

Original Articles

Der altersabhängige Verbundbau der Lendenwirbelkörper

Eine Struktur- und Formanalyse*

H.-J. Pesch¹, H.-P. Scharf^{1**}, G. Lauer¹ und H. Seibold²

Pathologisches Institut¹ (Direktor: Prof. Dr. V. Becker), Krankenhausstraße 8–10 und
Institut für Medizinische Statistik und Dokumentation² (Direktor: Prof. Dr. L. Horbach),
Waldstraße 6, der Universität Erlangen-Nürnberg, D-8520 Erlangen,
Bundesrepublik Deutschland

Age-Dependent Compoundconstruction of the Lumbar Vertebrae An Analysis of Structure and Form

Summary. In 240 autopsy cases of both sexes, aged between 19 and 88 years, with no evidence of clinically manifest bone diseases, the *structure* of the spongy bone and the external *form* of the 3rd and 5th lumbar vertebral bodies (LV) were investigated quantitatively and morphometrically as a function of age, and mechanical loading. The evaluation was performed on the basis of X-ray images of 100 μ -thick polished bone sections using the Leitz texture analysis system. The structure of the *cross-sectional surface* of the vertebral body was analysed both as a whole, and also after subdivision into 5 equal-sized horizontal rectangles, "*fifths*". The external form was determined by measuring the greatest and smallest *heights* and *widths*, and the differences of these heights and widths calculated from these figures.

In both lumbar vertebrae, the *volume density* and the *surface density* are virtually equal and between the ages of 50 and 70 decrease uniformly by about one-third. The *specific surface* remains constant. In the individual "*fifths*", these three structural variables manifest a typical "stepped" distribution, the highest values being in the outer "*fifths*" and the lowest in the inner "*fifths*". In consequence of the age-dependent loss of spongy bone, a flattening of this stepped distribution occurs from the age of 50 upwards, so that at age 70 and beyond, only the outer "*fifths*" differ from the equal inner and middle "*fifths*". Volumetric density and the surface density are correlated in the entire lumbar vertebrae in their individual fifths and between the two lumbar vertebrae examined.

* Herrn Prof. Dr. Dres. h. c. Erwin Uehlinger zur Vollendung seines 80. Lebensjahres in tiefer Verehrung und Dankbarkeit

** D 29

Sonderdruckanforderungen an: Prof. Dr. H.-J. Pesch, Pathologisches Institut der Universität, Krankenhausstraße 8–10, D-8520 Erlangen, Bundesrepublik Deutschland

With respect to the external form, the *height* and the difference in heights remain constant throughout the whole of life; the maximum *width* and the difference in widths revealed an age-dependent increase.

The vertebral bodies are mainly subjected to *compressive forces*. The principle of their construction is based on the functional unit of the compound construction of spongy bone and the hydraulic support given by the fluid-filled cells of the medullary space.

The construction-dependent *inhomogeneity* represents the morphological equivalent of regionally differing mechanical loading in the vertebral body. As, with increasing age, physical stressing of the skeletal system decreases, the spongiosa trabeculae lack an adequate stimulus for the preservation of their former structure. Accordingly, the structure of the remaining spongy bone changes to meet these new age-dependent conditions of mechanical loading.

Despite considerable structural changes, the external form of the lumbar vertebrae remains largely constant with respect to height. The increase in maximum width, representing a spondylosis deformans, is based on an increase in tensile forces acting upon the outer edges of the vertebral bodies following degenerative intervertebral disc changes. It leads to an impairment of the dynamic, but not the static, function of the vertebral column.

These changes in the structure and form of the vertebral bodies, which differ in their nature, may be considered to be specific to man and to apply equally to all the vertebrae.

Coexistence of breakdown and new formation of the spongy bone is an expression of the functional unity of the bones and the muscles and of the reactive plasticity of bony tissue.

Key words: Quantitative morphometry – Electronic image analysis – Spongy bone structure and external form – 3rd and 5th lumbar vertebrae – Mechanical and age-dependent changes.

Zusammenfassung. Bei 240 Verstorbenen beiderlei Geschlechts im Alter von 19–88 Jahren wurde nach Ausschluß klinisch manifester Knochenerkrankungen die *Struktur* der Spongiosa und die äußere *Form* des 3. und 5. *Lendenwirbelkörpers* (LWK) in Abhängigkeit von Lebensalter und Mechanik quantitativ-morphometrisch untersucht. Die Auswertung erfolgte an Röntgenbildern 100 µ dicker Knochengroßflächenschliffe mit Hilfe des Leitz-Textur-Analyse-Systems. Die Struktur der *Querschnittsfläche* der Wirbelkörper wurde einerseits *insgesamt*, andererseits nach Unterteilung in gleich große, horizontale Rechtecke jeweils in *Fünfte* analysiert. Die äußere Form wurde durch die Messung der jeweils größten und kleinsten *Höhe* bzw. *Breite* sowie den daraus berechneten Differenzen dieser Höhen und Breiten erfaßt.

Volumetrische Dichte und *Oberflächendichte* sind in beiden LWK nahezu gleich hoch und nehmen vom 50. bis zum 70. Lebensjahr und älter gleichsinnig um etwa ein Drittel ab. Die *spezifische Oberfläche* bleibt konstant. In den einzelnen *Fünfte* weisen diese drei Strukturparameter eine typische, treppenförmige Verteilung mit den höchsten Werten in den äußeren Fünfte und den niedrigsten im Inneren auf. Durch den altersabhängigen Spongiosa-

verlust kommt es ab dem 50. Lebensjahr zu einer Abflachung dieser treppenförmigen Verteilung, so daß sich in der Altersklasse 70 Jahre und älter nur noch die äußeren von dem inneren und den mittleren Fünfteln unterscheiden. Volumetrische Dichte und Oberflächendichte korrelieren miteinander im gesamten LWK ebenso wie in seinen einzelnen Fünfteln, aber auch zwischen den beiden LWK.

Bei der äußeren Form bleiben die *Höhe* und die Differenz der Höhen während des gesamten Lebens konstant. Lediglich die maximale *Breite* und die Differenz der Breiten zeigen eine altersabhängige Zunahme.

Die Wirbelkörper werden vorwiegend auf *Druck* beansprucht. Ihr Konstruktionsprinzip beruht auf der funktionellen Einheit des Verbundbaues der Spongiosa und der hydraulischen Verstärkung durch die flüssigkeitshaltigen Zellen des Markraumes.

Die konstruktionsbedingt *inhomogene Struktur* stellt das morphologische Äquivalent der im Wirbelkörper regional unterschiedlichen mechanischen Beanspruchung dar. Auf Grund der mit dem Alter abnehmenden körperlichen Belastung des Skeletsystems fehlt den Spongiosabälkchen der für die bisherige Struktur *adäquate Erhaltungszustand*. Dementsprechend resultiert die den altersgemäßen mechanischen Erfordernissen physiologisch angepaßte Struktur der Restspongiosa.

Trotz des erheblichen Strukturwandels bleibt die äußere Form der LWK hinsichtlich der Höhe weitgehend konstant. Die Zunahme der maximalen Breite in Form der Spondylosis deformans beruht auf einer vermehrten Zugbelastung der Wirbelkörperendplatte infolge von degenerativen Bandscheibenveränderungen und führt zu einer Einschränkung der dynamischen, jedoch nicht der statischen Funktionen der Wirbelsäule.

Dieser wesensverschiedene Wandel der Struktur und Form der Wirbelkörper ist als humanspezifisch anzusehen und betrifft alle Wirbel gleichermaßen.

Dieses Nebeneinander von An- und Abbau der Spongiosa ist Ausdruck der funktionellen Einheit von Knochen und Skelettmuskulatur bzw. der reaktiven Plastizität des Knochengewebes.

Einleitung

Die Entwicklung der Wirbelkörper bis zum Abschluß des Wachstums verläuft in drei Phasen (Töndury, 1958). Nach einer mesenchymalen und knorpeligen Zwischenphase entsteht lamellärer Knochen mit einer quasitrajektorialen Anordnung (Knese, 1958), die während des gesamten Lebens durch die reaktive Plastizität des Knochengewebes (Pliess, 1969) den jeweils aktuellen statischen Erfordernissen angepaßt wird.

Der Materialaufbau der Spongiosa aus druckfesten Kristalliten und zugfesten Kollagenfasern wird mit einem mehrere Ordnungsstufen umfassenden Verbundbau verglichen (Knese, 1958), wobei offensichtlich die Vielzahl der wirksam werdenden Kräfte zu einer Inhomogenität der Spongiosastruktur der Wirbelkörper (Junghanns, 1939; Dietrich, 1956; Arnold et al., 1966; Atkinson, 1967; Amstutz und Sissons, 1969) führt.

Quantitative Untersuchungen zur Struktur der Spongiosa und der Form der Wirbelkörper sind methodisch außerordentlich schwierig. Rein radiologische Verfahren sind wegen des Summationseffektes ungeeignet und erlauben erst in der Kombination mit der Densitometrie Aussagen zu Meßpunktorten gleicher Knochendichte (Rassow, 1976).

Morphometrische Untersuchungen der Spongiosa sind mit Hilfe der Parameter volumetrische Dichte, Oberflächendichte und spezifischer Oberfläche prinzipiell möglich (Delesse, 1866; Henning, 1956 und 1958; Blaschke, 1967; Elias, 1967; Merz, 1967; Merz und Schenk, 1970; Underwood, 1970). Wegen des außerordentlichen Zeitaufwandes wurden sie bislang vorwiegend aus diagnostischen Gründen am Beckenkamm mit dem Meßokular durchgeführt (Wagner, 1965; Schenk und Merz, 1969; Kuhlencordt et al. 1970; Vitalli, 1970; Delling, 1972 und 1974; Burkhardt, 1973).

Mit gleicher Genauigkeit (Meunier et al., 1973), aber in angemessenerer Zeit ermöglicht die automatische Bildanalyse (Serra, 1973) unter bestimmten methodischen Voraussetzungen quantitative Strukturanalysen auch großflächiger Knochen (Pesch et al., 1977).

Die altersabhängigen Veränderungen der *Struktur* der Spongiosa und der äußeren *Form* von Lendenwirbelkörpern (LWK) wurden bei Verstorbenen ohne klinisch manifeste Knochenerkrankungen analysiert.

Material und Methode

Untersucht wurden bei 240 Verstorbenen beiderlei Geschlechts im Alter von 19–88 Jahren (Tabelle 1a und b) nach Ausschluß knocheneigener bzw. sekundärer Knochenerkrankungen (z. B. Systemerkrankungen).

Tabelle 1a und b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der volumetrischen Dichte (V_v), der Oberflächendichte (S_v) und der spezifischen Oberfläche (S/V) der Spongiosa des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) in Abhängigkeit vom Lebensalter

Alter (Jahre)	Fall- zahl	Volumetrische Dichte (V_v)		Oberflächendichte (S_v)		Spez. Oberfläche (S/V)	
		(n)	(%) s	(mm ² /cm ³)	s	(mm ² /mm ³)	s
a) 20–29	8	23,1	1,60	2,740	100	12,09	0,54
30–39	29	22,7	0,79	2,580	71	11,48	0,20
40–49	44	22,6	0,73	2,540	52	11,48	0,20
50–59	41	19,5	0,76	2,248	55	11,08	0,23
60–69	55	18,0	0,62	2,063	49	11,80	0,19
≥ 70	63	15,9	0,63	1,847	52	12,01	0,24
b) 20–29	8	22,9	0,98	2,706	298	11,97	0,50
30–39	30	23,2	0,76	2,602	64	11,32	0,16
40–49	44	22,6	0,76	2,566	49	11,68	0,26
50–59	41	20,5	0,62	2,314	47	11,47	0,20
60–69	55	19,1	0,74	2,160	54	11,80	0,24
≥ 70	62	17,9	0,64	2,000	50	11,52	0,20

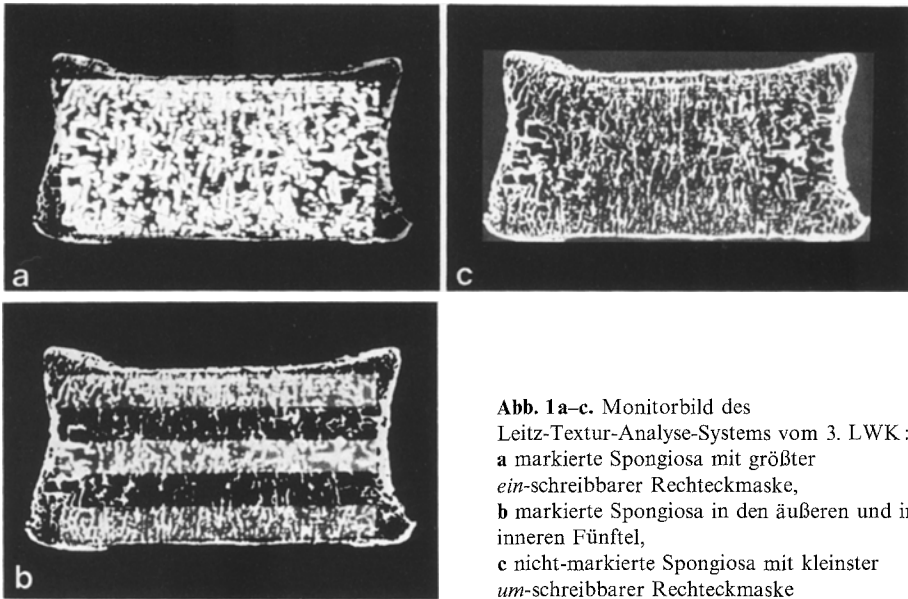


Abb. 1a–c. Monitorbild des Leitz-Textur-Analyse-Systems vom 3. LWK :
a markierte Spongiosa mit größter ein-schreibbarer Rechteckmaske,
b markierte Spongiosa in den äußeren und im inneren Fünftel,
c nicht-markierte Spongiosa mit kleinster um-schreibbarer Rechteckmaske

kungen) der 3. und 5. LWK. Parallel zur Frontalebene wurden aus der Mitte dieser Wirbelkörper nach Fixierung und Einbettung in Methylmethacrylat 100 μ dicke Knochengroßflächenschliffe auf planparallelen Plexiglasobjektträgern angefertigt, von denen kontrastreiche Röntgenbilder hergestellt wurden (ausführliche methodische Darstellung: Pesch et al., 1975, 1977). Diese wurden zur quantitativen Auswertung mittels der Makroeinrichtung des Leitz-Textur-Analyse-Systems durch eine Schwarz-Weiß-Fernsehkamera auf einen Monitor übertragen.

Die *Spongiosastruktur* wurde zuerst im gesamten Wirbelkörper, dann in seinen horizontalen Fünfteln erfaßt. Hierzu wurde die Spongiosa mit der gerade noch unter Ausschluß der Corticalis ein-schreibbaren Rechteckmaske (Abb. 1a) bzw. deren horizontalen Fünfteln (Abb. 1b) markiert und mit Hilfe eines elektronischen Rechners die volumetrische Dichte (V_v), die Oberflächendichte (S_v) und die spezifische Oberfläche (S/V) berechnet.

Die *Wirbelkörperform* wurde mit zwei Rechteckmasken bestimmt: aus der Höhe (H_{\min}) und der Breite (B_{\min}) des gerade noch unter Ausschluß der Corticalis ein-schreibbaren (Abb. 1a) sowie der Höhe (H_{\max}) und Breite (B_{\max}) des eben noch unter Einschluß der Corticalis um-schreibbaren Rechtecks (Abb. 1c) wurden in Anlehnung an den Wirbelsäulenindex von Barnett und Nordin (1960) die Differenzen der Höhen (ΔH) und der Breiten (ΔB) ermittelt.

Nach der Varianzanalyse der Alters- und Geschlechtsabhängigkeit wurde von den einzelnen Dezennien die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Mittelwerte der gemessenen Parameter berechnet. Der Zusammenhang der Meßwerte für jeden LWK insgesamt und seine einzelnen Fünftel bzw. für beide LWK untereinander wurden mittels Regressions-Korrelationsanalysen überprüft. Mit den gleichen statistischen Methoden wurden auch die Beziehung zwischen Spongiosastruktur und Wirbelkörperform untersucht.

Ergebnisse

Zum Verständnis der Ergebnisse sollen einige Termini kurz definiert werden.

Die *volumetrische Dichte* (V_v) entspricht dem Verhältnis von Spongiosaeigen-volumen zum Gesamtvolumen (Trabekelvolumen und Knochenmarkvolumen)

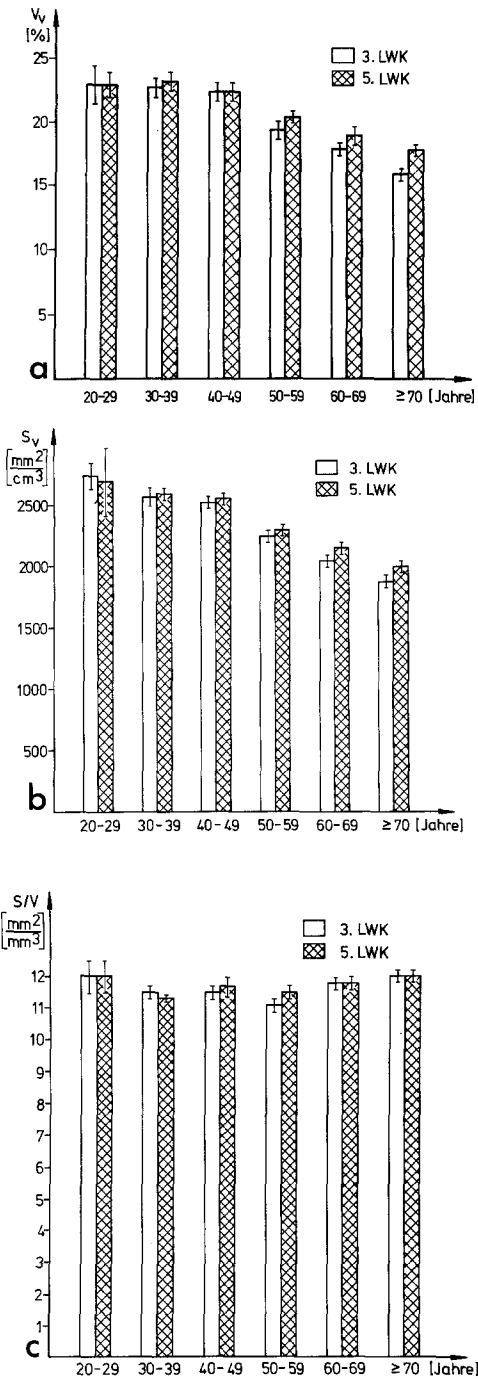


Abb. 2a-c. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der volumetrischen Dichte (a), der Oberflächendichte (b) und der spezifischen Oberfläche (c) der Spongiosa des 3. und 5. LWK in Abhängigkeit vom Lebensalter

Tabelle 2a und b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der volumetrischen Dichte (V_v) der Spongiosa in den einzelnen Fünfteln des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) in Abhängigkeit vom Lebensalter

Alter (Jahre)	Fall- zahl	Volumetrische Dichte (V_v)										
		äußere Fünftel					mittlere Fünftel				inneres Fünftel	
		(n)	(%)	s	(%)	s	(%)	s	(%)	s	(%)	s
a) 20–29	8	26,3	1,76	24,8	2,65	22,7	1,41	21,2	2,12	20,0	1,44	
30–39	29	26,2	0,94	25,2	1,29	21,5	0,68	21,4	1,00	20,0	0,92	
40–49	44	25,5	0,94	24,9	1,08	21,5	0,73	21,8	0,85	20,1	0,72	
50–59	41	22,7	1,18	20,5	0,96	19,4	0,85	17,7	0,70	17,7	0,62	
60–69	55	20,7	0,93	18,2	0,83	17,5	0,73	17,3	0,75	17,2	0,69	
≥ 70	63	18,5	0,94	17,2	0,70	15,4	0,66	14,8	0,63	14,7	0,64	
b) 20–29	8	23,8	1,66	24,5	1,27	21,4	1,02	22,9	1,69	22,2	1,23	
30–39	30	23,6	0,89	24,9	1,16	22,0	0,64	22,5	0,87	22,9	0,78	
40–49	44	24,5	1,00	24,3	1,14	22,2	0,85	22,2	0,82	22,1	0,75	
50–59	41	22,2	0,95	21,6	0,85	19,9	0,71	20,2	0,74	19,6	0,64	
60–69	55	20,0	0,90	20,2	0,88	18,5	0,84	18,0	0,73	18,8	0,75	
≥ 70	62	19,1	0,69	19,2	0,85	16,8	0,71	17,2	0,69	17,2	0,67	

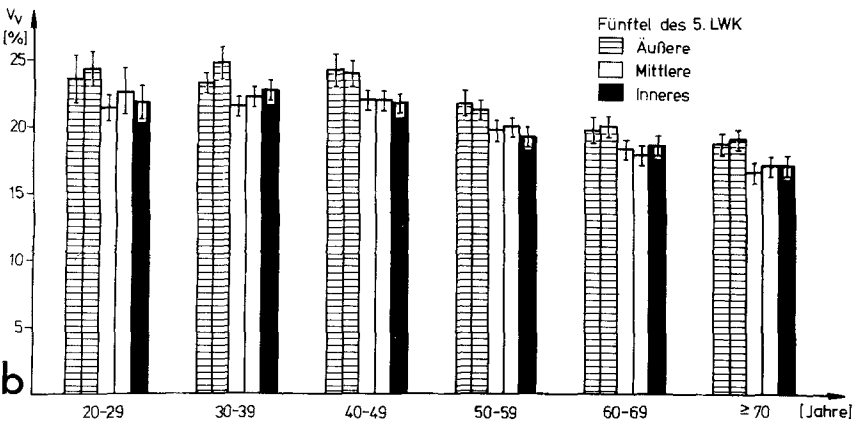
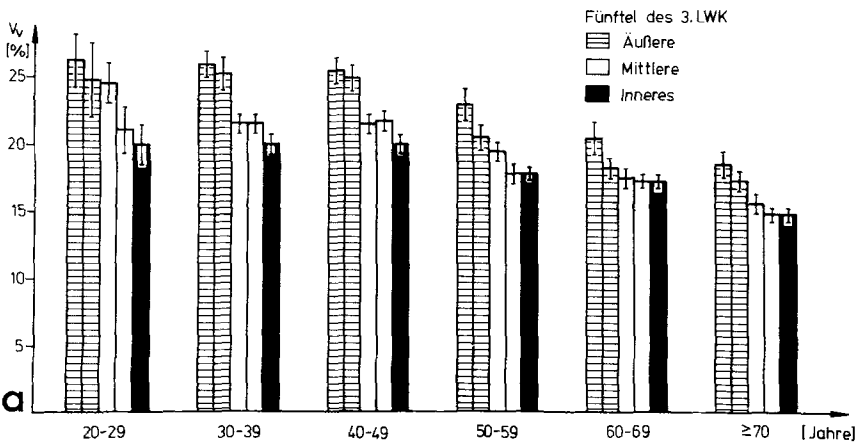


Abb. 3a u. b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der volumetrischen Dichte der Spongiosa in den einzelnen Fünfteln des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) in Abhängigkeit vom Lebensalter

Tabelle 3 a und b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der Oberflächendichte (S_v) der Spongiosa in den einzelnen Fünfteln des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) in Abhängigkeit vom Lebensalter

Alter (Jahre)	Fall- zahl	Oberflächendichte (S_v)										
		äußere Fünftel					mittlere Fünftel				inneres Fünftel	
		(mm ² / cm ³)	s	(mm ² / cm ³)	s	(mm ² / cm ³)	s	(mm ² / cm ³)	s	(mm ² / cm ³)	s	
(n)												
a) 20–29	8	3269	108	3115	153	2777	126	2547	144	2236	111	
30–39	29	3109	87	3003	102	2516	65	2451	91	2133	69	
40–49	44	3023	70	2991	79	2469	55	2461	66	2101	50	
50–59	41	2688	78	2588	79	2209	64	2130	63	1902	44	
60–69	55	2555	120	2312	65	2015	57	1993	59	1833	51	
≥ 70	63	2187	69	2156	66	1785	59	1735	56	1608	51	
b) 20–29	8	3045	85	3132	92	2600	77	2670	92	2373	76	
30–39	30	2935	81	2987	87	2539	62	2545	68	2368	63	
40–49	44	3007	68	2987	108	2523	54	2498	56	2269	51	
50–59	41	2682	68	2638	63	2275	54	2265	59	2039	47	
60–69	55	2414	65	2493	70	2100	59	2092	60	1976	54	
≥ 70	62	2304	57	2307	70	1908	57	1924	64	1818	53	

des Knochens in Prozent (%) unabhängig von der Größe des Knochens. Sie ist damit ein Maß für die im Knochen vorhandene Spongiosamenge.

Die *Oberflächendichte* (S_v) gibt die Grenzoberfläche zwischen Spongiosabälkchen und Markraum bezogen auf das gesamte Knochenvolumen wieder (mm²/cm³). Sie ist ein Maß für die Trabekeloberfläche.

Die *spezifische Oberfläche* (S/V) ist definiert als Grenzoberfläche bezogen auf das Spongiosaeigenvolumen (mm²/mm³). Sie erlaubt Rückschlüsse auf den mittleren Bälkchendurchmesser. Eine hohe spezifische Oberfläche ist gleichbedeutend mit einem kleinen, eine niedrige spezifische Oberfläche mit einem großen mittleren Bälkchendurchmesser.

Der *Wirbelsäulenindex* entspricht dem mit 100 multiplizierten Quotienten aus der mittleren und der vorderen Wirbelkörperhöhe, die im seitlichen Röntgenbild des am besten zentrierten LWK (zumeist des 3. LWK) gemessen wird. Sie ist ein Maß für die Eindellung der Grund- und Deckplatten der Wirbelkörper.

Die varianzanalytischen Tests mit einem Signifikanzniveau von 5% auf Alters- und Geschlechtsabhängigkeit der *Spongiosastruktur* zeigten für den 3. bzw. 5. LWK und für die Fünftel beider Wirbelkörper eine statistisch signifikante Altersabhängigkeit der volumetrischen Dichte und der Oberflächendichte. Eine Geschlechtsabhängigkeit konnte nicht sicher ausgeschlossen werden; sie erreichte jedoch weder für den 3. noch für den 5. LWK signifikante Werte. Für die spezifische Oberfläche ergab sich keine Abhängigkeit von Alter oder Geschlecht. Für die weitere Auswertung wurden deshalb die beiden Geschlechter zusammengefaßt und in sechs Altersgruppen unterteilt.

Die volumetrische Dichte, die Oberflächendichte und die spezifische Oberfläche sind in den beiden LWK annähernd gleich groß (Tabelle 1a und b, Abb. 2a–c).

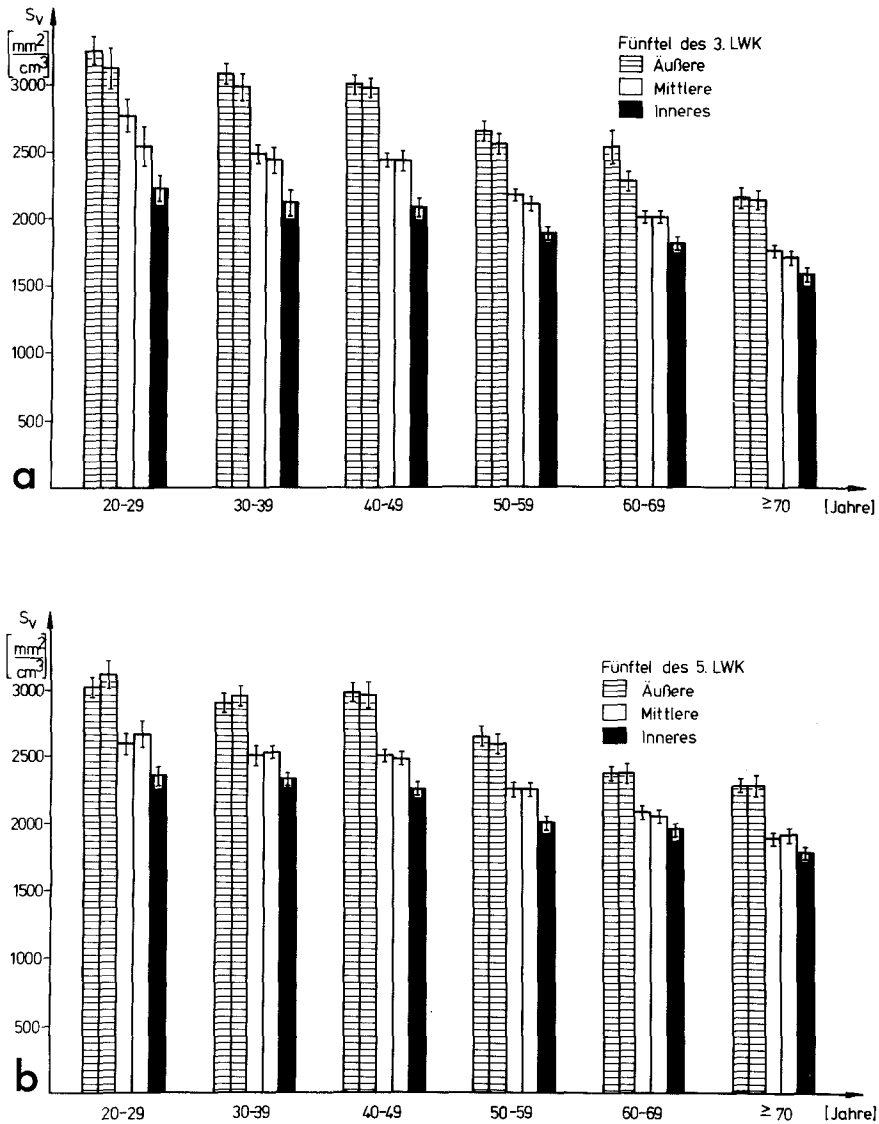


Abb. 4a u. b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der Oberflächendichte der Spongiosa in den einzelnen Fünfteln des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) in Abhängigkeit vom Lebensalter

Die *volumetrische Dichte* nimmt vom 50. bis zum 70. Lebensjahr und älter im 3. LWK um 31% bzw. im 5. LWK um 22% des Anfangswertes ab. In den einzelnen Fünfteln zeigt sie beim 3. bzw. 5. LWK regelmäßig eine typische, treppenförmige Verteilung (Tabelle 2a und b, Abb. 3a und b). In den endplatten-nahen äußeren Fünfteln sind die Werte am höchsten und nehmen zur Mitte hin beim 3. LWK um etwa $\frac{1}{5}$ bzw. beim 5. LWK um etwa $\frac{1}{10}$ ab. Die altersabhängige Dichteminderung beträgt in den äußeren und mittleren Fünfteln des 3. LWK etwa 30% bzw. des 5. LWK etwa 22% und in den inneren Fünfteln

Tabelle 4a und b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der spezifischen Oberfläche (S/V) der Spongiosa in den einzelnen Fünfteln des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) in Abhängigkeit vom Lebensalter

Alter (Jahre)	Fall- zahl	Spezifische Oberfläche (S/V)									
		äußere Fünftel				mittlere Fünftel				inneres Fünftel	
		(mm ² / mm ³)	s	(mm ² / mm ³)	s	(mm ² / mm ³)	s	(mm ² / mm ³)	s	(mm ² / mm ³)	s
a) 20–29	8	12,71	0,70	13,14	0,83	12,33	0,36	12,38	0,56	11,30	0,40
30–39	29	12,04	0,26	12,24	0,28	11,80	0,18	11,69	0,28	10,90	0,25
40–49	44	12,27	0,29	12,49	0,28	11,76	0,21	11,59	0,22	10,70	0,19
50–59	41	12,42	0,33	13,12	0,30	11,68	0,23	12,27	0,22	10,93	0,20
60–69	55	13,11	0,75	13,38	0,28	11,97	0,22	12,09	0,23	11,15	0,22
≥ 70	63	12,37	0,23	12,93	0,24	11,97	0,21	12,17	0,23	11,42	0,23
b) 20–29	8	13,11	0,72	12,97	0,64	12,30	0,50	11,95	0,69	10,84	0,52
30–39	30	12,66	0,28	12,30	0,26	11,60	0,15	11,48	0,32	10,46	0,15
40–49	44	12,71	0,26	12,81	0,39	11,77	0,27	11,56	0,24	10,53	0,22
50–59	41	12,48	0,29	12,59	0,28	11,69	0,23	11,46	0,24	10,56	0,19
60–69	55	12,68	0,27	12,95	0,28	11,80	0,20	12,29	0,35	11,19	0,40
≥ 70	62	12,48	0,22	12,51	0,26	11,75	0,20	11,46	0,26	10,89	0,20

etwa 26% bzw. 22%. Durch diese Abnahme besteht in der Altersgruppe 70 Jahre und älter in beiden LWK kein Dichteunterschied mehr zwischen den inneren und den angrenzenden mittleren Fünfteln.

Die *Oberflächendichte* verringert sich entsprechend dem Dichteverlust der Spongiosa vom 50. bis zum 70. Lebensjahr und älter beim 3. LWK um etwa 32% bzw. beim 5. LWK um etwa 26%. In den einzelnen Fünfteln beider Wirbel zeigt sie analog der volumetrischen Dichte regelmäßig eine treppenförmige Verteilung (Tabelle 3a und b, Abb. 4a und b), bei der die Werte des inneren Fünftels beim 3. LWK um etwa $\frac{1}{3}$ bzw. beim 5. LWK um etwa $\frac{1}{4}$ niedriger sind als in den äußeren Fünfteln. Im Rahmen der altersabhängigen Abnahme verringert sie sich in den äußeren und mittleren Fünfteln beim 3. LWK um etwa 33% bzw. beim 5. LWK um etwa 26% der Anfangswerte. Durch diese unterschiedliche Abnahme ist die Oberflächendichte in der Altersgruppe 70 Jahre und älter im inneren und den mittleren Fünfteln gleich.

Die *spezifische Oberfläche* beider Wirbel hat in allen Altersgruppen den gleichen mittleren Wert von 11,6 (mm²/mm³). Sie ist in den einzelnen Fünfteln beider LWK entsprechend der volumetrischen Dichte und der Oberflächendichte treppenförmig verteilt (Tabelle 4a und b, Abb. 5a und b). Dabei sind die Werte des inneren Fünftels beim 3. LWK um etwa $\frac{1}{9}$ bzw. beim 5. LWK um etwa $\frac{1}{6}$ niedriger als die der äußeren Fünftel. Die spezifische Oberfläche der einzelnen Fünftel bleibt jedoch während des gesamten Lebens gleich.

Korrelationskoeffizienten und Regressionsgeraden zeigen, daß die volumetrische Dichte und die Oberflächendichte im *gesamten* LWK bzw. in den beiden LWK untereinander (Abb. 6) ebenso wie in den einzelnen *Fünfteln* untereinander bzw. in den einzelnen Fünfteln und dem zugehörigen LWK (Abb. 7) gleichsinnig

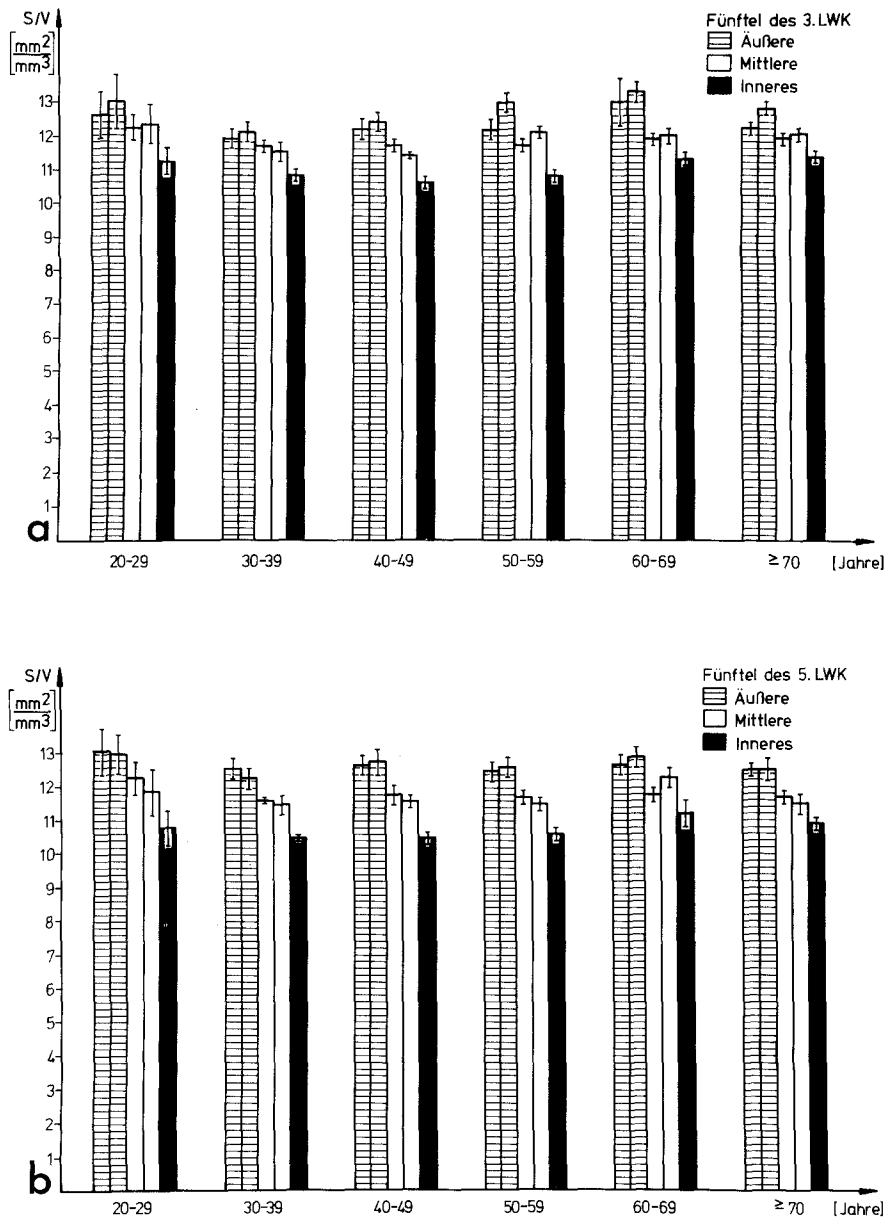


Abb. 5a u. b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der spezifischen Oberfläche der Spongiosa in den einzelnen Fünfteln des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) in Abhängigkeit vom Lebensalter

hoch miteinander korrelieren. Benachbarte Fünftel weisen gegenüber den auseinanderliegenden jeweils den höheren Korrelationskoeffizienten auf. Die für den gesamten Wirbelkörper repräsentativen Werte der volumetrischen Dichte und der Oberflächendichte liegen in beiden LWK im Übergangsbereich der äußeren zu den mittleren Fünfteln.

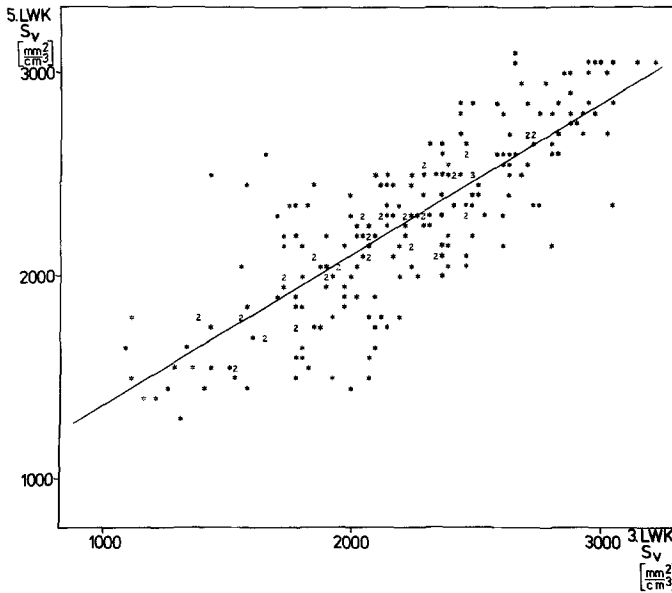


Abb. 6. Korrelationsdiagramm der Oberflächendichte (S_v) des 3. und des 5. LWK ($r=0,83$)

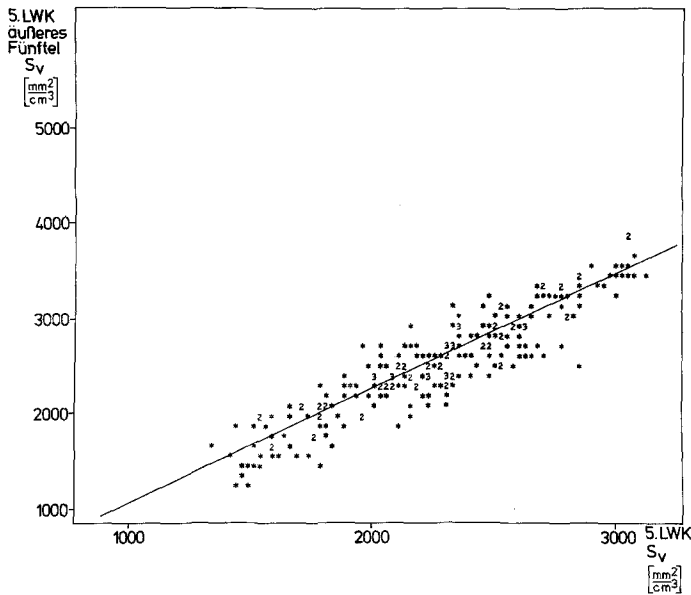


Abb. 7. Korrelationsdiagramm der Oberflächendichte des gesamten 5. LWK und seines äußeren Fünftels ($r=0,87$)

Die varianzanalytischen Tests mit einem Signifikanzniveau von 5% auf Alters- und Geschlechtsabhängigkeit der *Wirbelkörperform* zeigten für den 3. und 5. LWK keine statistische Abhängigkeit vom Lebensalter oder Geschlecht für die minimale Höhe und die Differenz der Höhen. Statistisch abhängig waren dagegen vom Lebensalter die maximale Breite und die Differenz der Breiten, vom Geschlecht die maximale Höhe und die maximale bzw. minimale Breite.

Tabelle 5a und b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der maximalen und minimalen Höhe bzw. Breite des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) in Abhängigkeit vom Lebensalter

Alter (Jahre)	Fall- zahl (n)	Höhen				Breiten			
		maximale		minimale		maximale		minimale	
		(mm)	s	(mm)	s	(mm)	s	(mm)	s
a) 20–29	8	29,54	0,91	23,58	0,51	47,79	2,62	36,99	2,07
30–39	29	27,83	0,36	21,89	0,39	49,14	0,83	37,84	0,75
40–49	44	27,90	0,21	22,23	0,29	49,64	0,68	37,59	0,60
50–59	41	28,20	0,33	21,92	0,26	50,94	0,64	38,06	0,52
60–69	55	27,69	0,23	21,86	0,29	52,88	0,57	38,14	0,51
≥ 70	63	27,32	0,26	20,89	0,28	52,82	0,60	38,86	0,58
b) 20–29	8	29,47	0,61	23,26	1,15	49,23	1,43	39,01	1,46
30–39	30	27,75	0,31	20,85	0,40	51,40	0,86	41,42	0,79
40–49	44	28,07	0,29	21,92	0,37	52,05	0,61	40,60	0,68
50–59	41	27,70	0,29	21,36	0,38	52,40	0,62	39,91	0,69
60–69	55	28,38	0,27	21,78	0,30	55,15	0,58	40,43	0,50
≥ 70	62	27,51	0,25	21,00	0,32	53,69	0,84	40,80	0,73

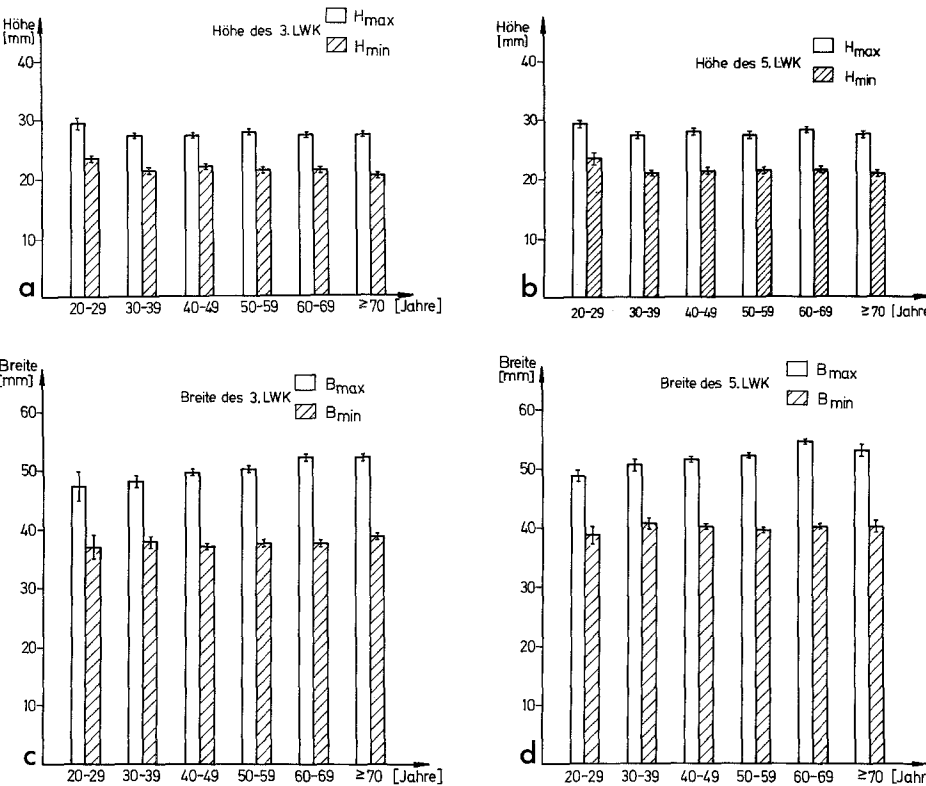


Abb. 8a–d. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der maximalen bzw. minimalen Höhe des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) sowie der maximalen bzw. minimalen Breite des 3. LWK (c) und des 5. LWK (d) in Abhängigkeit vom Lebensalter

Tabelle 6a und b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der Differenzen der Höhen bzw. Breiten des 3. LWK (a) und des 5. LWK (b) in Abhängigkeit vom Lebensalter

	Alter (Jahre)	Fall- zahl (n)	Differenzen			
			Höhen		Breiten	
			(mm)	s	(mm)	s
a)	20–29	8	5,96	1,05	10,80	0,67
	30–39	29	5,94	0,29	11,29	0,33
	40–49	44	5,67	0,22	12,05	0,28
	50–59	41	6,28	0,25	12,88	0,51
	60–69	55	5,83	0,21	14,73	0,41
	≥ 70	63	6,42	0,21	13,95	0,46
b)	20–29	8	6,21	1,05	10,21	0,76
	30–39	30	6,89	0,27	9,98	0,46
	40–49	44	6,14	0,25	11,44	0,49
	50–59	41	6,33	0,22	12,48	0,65
	60–69	55	6,59	0,21	14,71	0,48
	≥ 70	62	6,50	0,25	12,87	0,86

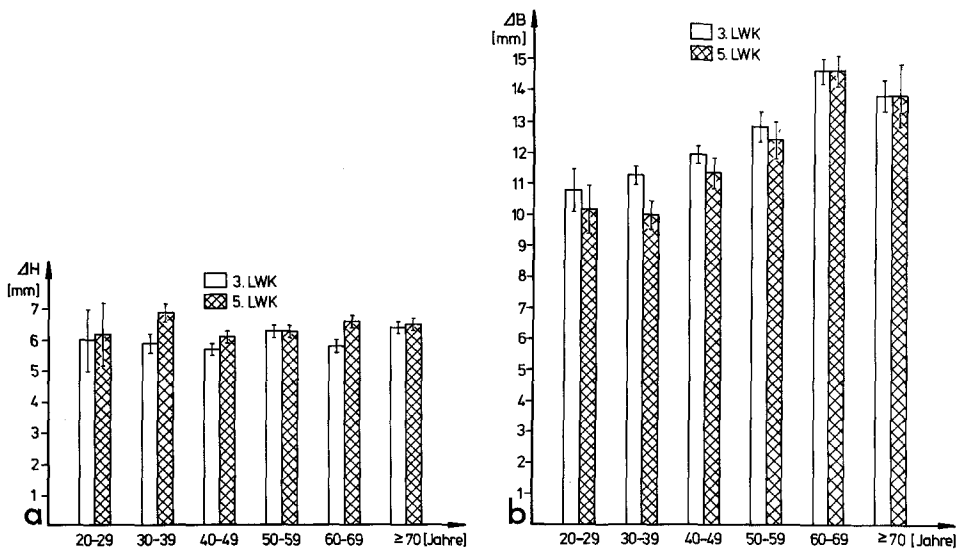


Abb. 9a u. b. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelwerte der Differenz der Höhen (a) und Breiten (b) des 3. und 5. LWK in Abhängigkeit vom Lebensalter

Die maximale bzw. minimale Höhe ist in den beiden LWK annähernd gleich groß, während die maximale bzw. minimale Breite des 5. LWK jeweils größer ist als die des 3. LWK (Tabelle 5a und b, Abb. 8a–d).

Die *maximale Höhe* des 3. bzw. 5. LWK beträgt in allen Altersklassen durchschnittlich 28,1, die *minimale Höhe* für den 3. LWK 22,1 bzw. für den 5. LWK

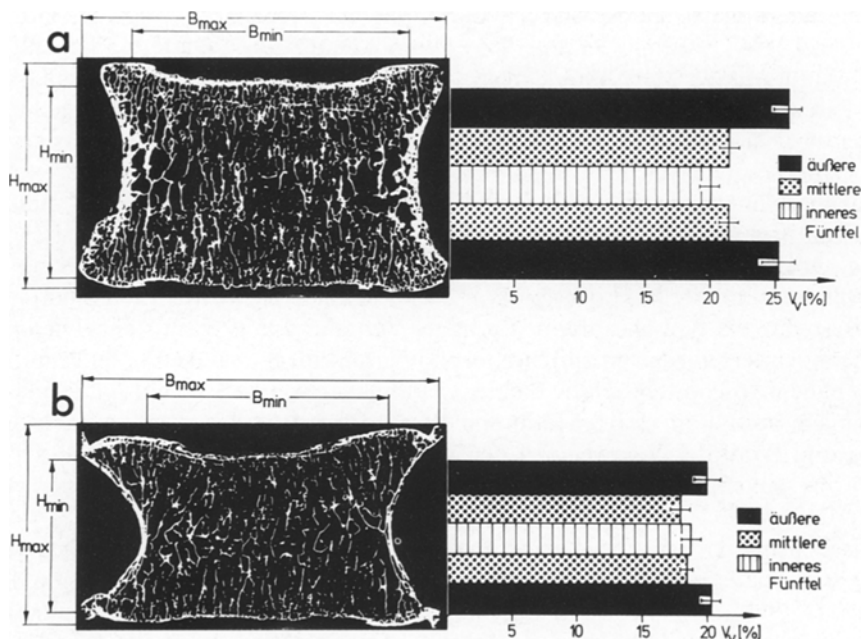


Abb. 10a u. b. Strukturanalytische Röntgenbilder, volumetrische Dichte der zugehörigen Fünfteile sowie maximale bzw. minimale Höhe und Breite des 3. LWK einer 39jährigen Frau (a) und eines 66jährigen Mannes (b)

21,7 mm. Die *Differenz der Höhen* ergibt für den 3. bzw. 5. LWK in allen Altersklassen den gleichen mittleren Wert von etwa 6,0 bzw. 6,4 mm (Tabelle 6, Abb. 9a).

Die *maximale Breite* beträgt in der Altersgruppe der 20–29jährigen beim 3. LWK etwa 47,8 bzw. beim 5. LWK etwa 49,2 mm und nimmt bis zum 70. Lebensjahr und älter um 10% bzw. 9% zu. Die *minimale Breite* ist beim 3. LWK etwa 37,9 bzw. beim 5. LWK etwa 40,4 mm und bleibt während des gesamten Lebens konstant. Die *Differenz der Breiten* des 3. bzw. 5. LWK beträgt in der Altersgruppe der 20–29jährigen 10,8 bzw. 10,2 mm und wächst bis zum 70. Lebensjahr und älter auf 13,9 bzw. 12,9 mm an (Tabelle 6, Abb. 9b).

Die Varianzanalysen und Korrelationsdiagramme zur Abhängigkeit der Spongiosastruktur und der äußeren Form der beiden LWK ergaben keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Struktur- und Formwandel, deren wichtigste Parameter in Abhängigkeit vom Lebensalter an zwei Fällen in der Abb. 10a und b beispielhaft dargestellt sind.

Diskussion

Die innerhalb des gesamten 3. und 5. LWK beobachtete Abnahme der volumetrischen Dichte und der Oberflächendichte ab dem 50. Lebensjahr stimmt weitgehend mit den bisherigen Ergebnissen über die altersabhängige physiologische

Dichteminderung des spongiösen Knochens überein (Burkhardt, 1955; Derlath, 1958; Frost, 1963; Bromley et al., 1966; Dunnill et al., 1967; Olah und Schenk, 1969; Vitalli, 1969; Merz und Schenk, 1970; Meunier et al., 1973; Delling, 1974; Pesch et al., 1977). Die gleichsinnige Abnahme der volumetrischen Dichte und der Oberflächendichte bewirkt während des gesamten Lebens eine Konstanz der spezifischen Oberfläche.

Darüber hinaus liegen in den einzelnen Fünfteln beider LWK für diese drei Strukturparameter prägnante, regionale Unterschiede vor. Volumetrische Dichte, Oberflächendichte und spezifische Oberfläche haben jeweils in den beiden äußeren Fünfteln ihre höchsten Werte und nehmen zur Mitte hin stufenförmig ab, so daß ein typisches treppenförmiges Verteilungsmuster entsteht. Diesen regionalen Unterschieden entspricht morphologisch eine in den deck- und grundplattennahen Abschnitten relativ dichte, vielfältig verzweigte Spongiosa mit relativ kleinem mittlerem Bälkchendurchmesser. Zur Mitte hin verringern sich Dichte und Grad der Verzweigung bei wachsendem mittlerem Bälkchendurchmesser, bis schließlich im inneren Fünftel nur noch wenige relativ dicke Bälkchen vorhanden sind.

Diese primäre, zentrale Dichteminderung wurde bereits von Junghanns (1939) und später von Dietrich (1956), Schlüter (1965), Arnold et al. (1966), Atkinson (1967), Amstutz und Sissons (1969) beschrieben und von Rassow (1976) densitometrisch gemessen. Ihre Ursache wird in der embryonal angelegten, von blutgefäßhaltigen Hohlräumen geprägten Struktur der Mittelzone gesehen (Junghanns, 1939; Dietrich, 1956). Dabei bleibt unberücksichtigt, daß sich der embryonale Faserknochen zwar an der Gefäßordnung orientiert, aber im allgemeinen nur kurzlebig ist und bald durch lamellären Knochen ersetzt wird (Putschar, 1963). Dieser wird in seinem Aufbau von den einwirkenden Kräften geprägt (Knese, 1958; Kummer, 1962; Pauwels, 1965).

Die Wirbelkörper des Menschen sind durch den aufrechten Gang ganz überwiegend auf Druck belastet, wobei die Kraftübertragung unter Zwischenschaltung der druckelastischen Bandscheiben in Form einer Flächenpressung erfolgt. Bei gleicher Größe der Wirbelkörper ist die Druckbelastbarkeit der Deck- bzw. Grundplatte von deren Dicke, von der Anzahl ihrer Auflagepunkte und von der zwischen zwei senkrechten Bälkchen liegenden freien Länge bzw. Fläche abhängig. Bei den prinzipiell dünnen Wirbelkörperendplatten (Schmorl und Junghanns, 1968) ist deshalb in den äußeren Fünfteln eine hohe Spongiosadichte mit kurzen, freien Längen notwendig, um nicht unter der einwirkenden Druckbelastung zu brechen.

Als weitere Sicherungsstrukturen findet sich in den äußeren Fünfteln eine große Anzahl von Querverstrebnungen. Einerseits dienen diese als Führung für die gerade in den äußeren Fünfteln relativ dünnen vertikalen Bälkchen und schützen sie vor der ungünstigen Knickbelastung (Bell et al., 1960; Hinz, 1971). Andererseits wirken sie der Dichtung, d.h. dem Bestreben eines auf Druck belasteten Körpers, nicht nur seine Höhe zu verringern, sondern auch seine Breite zu vergrößern (Meyer zur Capellen, 1974), entgegen, indem sie die senkrecht zum Druck entstehende Querkraft aufnehmen. Dieser rein mechanische Aufbau erfährt eine weitere Verstärkung durch die zwischen den Bälkchen liegenden, flüssigkeitshaltigen Markzellen. Diese bestehen zum größten Teil aus Wasser und sind – im Gegensatz zur Luft – in der Lage, Kräfte aufzunehmen und in alle Richtungen gleichmäßig wieder abzugeben.

Die von den Spongiosabälkchen aufgenommene Druckbelastung wird teils durch schräg verlaufende Trabekelzüge an die seitlichen Wände des Wirbelkörpers weitergegeben, teils von den sich zur Mitte hin fortsetzenden Bälkchen übernommen. Die in diesen Bälkchen wirkende Spannung wird mit zunehmender Entfernung von den Deckplatten mehr und mehr auf die intra- und extrazelluläre Flüssigkeit des Markraumes übertragen. Damit liegt im gesamten Wirbelkörper das gleiche Bauprinzip vor, wie es für die einzelnen Osteone beschrieben ist, die als flüssigkeitsgefüllte Rohre anzusehen sind (Knese, 1958). Ähnlich diesen wird beim Wirbelkörper die Festigkeit durch Vorspannkräfte gesteigert, die mittels der konkav gekrümmten Seitenwände dem inneren hydrostatischen Druck entgegenwirken.

Die senkrecht von den Deckplatten ins innere Fünftel gelangenden Druckspannungen werden von relativ wenigen dicken Bälkchen aufgenommen, bei denen auf Grund ihres größeren Durchmessers auch die Gefahr eines Ausknickens geringer ist. Dementsprechend sind weniger Führungspunkte und Querverstreibungen notwendig, noch zumal gleichzeitig auch die Querkraft im inneren Fünftel ihr Minimum erreicht (Schlüter, 1965).

In diesem in sich abgeschlossenen Verbundsystem aus Spongiosa und Corticalis einerseits und zellgebundener Flüssigkeit des Markraums andererseits zeigt auch der ab dem 50. Lebensjahr einsetzende Knochenabbau regionale Unterschiede. Volumetrische Dichte und Oberflächendichte nehmen in den äußeren und mittleren Fünfteln gleichsinnig und deutlich mehr ab als im inneren Fünftel, während die spezifische Oberfläche in allen Fünfteln konstant bleibt.

Ursache dieser regionalen Unterschiede muß bei dem funktionsorientierten und belastungsabhängigen Aufbau der Spongiosa eine geringere Gesamtbeanspruchung sein, die primär zu dem Verlust der kleineren, außerhalb der Druck- und Zuglinien liegenden, querverlaufenden Bälkchen (Thiemann, 1966; Uehlinger, 1973, 1974) führt. Die hierdurch bedingte, vermehrte Belastung der senkrecht angeordneten Spongiosa wird durch eine kompensatorische Hypertrophie (Schenk und Merz, 1969; Merz und Schenk, 1970; Vitalli, 1970; Dambacher et al., 1971; Uehlinger, 1974; Dellinger, 1974 und 1975) aufgefangen. So bleibt auch der Schlankheitsgrad der Bälkchen, d.h. das Verhältnis ihrer freien Knicklänge zur Querschnittsfläche, unverändert und die für sie kritische Knickspannung wird nicht erreicht. Aufgrund der in den einzelnen Fünfteln unterschiedlichen qualitativen und quantitativen Spongiosaverteilung ist der abbaubedingte Verlust an den in den äußeren und mittleren Fünfteln zahlreicheren Querverstreibungen höher und damit notwendigerweise auch die kompensatorische Hypertrophie stärker als in den inneren Fünfteln.

Während in der im Alter gelichteten Gesamtstruktur des Wirbels inneres und mittleres Fünftel keine signifikanten Dichteunterschiede mehr zeigen, weisen die äußeren Fünftel eine vergleichsweise dichte und verzweigte Spongiosastruktur auf. Diese nahe den Deck- und Grundplatten höhere Dichte stellt die funktionelle Notwendigkeit dar, auch im Alter die Kontinuität der Endplatten zu erhalten. Dabei darf wegen der auftretenden Biegespannungen der Abstand zwischen zwei Bälkchen einen bestimmten kritischen Betrag nicht überschreiten, da bei zu kleiner Bälkchenzahl ein Deckplatteneinbruch droht.

Trotz dieses erheblichen inneren Strukturumbaus bleibt die äußere Form weitgehend konstant. Minimale bzw. maximale Höhen und die Differenz der

Höhen beider LWK zeigen keine altersabhängigen Veränderungen. Dieses Ergebnis entspricht dem von Barnett und Nordin (1960) beschriebenen Wirbelsäulenindex, der ebenfalls keine signifikante Abhängigkeit vom Lebensalter aufweist. Deckplatteneinbrüche und Fischwirbelbildung sind eindeutig über den physiologischen Altersabbau hinausgehende, pathologische Veränderungen.

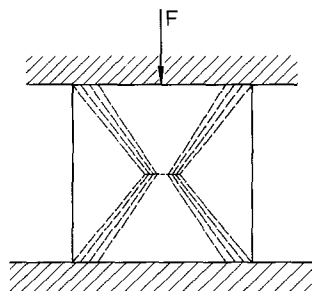
Die unterschiedliche Breite des 3. und 5. LWK beruht auf der von cranial nach caudal ansteigenden Belastung der Wirbelsäule und der entsprechenden Zunahme des Wirbelkörperdurchmessers (Braus, 1921; Benninghoff, 1954; Schmorl und Junghanns, 1968). Durch die gleichzeitige Volumenvermehrung kommt es zu einer Vergrößerung des tragenden, spongiösen Querschnitts.

Die schon in den jüngsten Altersklassen feststellbare Differenz der Breiten jedes LWK entsteht durch die konkave Einziehung der Seitenflächen des Wirbelkörpers. Diese Form erweist sich analog den aus der Technik bekannten Stau-mauern als besonders günstig für die hydraulische Druckbelastung und kann zusätzlich die Vorspannkräfte aufnehmen. Unter Berücksichtigung des Verlaufs der Querkraft (Schlüter, 1965) und des aus werkstoffkundlichen Druckversuchen bekannten Bruchverhaltens (Sigwart, 1974) läßt sich die Wirbelkörperform mit zwei sich aufeinander abstützenden Druckkegeln¹ vergleichen.

Demzufolge entspräche das durch die zentrale Einziehung ausgesparte Material jenem Anteil des Körpers, der bei einer kritischen Druckbelastung als erster herausgesprengt würde.

Die mit fortschreitendem Lebensalter feststellbare Zunahme der Differenz der Breiten ist durch ein kontinuierliches Anwachsen der maximalen Breite bei konstanter minimaler Breite bedingt. Dieser Knochenanbau steht in keiner Beziehung zur gleichzeitigen Abnahme der volumetrischen Dichte bzw. Oberflächendichte und muß deshalb als eigenständiger Vorgang aufgefaßt werden. Diese als Spondylosis deformans bekannte Randwulstbildung der Wirbelkörper ist häufig schon in jungen Jahren festzustellen (Schmorl und Junghanns, 1968), ohne daß daraus klinische Beschwerden resultieren müssen. Ursache sind altersabhängige Veränderungen des Anulus fibrosus. Durch den Ausdehnungsdruck des Nucleus pulposus und einer Instabilität im Bewegungssegment der Wirbelsäule kommt es zu einer vermehrten Zugbelastung des vorderen Längsbandes (Schmorl und Junghanns, 1968; Pliess, 1974). Da jede erhöhte Dehnungsbeanspruchung eine Ossifikation einleiten kann (Pauwels, 1965), tritt an den

¹ Druckkegelbildung in einem flächig belasteten Zylinder (Sigwart, 1974): Erreicht der Druck F seinen kritischen Wert, so kommt es zum Abscheren der außerhalb des Druckkegels liegenden Anteile der Zylinder



Ansatzstellen des vorderen Längsbandes und seiner seitlichen rudimentären Äquivalente (Pliess, 1974) eine Verknöcherung ein, die bis zur Spangenbildung fortschreiten kann. Dieser durch die Zunahme der maximalen Breite bedingte Formwandel der LWK beeinträchtigt die dynamische Funktion des Bewegungssegments, während die statischen Funktionen der Wirbelsäule unbeeinflusst bleiben.

Dieser Struktur- und Formwandel spielt sich in allen Wirbelkörpern gleichsinnig ab, so daß Rückschlüsse über ihren Aufbau untereinander möglich sind (Pesch et al., 1979).

Die *Strukturanalyse* der Wirbelkörper hat innerhalb der einzelnen Fünftel einen quantitativ und qualitativ unterschiedlichen Abbau der Spongiosa verdeutlicht. Als Ursache dieses altersabhängigen Dichteverlustes wird von Schenk und Merz (1969), Dellling (1974) und Jesserer (1975) eine Osteoblasteninsuffizienz mit verminderter Matrixsynthese angenommen.

Die *Formanalyse* hat dagegen eine Knochenneubildung im endplattennahen Bereich der LWK ergeben, die der Zunahme der maximalen Breite entspricht. Dieser scheinbare Widerspruch der gleichzeitigen Osteoblasteninsuffizienz einerseits und der gesteigerten Tätigkeit der Osteoblasten andererseits löst sich mühelos unter Berücksichtigung der reaktiven Plastizität des Knochengewebes (Pliess, 1969) und der funktionellen Einheit von Knochen und Skelettmuskulatur. Auf Grund der mit dem Alter abnehmenden körperlichen Belastung des Skelettsystems fehlt den Spongiosabälkchen der für die bisherige Struktur adäquate Erhaltungszreiz, so daß sie den jetzt aktuellen, *altersgemäßen Erfordernissen* physiologisch angepaßt werden. Auch diese Altersveränderungen sind als humanspezifisch (Doerr, 1975) anzusehen und finden sich in ähnlicher Weise in allen anderen Skeletabschnitten (Pesch et al., 1979). Störungen dieses funktionsorientierten natürlichen Verbundbaues sind einerseits vor allem bei unphysiologischen Belastungen, andererseits bei übergeordneten, primär belastungsunabhängigen Einflüssen (wie z. B. entzündlichen, endokrinologischen Erkrankungen etc.) zu erwarten.

Literatur

- Amstutz, H.C., Sissons, H.A.: The structure of the vertebral spongiosa. J. Bone Joint Surg. **51B**, 540–550 (1969)
- Arnold, J.S., Bartley, M.H., Tont, S.A., Jenkins, D.P.: Skeletal changes in aging and disease. Clin. Orthop. **49**, 17–38 (1966)
- Atkinson, P.J.: Variation in trabecular structure of vertebrae with age. Calc. Tiss. Res. **1**, 24–32 (1967)
- Barnett, E., Nordin, B.E.C.: The radiological diagnosis of osteoporosis. A new approach. Clin. Radiol. **11**, 166–174 (1960)
- Bell, G.H., Dunbar, O., Beck, J.S.: Variations in strength of vertebrae with age and their relation to osteoporosis. Calc. Tiss. Res. **1**, 75–86 (1967)
- Benninghoff, A.: Lehrbuch der Anatomie des Menschen. Bd. I. Berlin, München: Urban und Schwarzenberg 1954
- Blaschke, R.: Indirekte Volumen-, Oberflächen-, Größen- und Formfaktorbestimmung mittels Zählfiguren in Schnittebenen mit dem Leitz Zählkular. Leitz-Mitt. Wiss. u. Techn. **IV**: 44–49 (1967)
- Braus, H.: Anatomie des Menschen. Bd. I. Berlin: Springer 1921

- Bromley, R.G., Dockum, N.L., Arnold, J.S., Webster, S.S.: Quantitative histological study of human lumbar vertebrae. *J. Gerontol.* **21**, 537–543 (1966)
- Burkhardt, L.: Über Umbau und Strukturtypen der Wirbelkörperspongiosa als Ausdruck allgemeiner Gesetzmäßigkeiten der Knochenmodellierung. *Verh. Dtsch. Ges. Path.* **38**, 250–259 (1954)
- Burkhardt, R.: Diagnose und Therapie der Osteoporose. *Münch. med. Wochenschr.* **115**, 1915–1923 (1973)
- Dambacher, M.A., Steiger, U., Haas, H.G.: Osteoporose. Neue Aspekte der Pathophysiologie und der Therapie. *Med. Klin.* **66**, 33–39 (1971)
- Delesse, M.A.: Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. 3e éd. Paris: F. Saty 1866
- Delling, G.: Quantitative Auswertung von Skeletveränderungen bei chronischer Hämodialyse. *Verh. Dtsch. Ges. Path.* **56**, 436–438 (1972)
- Delling, G.: Altersabhängige Skeletveränderungen. Histomorphometrische Untersuchungen an der menschlichen Beckenkammspongiosa. *Klin. Wochenschr.* **52**, 318–325 (1974)
- Delling, G.: Endokrine Osteopathien. Stuttgart: Gustav Fischer 1975
- Derlath, M.: Untersuchungen über die Spongiosaarchitektur des Wirbelkörpers. *Ärztl. Forsch.* **12**, 309–318 (1958)
- Dietrich, J.: Zur Spongiosaarchitektur menschlicher Wirbelkörper. Würzburg: Inaugural-Dissertation 1956
- Doerr, W.: Das Altern in anthropologischer Sicht. *Verh. Dtsch. Ges. Path.* **59**, 260–271 (1975)
- Dunnill, M.S., Anderson, J.A., Whitehead, R.: Quantitative histological studies on age changes in bone. *J. Path. Bact.* **94**, 275–291 (1967)
- Elias, H.: Stereology. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1967
- Frost, H.M.: Bone remodelling dynamics. Springfield: Thomas 1963
- Hennig, A.: Bestimmungen der Oberfläche beliebig geformter Körper. *Mikrosk.* **11**, 1–20 (1956)
- Hennig, A.: Kritische Betrachtungen zur Volumen- und Oberflächenmessung in der Mikroskopie. *Zeiss Werkz.* **30**, 78–86 (1958)
- Hinz, P.: Die Belastungsfähigkeit der osteoporotischen Wirbelsäule. In: Funktionelle Pathologie und Klinik der Wirbelsäule. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Hackenbroch, M. (ed.), Bd. 52. Stuttgart: Hippokrates 1971
- Jesserer, H.: Osteoporose: Pathologie, Klinik und Therapie. *Therapiewoche* **29**, 3970–3978 (1975)
- Junghanns, H.: Die Pathologie der Wirbelsäule. In: Handbuch der speziellen pathologischen Anatomie und Histologie, Lubarsch, O., F. Henke (eds.), Bd. IX, 4. Teil. Berlin: Springer 1939
- Knese, K.-H.: Knochenstruktur als Verbundbau. Stuttgart: Thieme 1958
- Kuhlencordt, F., Kruse, H.-P., Lozano-Tonkin, C.: Biopische Klassifizierung der Osteoporose nach Stadium und Aktivität. *Dtsch. med. Wochenschr.* **35**, 1791–1794 (1970)
- Kummer, B.: Funktioneller Bau und funktionelle Anpassung des Knochens. *Anat. Anz.* **110**, 261 (1962)
- Merz, W.A.: Die Streckenmessung an gerichteten Strukturen im Mikroskop und ihre Anwendung zur Bestimmung von Oberflächen-Volumen-Relation im Knochengewebe. *Mikroskopie* **22**, 132–142 (1967)
- Merz, W.A., Schenk, R.K.: Quantitative structural analysis of human cancellous bone. *Acta Anat.* **75**, 54–66 (1970)
- Meunier, P., Courpron, P., Edouard, C., Bernard, J., Bringuier, J., Vignon, G.: Physiological senil involution and physiological rarefaction of bone. *Clin. Endocrinol. Metab.* **2**, 239–256 (1973)
- Meyer zur Capellen, W.: Festigkeitslehre. In: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau, Sass, F., Ch. Bouche, A. Leitner (eds), Bd. I. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1974
- Olah, A.J., Schenk, R.K.: Veränderungen des Knochenvolumens und des Knochenanbaues in menschlichen Rippen und ihre Abhängigkeit von Alter und Geschlecht. *Acta anat.* **72**, 584–602 (1969)
- Pauwels, F.: Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1965
- Pesch, H.-J., Henschke, F., Zeus, U.: Zur Methodik des Knochengroßflächenschliffes. *Verh. Dtsch. Ges. Path.* **59**, 592 (1975)
- Pesch, H.-J., Henschke, F., Seibold, H.: Einfluß von Mechanik und Alter auf den Spongiosaumbau

- in Lendenwirbelkörpern und im Schenkelhals. *Virchows Arch. A Path. Anat. und Histol.* **377**, 27–42 (1977)
- Pesch, H.-J., Kahle, M., Prestele, H., Schorn, B., Schuster, W.: Hydroxylapatitgehalt von Lendenwirbelkörpern und Schenkelhals. *Fortschr. Röntgenstr.* **130**, 491–496 (1979)
- Pliess, G.: Die reaktive Plastizität des Knochens. *Dtsch. zahnärztl. Z.* **24**, 99–109 (1969)
- Pliess, G.: Bewegungsapparat. In: *Organpathologie*, Doerr, W. (ed.), Bd. III. Stuttgart: Thieme 1974
- Putschar, W.G.J.: Allgemeine Morphologie und Dynamik des Knochenumbaus unter normalen und pathologischen Bedingungen. *Verh. Dtsch. Ges. Path.* **47**, 113–129 (1963)
- Rassow, J., Bachmann, H.J., Klaskala, I.: Messung der Knochenmineralsalzkonzentration („Hydroxylapatit-Volumenwerte“) und der Knochendichte mit einer Zweienergie-Densitometriemethode in vitro und in vivo. *Fortschr. Röntgenstr.* **125**, 317–324 (1976)
- Schenk, R.K., Merz, W.: Histologisch-morphometrische Untersuchungen über Altersatrophie und senile Osteoporose in der Spongiosa des Beckenkammes. *Dtsch. med. Wochenschr.* **94**, 206–208 (1969)
- Schlüter, K.: Form und Struktur des normalen und des pathologisch-veränderten Wirbels. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 30. Stuttgart: Hippokrates 1965
- Schmorl, G., Junghanns, H.: Die gesunde und kranke Wirbelsäule in Röntgenbild und Klinik. Stuttgart: Thieme 1968
- Serra, I.: Theoretische Grundlagen des Leitz-Textur-Analyse-Systems. *Leitz-Mitt. Wiss. u. Techn. Supp. I*, Nr. 4, 125–136 (1973)
- Sigwart, H.: Werkstoffkunde. In: *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*, Sass, F., Ch. Bouche, A. Leitner (eds.), Bd. I. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1974
- Thiemann, K.J.: Methoden zur Diagnostik der Osteoporose aus radiologischer Sicht. *Internist* **11**, 564–571 (1966)
- Töndury, G.: Entwicklungsgeschichte und Fehlbildungen der Wirbelsäule. Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. VII. Stuttgart: Hippokrates 1958
- Uehlinger, E.: Allgemeine Pathologie der Osteoporose und ihre reparativen Möglichkeiten. *Therapiewoche* **43**, 3949–3953 (1973)
- Uehlinger, E.: Pathologische Anatomie und Pathogenese der Osteoporose. *Therapiewoche* **34**, 3457–3460 (1974)
- Underwood, E.E.: *Quantitative Sterology*. Massachusetts: Addison-Wesley 1970
- Vitali, H.P.: Spezielle histologische Untersuchung bei metabolischen Osteopathien. *Habilitationschrift*, Köln 1969
- Vitali, H.P.: *Knochenerkrankungen, Histologie und Klinik*. Basel: Sandoz 1970
- Wagner, H.: *Präsenile Osteoporose*. Stuttgart: Thieme 1965

Eingegangen am 8. August 1979