der Funktion des Organes Wirbelsäule herbeigeführt wird. Als "Bewegungsregionen" werden folgende Wirbelsäulenbereiche unterschieden:

- Kopfgelenke bis C<sub>3</sub> (Obere Halswirbelsäule),
- C<sub>3</sub> bis Th<sub>1</sub> (Th<sub>2</sub>),
- Th<sub>1</sub> (Th<sub>2</sub>) bis (Th<sub>11</sub>) Th<sub>12</sub>,
- (Th<sub>11</sub>) Th<sub>12</sub> bis Os sacrum.

Wirbelgelenke und Bandscheiben bilden die Unterstütsungsfläche des kranial vom einzelnen Bewegungssegment liegenden Wirbelsäulenbereiches und übernehmen je nach Ausrichtung der Gelenkflächen und Einleitung der Druckkräfte Anteile davon.

Eine besondere Beanspruchung erfahren die Wirbelgelenke in den Endstellungen der einzelnen Bewegungen, in denen eine Druckaufnahme unter Umständen nur in einzelnen Bereichen der Gelenke stattfindet. Dabei bleibt eine schmale Kontaktzone der Gelenkkörper bestehen, die Gelenkspalte können vor allem in Hals- und Lendenwirbelsäule beträchtlich klaffen. In diesen Berührungszonen verlaufen die Achsen und liegen die "Hebelpunkte" der im einzelnen Bewegungssegment wirkenden Kräfte und Gegenkräfte. Durch den teilweisen Kontaktverlust der Gelenkkörper lassen sich Bewegungsmöglichkeiten in einzelnen Wirbelsäulenregionen erklären, deren Auftreten scheinbar im Widerspruch zur Form der Gelenkkörper steht. Die Gelenke der Lendenwirbel sind in besonderem Maße für die Beanspruchung in den Endstellungen aller Wirbelbewegungen ausgestattet.

Aus dem Vergleich der Wirbelgelenke in den verschiedenen Regionen wird die gegenseitige Beeinflussung ihres anatomischen Aufbaues und der Funktion von Bewegungssegmenten und Bewegungsregionen deutlich.

## 8 Literaturverzeichnis

- AEBY,Ch.: Der Bau des menschlichen Körpers. Vogel Leipzig 1871
- ARKIN,A.M.: The mechanism of rotation in combination with the lateral deviation in the normal spine. *J.Bone Jt.Surg.* 32-A, 180-188 (1950)
- BADGLEY,C.E.: The articular facets in relation to low back pain and sciatic radiation. *J.Bone Jt.Surg.* 23-A, 481-496 (1941)
- BAILEY,D.K.: The normal cervical spine in infants and children. *Radiology* 59, 712-719 (1952)
- BAILEY,W.: Persistent vertebral process epiphyses. *Amer.J.Roentgenol.* 42, 85-90 (1939)
- BAKKE,S.N.: Röntgenologische Beobachtungen über die Bewegungen der Wirbelsäule. *Acta radiol. (Stockholm) Suppl.* XIII. 1-73 (1931)
- BATSON,O.V.: The vertebral vein system. *Amer.J.Roentgenol.* 78, 195-212 (1957)
- BAUR,R.: Zum Problem der Neugliederung der Wirbelsäule. *Acta anat.* 72, 321-356 (1969)
- BENINI,A.: Das kleine Gelenk der Lendenwirbelsäule. Huber, Bern 1978
- BÖHM,P.: Über die Länge und Ausrichtung von Dornfortsätzen bei quadrupeden Säugern. *Diss.Frankfurt*, 1970
- BRAILSFORD,J.F.: Deformities of the lumbosacral region of the spine. *Brit.J.Surg.* 16, 562-627 (1929)
- BRAUS,H., C.ELZE: Anatomie des Menschen. 1.Aufl. Springer, Berlin-München 1921; 3.Aufl. 1954
- BROCHER,J.E.W.: Die Wirbelsäulenleiden und ihre Differentialdiagnose. 5.Aufl. Thieme, Stuttgart 1970
- BRÜGGER,A.: Die Erkrankungen des Bewegungsapparates und seines Nervensystems. Fischer, Stuttgart-New York 1977
- CLARA,M.: Das Nervensystem des Menschen. 3.Aufl. J.A.Barth, Leipzig 1959
- CLEMENS,H.J., K.NOESKE, D.ROLL: Die arterielle Versorgung der menschlichen Wirbelsäule und des Rückenmarkes. In: Zur funktionellen Pathologie und Therapie der Wirbelsäule. Hrsg.: K.H.HEINE, Verlag für prakt.Medizin, Berlin 1957
- CLEMENS,H.J.: Die Vaskularisation der Wirbelsäule und des Rückenmarks. In: Wirbelsäule und Nervensystem. Hrsg. von E. TROSTDORF, H.St.STENDER; Thieme, Stuttgart 1970
- CLEMENS,H.J.: Die Venensysteme der menschlichen Wirbelsäule. de Gruyter, Berlin 1961
- CLEMENS,H.J.: Die anatomischen Grundlagen der Schmerzempfindung an den einzelnen Wirbelsäulenstrukturen. *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis* 52, 39-46 (1971)
- COSSETTE,J.W., H.F.FARFAN: The instantaneous center of rotation of the third lumbar intervertebral joint. *J.Biomech.* 4, 149-153 (1971)
- CROCK,H.V., H.YOSHIZAWA: The blood supply of the vertebral column and spinal cord in man. Springer, New York-Wien 1977
- DECKING,D., W. ter STEEGE: Röntgenologische Parameter der Halswirbelsäule im seitlichen Strahlengang. *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis* 64, Hippokrates, Stuttgart 1975
- DELMAS,A., M.NDJAGA-MBA, T.VANNARETH: Le cartilage articulaire de L<sub>4</sub> - L<sub>5</sub> et L<sub>5</sub> - S<sub>1</sub>. *C.R.Ass.Anat.* 55<sup>e</sup> Congr. Nancy 230-234 (1970)
- DITTMAR,O.: Die sagittal- und lateralflexorische Bewegung der

- menschlichen Lendenwirbelsäule im Röntgenbild. Zur Mechanologie der Wirbelsäule. I.Mitteilung, *Z.Anat.EntwGesch.* **92**, 644-667 (1930)
- DITTMAR,O.: Beobachtungen an den Gelenkfortsätzen der Lendenwirbel bei sagittal- und lateralflexorischer Bewegung. Zur Mechanologie der Wirbelsäule. II.Mitteilung, *Z.Anat.EntwGesch.* **93**, 477-483 (1930)
- DÖRR,W.: Über die Anatomie der Wirbelgelenke. *Arch.orthop.Unfall-Chir.* **50**, 222-234 (1958)
- DÖRR,M.W.: Nochmals zu den Menisci in den Wirbelbogengelenken. *Z.Orthop.* **96**, 457-461 (1962)
- ECKLIN,U.: Die Altersveränderungen der Halswirbelsäule. Springer, Berlin 1960
- EDER,M., H.TILSCHER: Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis. **81**, Hippokrates, Stuttgart 1978
- EMMINGER,E.: Die Gelenkdisci an der Wirbelsäule (eine mögliche Erklärung wirbelsäulenabhängiger Schmerzzustände). *Hefte Unfallheilk.* **48**, 142-148 (1954)
- EMMINGER,E.: Die Anatomie und Pathologie des blockierten Wirbelgelenkes. *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis* **38**, 253-258 (1967)
- EPSTEIN,B.S.: *The spine.* 5.Aufl. Lea & Febiger, Philadelphia 1976
- ERDMANN,H.: Möglichkeiten und Grenzen in der Röntgen-Diagnostik der Wirbelsäule. *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis* **28**, 9-22 (1964)
- ERDMANN,H.: Schleuderverletzung der Halswirbelsäule. *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis* **56**, 1973
- ERDMANN,H.: Grundzüge einer funktionellen Wirbelsäulenbetrachtung. 1. Teil, *Man.Med.* **6**, 32-37 (1967)
- ERDMANN,H.: Röntgenologische Gesichtspunkte zum Begriff der Wirbelfehleinsteilung. *Hippokrates* **38**, 427-432 (1967)
- ERDMANN,H.: Grundzüge einer funktionellen Wirbelsäulenbetrachtung. 2. Teil, *Man.Med.* **5**, 55-63 (1968)
- ERDMANN,H.: Grundzüge einer funktionellen Wirbelsäulenbetrachtung. 3. Teil, *Man.Med.* **6**, 78-90 (1968)
- EXNER,G.: *Die Halswirbelsäule.* Thieme, Stuttgart 1954
- EXNER,G.: Variationen und Fehlbildungen der Wirbelsäule. In: *Handbuch der Orthopädie, Bd.II.* Thieme, Stuttgart 1958
- FARMER,H.L.: Accessory articular processes in lumbar spine. *Amer. J.Roentgenol.* **36**, 763-767 (1936)
- FASANA,F.: Microscopic organization of the ligamenta flava in Cercopitheciae. *Acta anat.* **94**, 127-142 (1976)
- FELL,H.B., R.G.CANTI: Experiments on the Development in vitro of the Avian Knee-Joint. *Proc.Roy.Soc.B.* **116**, 316-351 (1935)
- FERGUSON,W.R.: Some observations on the circulation in foetal and infant spines. *J.Bone Jt.Surg.* **32-A**, 640-648 (1950)
- FICK,R.: Über die Form der Gelenkflächen. *Arch.Anat.Physiol.* 391-402 (1890)
- FICK,R.: Spezielle Gelenk- und Muskelmechanik. In: *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke.* III. Teil, Fischer, Jena 1911
- FISCHER,L.P., J.P.CARRET, G.P.GONON, Y.SAYFI: La vascularisation de l'axis. *Lyon méd.* 335-346 (1977)
- FRICK,H., H.LEONHARDT, D.STARCK: *Allgemeine Anatomie, Spezielle Anatomie I.* Thieme, Stuttgart 1977
- FUIKS,D.M., Ch.E.GRAYSON: Vacuum pneumarthography and the spontaneous occurrence of gas in the joint spaces. *J.Bone Jt.*

- Surg. 32-A, 933-938 (1950)
- GRAY's ANATOMY; ed. by WARWICK, R., P.L. WILLIAMS, 35<sup>th</sup> ed. Longman, London 1973
- GREGERSEN, G., D.B. LUCAS: An in vivo study of the axial rotation of the human thoracolumbar spine. *J. Bone Jt. Surg.* 49-A, 247-262 (1967)
- GRIEVE, G.P.: Manipulation. *Physiotherapy* 61, 11-18 (1975)
- GROHER, W.: Auswirkungen des Hochleistungssports auf die Lendenwirbelsäule. In: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Deutschen Sportbundes. Bd. 12, Hrsg.: H.E. BOCK, E. BURCK, O. GRUPE, H. LENK, F. LOTZ, Hofmann, Schorndorf 1975
- GÜNTZ, E.: Kritische Bemerkungen zum Problem der statischen und funktionellen Störungen der Wirbelsäule mit therapeutischen Rückschlüssen aus der Blickrichtung des Orthopäden sowie Demonstrationen zur Arthrosis deformans der kleinen Wirbelgelenke. *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis* 1, 126-132 (1956)
- GUTMANN, G.: Einführung in die statisch-funktionelle Röntgendiagnostik der Wirbelsäule unter besonderer Berücksichtigung der Kopfgelenke und Halswirbelsäule. *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis* 1, 70-72 (1956)
- HADLEY, L.A.: *The spine*. Thomas, Springfield 1956
- HADLEY, L.A.: Secondary Ossification Centers and the intraarticular Ossicle. *Amer. J. Roentgenol.* 76, 1095-1101 (1956)
- HADLEY, L.A.: Anatomico-Roentgenographic Studies of the posterior spinal articulations. *Amer. J. Roentgenol.* 86, 270-276 (1961)
- HADLEY, L.A.: Intervertebral Joint Subluxation, bony Impingement and Foramen encroachment with nerve root changes. *Amer. J. Roentgenol.* 65, 377-402 (1951)
- HAINES, R.W.: The development of joints. *J. Anat. (London)* 81, 33-55 (1947)
- HEINE, K.H.: Über Bewegungs- und Haltungseinstellungen der Wirbelsäule. In: *Zur funktionellen Pathologie und Therapie der Wirbelsäule*. Hrsg.: K.H. HEINE, Verlag für praktische Medizin, Berlin 1957
- HENKE, J.W.: *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke*. Leipzig-Heidelberg 1863
- HENLE, J.: *Handbuch der systematischen Anatomie des Menschen*. 1871-1876, zit. bei R. FICK: Spezielle Gelenk- und Muskelmechanik. In: *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke*. III. Teil, Fischer, Jena 1911
- HERZOG, W.: Zur Morphologie und Pathologie des Ligamentum flavum. *Frankf. Z. Path.* 61, 250-267 (1949-50)
- HESSER, C.: Beitrag zur Kenntnis der Gelenkentwicklung beim Menschen. *Morph. Jb.* 55, 489-567 (1926)
- HEYLINGS, D.J.A.: Supraspinous and interspinous ligaments of the human lumbar spine. *J. Anat. (London)* 125, 127-131 (1978)
- HIPPS, H.E.: Fissure formation in articular facets of lumbar spine. *J. Bone Jt. Surg.* 21, 289-303 (1939)
- HORVATH, F., MASSANYI, L.: Über diagnostische Schwierigkeiten verursachende Formveränderung der Wirbelgelenkfortsätze. *Fortschr. Röntgenstr.* 97, 757-763 (1962)
- HORWITZ, Th., R.M. SMITH: An anatomical, pathological and roentgenological study of the intervertebral joints of the lumbar spine and of the sacroiliac joints. *Amer. J. Roentgenol.* 43, 173-185 (1940)
- HROMADA, J.: Anatomische Bemerkungen zur Frage der Denervation

- der Gelenke. Z.Orthop. 94, 419-428 (1961)
- HULTKRANTZ,W.: Über die Spaltrichtung der Gelenkknorpel. Verh. anat.Ges. 12, 248-256 (1898)
- INGELMARK,B.E., T.LEWIN: Assymetrien und Formabweichungen des Achsenskeletts, besonders im Hinblick auf die Skoliose. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis 40, 83-95 (1968)
- JELLINGER,K.: Zur Orthologie und Pathologie der Rückenmarksdurchblutung. Springer, Wien 1966
- JENSEN,H.P.: Funktionelle Zusammenhänge verschiedener Organsysteme des Rückens und ihre ätiologische Bedeutung im Krankheitsgeschehen. Habilschrift, Würzburg 1959
- JIROUT,J.: Studien der Dynamik der Halswirbelsäule in der frontalen und horizontalen Ebene. Fortschr.Röntgenstr. 106, 236-240 (1967)
- JUNGHANNS,H.: Nomenclatura Columnae vertebralis. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd.75, Hippokrates, Stuttgart 1977
- JUNGHANNS,H.: Die anatomischen Besonderheiten des fünften Lendenwirbels und der letzten Lendenbandscheibe. Arch.orthop.Unfall-Chir. 33, 260-278 (1933)
- JUNGHANNS,H.: Das Bewegungssegment der Wirbelsäule und seine praktische Bedeutung. Arch.PUTTI chir.org.mov. 5, 103-111 (1954)
- KEIBEL,F., F.P.MALL: Handbuch der Entwicklungsgeschichte des Menschen. Hirzel, Leipzig 1910
- KELLER,G.: Die Bedeutung der Veränderungen an den kleinen Wirbelgelenken als Ursache des lokalen Rückenschmerzes. I.Auswertung der klinisch-röntgenologischen Befunde. Z.Orthop. 83, 219-228 (1953)
- KELLER,G.: Die Bedeutung der Veränderungen an den kleinen Wirbelgelenken als Ursache des lokalen Rückenschmerzes. II.Auswertung der histologischen Befunde. Z.Orthop. 83, 517-547 (1953)
- KELLER,G.: Kritische Betrachtungen zum Rückenschmerzproblem. Münch.med.Wschr. 100, 1833-1838 (1958)
- KELLER,G.: Hyperplasie der Gelenkfortsätze an der Wirbelsäule. Z.Orthop. 90, 470-474 (1958)
- KÖHLER,A., E.A.ZIMMER: Grenzen des Normalen und Anfänge des Pathologischen im Röntgenbild des Skelets. 11.Aufl. Thieme, Stuttgart 1967
- KONERMANN,H.: Funktionelle Analyse der Knorpelstruktur des Talonaviculargelenkes. Z.Anat.EntwGesch. 133, 1-36 (1971)
- KOS,J.: Contribution à l'étude de l'anatomie et de la vascularisation des articulations intervertébrales. C.R.Ass.Anat. 53° Congr.Tours 1088-1105 (1969)
- KOS,J., J.WOLF: Die "Menisci" der Zwischenwirbelgelenke und ihre mögliche Rolle bei Wirbelblockierung. Man.Med. 10, 105-114 (1972)
- KRÄMER,J.: Biomechanische Veränderungen im lumbalen Bewegungssegment. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis 58, Hippokrates, Stuttgart 1973
- KUMMER,B.: Biomechanik des Säugetierskelets. Hdb.d.Zoologie 8, 1-80 de Gruyter, Berlin 1959
- KUMMER,B.: Bauprinzipien des Säugetierskeletts. Thieme, Stuttgart 1959
- KUMMER,B.: Beziehungen zwischen der mechanischen Funktion und dem Bau der Wirbelsäule bei quadrupeden Säugetieren. Z.Tierzucht und Züchtungsbiol. 74, 159-167 (1960)
- KUMMER,B.: Mechanische Beanspruchung und funktionelle Anpassung

- des Knochens. *Verh. Anat. Ges.* 72, 21-46 (1978)
- KUNERT, W.: *Wirbelsäule, vegetatives Nervensystem und Innere Medizin*. 2. Aufl. Enke, Stuttgart 1975
- KURLANDER, G.J., J.J. DIHL: Anomalous ossification centers for the inferior articular processes of the lumbar vertebrae. *Amer. J. Roentgenol.* 100, 88-93 (1967)
- LANG, J.: Wie verändert sich die Gelenkinnenhaut im Laufe des Lebens? Die Biomorphose der Gelenkinnenhaut. *Verh. dtsh. orthop. Ges.* 46, 126-131 (1958)
- LANGE, M.: *Die Wirbelgelenke*. 2. Aufl. Enke, Stuttgart 1936
- LARCHER, F.: *Beitrag zur Entwicklung der Lendenwirbelsäule beim Menschen*. Diss. Zürich 1947
- LAZORTHES, G.: Le rachis cervical. Données anatomiques et physiologiques récentes. *Ann. Med. physique* 9, 193-206 (1966)
- LEE, B.C.P., E. KAZAM, A.D. NEWMAN: Computed Tomography of the Spine and Spinal Cord. *Radiology* 128, 95-102 (1978)
- LEWIN, T., B. MOFFET, A. VIIDIK: The morphology of the lumbar synovial intervertebral joints. *Acta Morphol. Neerl.-Scand.* 4, 299-319 (1962)
- LEWIN, T.: Anatomical variations in lumbosacral synovial joints with particular reference to subluxation. *Acta Anat.* 71, 229-248 (1968)
- LEWIN, T.: Foramen intervertebrale und Wirbelbogengelenke im Lendenabschnitt der Wirbelsäule. *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis* 40, 74-82 (1968)
- LEWIT, K., L. KRAUSOVA: Messungen von Vor- und Rückbeuge in den Kopfgelenken. *Fortschr. Röntgenstr.* 99, 538-543 (1963)
- LEWIT, K., L. KRAUSOVA, D. KNEIDLOVA: Mechanismus und Bewegungsmaß in den Kopfgelenken bei passiven Bewegungen. *Z. Orthop.* 103, 323-333 (1967)
- LEY, F.: Contribution à l'étude des cavités articulaires interapophysaires vertébrales thoraciques. *Arch. Anat. Histol. Embryol.* 57, 61-114 (1974)
- LIECHTI, A.: *Die Röntgendiagnostik der Wirbelsäule*. 2. Aufl. Springer, Wien (1948)
- LOEWENECK, H.: *Über die sensible Innervation der Articulationes intervertebrales*. Diss. München 1966
- LOUIS, R.: The anatomic Basis of Surgery on the Thoracolumbar Vertebral Junction. *Anatomia clinica* 1, 73-80 (1978)
- LUMSDEN, R.M., J.M. MORRIS: An in vivo study of axial rotation and immobilization at the lumbosacral joint. *J. Bone Jt. Surg.* 50, 1591-1602 (1968)
- LUSCHKA, H.: *Die Anatomie des Menschen*. Bd. I, 2. Abt. Laupp, Tübingen 1862
- LUTZ, G.: Die Entwicklung der kleinen Wirbelgelenke. *Z. Orthop.* 104, 19-28 (1967)
- MARKOLF, K.L.: Deformation of the Thoracolumbar Intervertebral Joints in Response to External Loads. *J. Bone Jt. Surg.* 54-A, 511-533 (1972)
- MARKUSKE, H.: *Untersuchungen zur Statik und Dynamik der kindlichen Halswirbelsäule: Der Aussagewert seitlicher Röntgenaufnahmen*. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 50, Hippokrates, Stuttgart 1971
- MATTIASH, H.H.: Arbeitshaltung und Bandscheibenbelastung. *Arch. orthop. Unfall-Chir.* 48, 147-153 (1956)
- MED, M.: Articulations of the thoracic Vertebrae and Their Variability. *Folia morphol.* 20, 212-215 (1972)

- MED, M.: Articulations of the Cervical Vertebrae and Their Variability. *Folia morphol.* **21**, 324-327 (1973)
- MED, M.: Prenatal Development of Thoracic Intervertebral Articulation. *Folia morphol.* **25**, 175-177 (1977)
- MESTDAGH, H.: Morphological aspects and biomechanical properties of the vertebroaxial joint (C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>). *Acta Morphol. Neerl.-Scand.* **14**, 19-30 (1976)
- MESTDAGH, H.: Anatomie fonctionelle du rachis cervical inférieur (de C<sub>3</sub> à C<sub>7</sub>). Thèse, Lille 1969
- MINNE, J., R. DEPREUX, H. MESTDAGH: Les mouvements de rotation du rachis cervical inférieur (de C<sub>3</sub> à C<sub>7</sub>). *Bull. Ass. Anat.* **55**<sup>o</sup> Cong. Nancy 929-935 (1970)
- MORRIS, J. M.: Biomechanics of the Spine. *Arch. Surg.* **107**, 418-423 (1973)
- MÜLLER, W.: Spaltbildungen an Gelenk- und Dornfortsätzen der Wirbelsäule auf der Basis von Umbauzonen. *Fortschr. Röntgenstr.* **44**, 644-648 (1931)
- NEUGEBAUER, H.: Skoliose, Stoffwechsel und Wirbelsäulenwachstum. *Arch. orthop. Unfall-Chir.* **85**, 87-99 (1976)
- ODGERS, P. N.: The lumbar and lumbo-sacral diarthrodial joints. *J. Anat. (London)* **67**, 301-317 (1933)
- OPPENHEIMER, A.: The apophyseal intervertebral joints. *Surgery* **8**, 699-712 (1940) zit. in: *Zbl. Radiol.* **33**, 133 (1941)
- OPPENHEIMER, A.: Supernumerary ossicle at isthmus of neural arch. *Radiology* **39**, 98-100 (1942)
- PAUWELS, F.: Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates. Springer, Berlin-Heidelberg-New York 1965
- PEDERSEN, H. E., C. F. BLUNCK, E. GARDNER: The anatomy of the lumbo-sacral posterior rami and meningeal branches of spinal nerves (sinu-vertebral nerves). *J. Bone jt. Surg.* **38-A**, 377-391 (1956)
- PENNING, L., TÖNDURY, G.: Entstehung, Bau und Funktion der meniskoiden Strukturen in den Halswirbelgelenken. *Z. Orthop.* **98**, 1-14 (1964)
- PENNING, L.: Nonpathologic and pathologic relationships between the lower cervical vertebrae. *Amer. J. Roentgenol.* **91**, 1036-1050 (1964)
- PENNING, L.: Functional pathology of the cervical spine. *Excerpta Medica foundation*, Amsterdam 1968
- PENNING, L.: Normal Movements of Cervical Spine. *Amer. J. Roentgenol.* **130**, 317-326 (1978)
- PERNKOPF, E.: Topographische Anatomie des Menschen, Bd. I, Urban & Schwarzenberg, Berlin-München-Wien 1937-1960
- PFEIL, E.: Stellungsvarianten der Gelenkfortsätze am Lendenkreuzbein-Übergang. *Zbl. Chir.* **93**, 10-17 (1968)
- PICHLER, A.: Anatomische und röntgenologische Studien über die Intervertebralkanäle der Halswirbelsäule. *Fortschr. Röntgenstr.* **83**, 638-649 (1955)
- PLATZER, W.: Bewegungsapparat. In: W. KAHLE, H. LEONHARDT, W. PLATZER: Taschenatlas der Anatomie. Bd. I, 2. Aufl. Thieme, Stuttgart 1978
- PRADER, A.: Die frühembryonale Entwicklung der menschlichen Zwischenwirbelscheibe. *Acta anat.* **3**, 68-83 (1947)
- PUTZ, R., A. POMAROLI: Form und Funktion der Articulatio atlanto-axialis lateralis. *Acta anat.* **83**, 333-345 (1972)
- PUTZ, R.: Charakteristische Fortsätze - Processus uncinati - als besondere Merkmale des 1. Brustwirbels. *Anat. Anz.* **139**, 442-

- 454 (1976)
- PUTZ,R.: Beitrag zur Morphologie und Funktion der kleinen Gelenke der Lendenwirbelsäule. *Verh.Anat.Ges.* 71, 1355-1359 (1977)
- PUTZ,R.: Zur Morphologie und Rotationsmechanik der kleinen Gelenke der Lendenwirbel. *Z.Orthop.* 114, 902-912 (1977)
- RAVELLI,A.: Fehlbildungen an Bogen und Gelenkfortsätzen der Lendenwirbel. *Fortschr.Röntgenstr.* 82, 826-827 (1955)
- RAVELLI,A.: Das Vakuum-Phänomen (R.FICK'sches Zeichnen). *Fortschr.Röntgenstr.* 83, 236-240 (1955)
- REGENSBURGER,K.: Spaltbildungen und freie Knochenschatten an den Gelenkfortsätzen der Lendenwirbelsäule. *Brun's Beiträge klin. Chir.* 167, 622-640 (1938)
- REICHMANN,S.: Motion of the lumbar articular processes in flexion-extension and lateral flexions of the spine. *Acta Morphol. Neerl.-Scand.* 8, 261-272 (1970/71)
- REICHMANN,S.: The postnatal Development of Form and Orientation of the Lumbar Intervertebral Joint Surfaces. *Z.Anat.EntwGesch.* 133, 102-123 (1971)
- REICHMANN,S.: Longitudinal Growth of the Lumbar Articular Processes with Reference to the Development of Clefts. *Z.Anat. EntwGesch.* 133, 124-134 (1971)
- REICHMANN,S., T.LEWIN: Growth Processes in the Lumbar Neural Arch. *Z.Anat.EntwGesch.* 133, 89-101 (1971)
- REICHMANN,S.: Tomography of the lumbar intervertebral joints. *Acta radiol.(Stockholm)* 12, 641-659 (1972)
- REICHMANN,S., E.BERGLUND, K.LINDGREN: Das Bewegungszentrum in der Lendenwirbelsäule bei Flexion und Extension. *Z.Anat. EntwGesch.* 138, 283-287 (1972)
- REINHARDT,K.: Die Anatomie und Pathologie der kleinen Wirbelgelenke im Röntgenbild. *Acta radiol.(Stockholm)* 4, 665-700 (1963)
- REINHARDT,K.: Aplasie des linken kaudalen Gelenkfortsatzes des 5. Lendenwirbels. *Fortschr.Röntgenstr.* 108, 690-691 (1968)
- REINOLD,E.: Der intrauterine Patient: Diagnose aus dem fetalen Bewegungsverhalten in der ersten Hälfte der Gravidität. *Zbl. Gynäk.* 96, 641-644 (1974)
- REITER,A.: Die Frühentwicklung der menschlichen Wirbelsäule. 1. Mitt. Die Frühentwicklung der Brustwirbelsäule. *Z.Anat.Entw Gesch.* 112, 185-220 (1943)
- REMPE,W.: Zur Spaltbildung in den Gelenkfortsätzen der unteren Lendenwirbelsäule. *Z.Orthop.* 87, 604-609 (1956)
- RENNER,K.: Statik und Anatomie an den kleinen Gelenken und der Kyphose der Brustwirbelsäule. *Diss.Hamburg* (1956)
- RETTIG,H.: Patho-Physiologie angeborener Fehlbildungen der Lendenwirbelsäule und des Lendenwirbelsäulen-Kreuzbein-Überganges. *Z.Orthop.Beil.* 91, 1-35 (1959)
- ROWE,G.G., M.B.ROCHE: The Etiology of separate Neural Arch. *J. Bone Jt.Surg.* 35-A, 102-110 (1953)
- RUCKENSTEINER,E.: Aplasie von Zwischengelenken der LWS. *Fortschr. Röntgenstr.* 59, 334-339 (1939)
- RUNGE,H., H.ZIPPEL: Untersuchungen zur Entwicklung des Wirbelbogens im Lumbosacralbereich. *Beitr.Orthop.Traum.* 23, 19-29 (1976)
- SANTO,E.: Zur Entwicklungsgeschichte und Histologie der Zwischen-scheiben in den kleinen Gelenken. *Z.Anat.Entw Gesch.* 104, 623-634 (1935)
- SENSENIIG,E.: The early development of the human vertebral column. *Contr.Embryol.* 33, 23-41 (1949)

- SICARD, A., Y. GERARD: Les fractures isolées des apophyses articulaires lombaires. *J.Chir.(Paris)* 71, 469-491 (1955)
- SIEGLBAUER, F.: Normale Anatomie des Menschen. 8.Aufl. Urban & Schwarzenberg, München-Berlin 1958
- SLIJPER, E.P.: Comparative biologic anatomical investigations on the vertebral column and spinal musculature of mammals. *Verh. kon.ned.Akad.Wet.* 42, 1-128 (1946)
- SCHENK, R.: Funktionelle Anatomie der Wirbelsäule. Rheumatismus in Forschung und Praxis 2, 9-24 (1964)
- SCHIEDT, E.: Beitrag zur Ossifikation der Wirbelsäule. *Dtsch.Z.Chir.* 280, 241-260 (1955)
- SCHIFF, D.C.M., W.W. PARKE: The arterial supply of the odontoid process. *J.Bone Jt.Surg.* 55-A, 1450-1456 (1973)
- SCHINZ, H.R., W.E. BAENSCH, E. FRIEDL, E. UEHLINGER: Lehrbuch der Röntgendiagnostik. 5.Aufl. Thieme, Stuttgart 1952
- SCHLÜTER, K.: Form und Struktur des normalen und des pathologisch veränderten Wirbels. *Wirbelsäule in Forschung und Praxis*, Bd.30, Hippokrates, Stuttgart 1965
- SCHMINKE, A., E. SANTO: Zur normalen und pathologischen Anatomie der Halswirbelsäule. *Zbl.Path.* 55, 369-372 (1932)
- SCHMORL, G., H. JUNGHANN: Die gesunde und kranke Wirbelsäule in Röntgenbild und Klinik. 5.Aufl. Thieme, Stuttgart 1968
- STARCK, D.: Embryologie, 2.Aufl. Thieme, Stuttgart 1975
- STEIN, H.: Über Rotation von Wirbeln, eine röntgen-anatomisch-klinische Studie. *Medizinische* 5, 154-161 (1953)
- STILLWELL, D.L.: The nerve supply of the vertebral column and its associated structures in the monkey. *Anat.Rec.* 125, 139-162 (1956)
- STOFFT, E.: Die menschliche Halswirbelsäule (Eine Analyse der Bandstrukturen und der Intervertebralgelenkflächen). *Man.Med.* 8, 133-139 (1970)
- STOFFT, E.: Flächengrößen der Intervertebralgelenke bei Mensch Tier. *Verh.Anat.Ges.* 65, 489-497 (1972)
- STOFFT, E.: Beitrag zum Schmerzgeschehen im Halswirbelsäulenbereich aus anatomisch-physiologischer Sicht. *Phys.Med.u.Rehabil.* 18, 178-184 (1977)
- STOFFT, E.: Zur Morphometrie der Gelenkflächen des oberen Kopfgelenkes (Beitrag zur Statik der zervikookzipitalen Übergangsregion). *Verh.Anat.Ges.* 70, 575-584 (1978)
- STOFFT, E., K. WIEBECKE, G. MÜLLER: Die Ligamenta flava der menschlichen Wirbelsäule. *Anat.Anz.* 125, 363-371 (1968)
- STOFFT, E., G. MÜLLER: Eine vergleichende Analyse der Intervertebralgelenkflächen. *Anat.Anz.* 66, 355-363 (1971)
- STRASSER, H.: Lehrbuch der Muskel- und Gelenkmechanik Bd.11, Springer, Berlin 1913
- TÄGER, K.H.: Wirbelmeniskus oder Synovialfortsatz. *Z.Orthop.* 99, 439-447 (1966)
- THURNER, J., E. BODNER: Funktionsmechanische, deformierende Insertionstendopathien im Bereich der Halswirbelsäule. *Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis* 26, 85-91 (1963)
- TILLMANN, B.: A Contribution to the Functional Morphology of Articular Surfaces. In: Normale und Pathologische Anatomie, Bd.34, Hrsg.: W. BARGMANN, W. DOERR; Thieme, Stuttgart 1978
- TILLMANN, B.: Funktionelle Morphologie und Beanspruchung der Gelenke. *Verh.Anat.Ges.* 72, 47-63 (1978)
- TOLDT, C., F. HOCHSTETTER: Anatomischer Atlas, 26.Aufl. Hrsg.: J. KRMPOTIC-NEMANIC; Urban & Schwarzenberg, München-Berlin-

- Wien, 1975
- TÖNDURY,G.: Beitrag zur Kenntnis der kleinen Wirbelgelenke. Z. Anat.EntwGesch. **110**, 568-575 (1940)
- TÖNDURY,G.: Entwicklungsgeschichte und Fehlbildungen der Wirbelsäule. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd.7, Hippokrates, Stuttgart 1958
- TÖNDURY,G.: Morphology of the cervical spine. In: The Cervical Spine. 14-35. Hrsg.: A.JUNG; Huber, Bern 1974
- TÖNDURY,G.: Funktionelle Anatomie der Wirbelsäule. In: Wirbelsäule, Muskeltonus und Defektsyndrome. Hrsg.: G.LASSMANN, E. NEUMAYER; Facultas, Wien 1975
- TORKLUS,D.v., W.GEHLE: Die obere Halswirbelsäule. 2.Aufl. Thieme, Stuttgart 1975
- TUSZEWSKI,F.: Multiple Mißbildungen der Lendenwirbelsäule mit Hypo- und Aplasie zahlreicher Gelenkfortsätze. Fortschr. Röntgenstr. **92**, 462-463 (1960)
- VELE,F.: Wirbelgelenk und Bewegungssegment innerhalb des Steuerungssystems der Haltemuskulatur. Man.Med. **6**, 94-96 (1968)
- VIRCHOW,H.: Sitzungsber.d.Ges.d.Naturf.Freunde, Berlin 265-290 (1909)
- WENT,H.: Zur klinischen Bedeutung persistierender Apophysen an den Gelenkfortsätzen der Lendenwirbelsäule. Arch.orthop. Unfall-Chir. **49**, 568-577 (1958)
- WILLIS,T.A.: Lumbosacral anomalies. J.Bone Jt.Surg. **41-A**, 935-938 (1959)
- WOLFF,H.: Studien an der mittleren Halswirbelsäule. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis **26**, 78-84 (1963)
- YONGHING,K., J.REILLY, W.H.KIRKALDY-WILLIS: The ligamentum flavum. Spine **1**, 226-234 (1976)
- YU CHE: The arteries of the human thoracic vertebrae. Acta anat. sin. **9**, 301-308 (1966)
- ZACCHEO,D., E.REALE: Contributo alla conoscenza delle articolazioni tra i processi articolare delle vertebre dell'uomo. Archivio di Anat. **61**, 1-16 (1956)
- ZUKSCHWERDT,L., E.EMMINGER, F.BIEDERMANN, H.ZETTEL: Wirbelgelenk und Bandscheibe. 2.Aufl. Hippokrates, Stuttgart 1960

## 9 Sachverzeichnis

Halbfette Ziffern = Bildhinweise

- Akzessorische Knochenkerne 60, 61  
 Arcus apicalis axis 49  
 Arteria arcus vertebrae lateralis superior/inferior 46,48  
 Arteria cervicalis profunda 46  
 Arteria iliolumbalis 46  
 Arteria intercostalis suprema 46  
 Arteria pharyngea ascendens 46  
 Arteria thyroidea inferior 46  
 Arteria vertebralis 46,49,49,50  
 Arteria intercostales posterior 46  
 Arteriae lumbales 46  
 arterielle Versorgung 46f  
 Articulatio atlantoaxialis lateralis 12,13,31,33,83f
- Bewegungsprinzip der Wirbelgelenke 102f  
 Bewegungsregion 1,81,83,85,88, 91,102
- Discus intervertebralis 67f  
 Discus intervertebralis (Entwicklung) 55,56  
 Dorsalflexion 83,99f,99,100  
 Druckübertragung 70f,74,75,76, 78,79,90
- Endstellung 94f,100,103
- Gelenkflächen (Größe) 14  
 Gelenkflächen (Spaltlinien) 11, 12,13  
 Gelenkfortsätze (Entwicklung) 56f  
 Gelenkfortsätze (sagittaler Abstand vom Wirbelkörper -  $d_2$ ) 4,17,18,71  
 Gelenkfortsätze (transversaler Abstand -  $d_1$ ) 4,14,15,71,90  
 Gelenkfortsatzhöhe (obere -  $h_1$ ) 5,21,22,25,66  
 Gelenkfortsatzhöhe (untere -  $h_2$ ) 5,21,23,25,65  
 Gelenkkapsel 28f,38,39  
 Gelenkkapsel (Entwicklung) 58, 61,63f,65  
 Gelenkkörper 7f  
 Gelenkkörper (Entwicklung) 62f
- Gelenkspalt 7,21,58,92  
 Gelenkspalt (Entwicklung) 58, 60f,61  
 Gelenkspalt (Klaffen) 79,82,85, 86,92f,93,98,99  
 Gelenkspalt (Recessus) 28,29, 29,30,100
- Hebelarme 90,98,101,101  
 Hebelpunkte 77,83,90,93,94,99, 103  
 Hyperlordosierung 93  
 Hyperplasie (Gelenkfortsätze) 66  
 Hypoplasie (Gelenkfortsätze) 66
- Kinematik 81f  
 Kopfgelenke 12,13,31,33,83f
- Lateralflexion 83,87,87,88,89, 94,101f,101  
 Lateralflexion (zwangsläufige) 85,86,87,87,94,95  
 Ligamentum flavum 29,37,38,40, 42,43,43,44,45,48,64  
 Ligamentum interspinale 37,40, 45,45,98,100  
 Ligamentum intertransversarium 37,40,42,50,51,52,53  
 Ligamentum nuchae 36,37,76,77  
 Ligamentum supraspinale 37
- Membrana fibrosa 28,29,35,36, 36,37,40,63  
 Membrana interdorsalis 55,63  
 Membrana reuniens 56,57  
 Membrana synovialis 28,28,29, 100  
 meniskoide Falten 30,31,32,33, 33,34,35,61,63,65,78f,80,103  
 Musculi rotatores 40,41,52,82  
 Musculus multifidus 41,52
- Nebenknochenkerne (sekundäre Epiphysen) 59f,59,61  
 Neigungswinkel ( $\alpha$ ) 3,5,17,19, 59,62,70,73,87,89,91  
 Neigungswinkel ( $\delta_1$ ) 3,5,70,73  
 Nervenversorgung 50f  
 Nervus spinalis 29,42,50,51  
 Nervus spinalis (Anlage) 55

Öffnungswinkel ( $\beta$ ) 3,4,7,17,  
20,26,63,64,66,84,91,92

Perichordalröhre 54  
Plexus venosus vertebralis ex-  
ternus/internus posterior 50  
Plicae synoviales 30  
Primitiventwicklung 54f  
Processus neuralis 55,55,56

radiologische Darstellbarkeit 21  
Ramus cutaneus lateralis 46  
Ramus cutaneus medialis 46,48,  
49  
Ramus dorsalis 46,49,53  
Ramus dorsalis nervi spinalis  
50,51,52,53  
Ramus meningeus 50,51,53  
Ramus ventralis nervi spinalis  
51,53  
Randwulst 8f,28,29,80  
Rete articulare 49  
Rotation 83,84,85,87,88,89,91,94f,  
95,96,97  
Rotation (zwangsläufige) 85,87,  
87,91,94,101,102

Sagittalflexion 83,84,85,89,91,98f  
Skleromiten 54,54  
Sklerotome 54  
Spondylolyse 60,61,101  
Spongiosastruktur 26,27,96  
Statik 67f

Unterstützungsfläche 68f,68,69,  
90,91

Vakuumphänomen 79  
Vena vertebralis 50  
Venae intercostales 50  
Venae lumbales 50  
venöser Abfluß 50  
Ventralflexion 83,98,99

Wirbelkörperhöhe (hintere -  $h_3$ )  
5,21,24

Bayerische  
Staatsbibliothek  
München