

Verfahren zum Vergleich von Knochendichtemessungen an Lendenwirbeln historischer Skelette mit rezenten Normkollektiven

Micha Schwikardi, Johanna Hammerl, Joachim Happ und Reiner Protsch von Zieten

Einleitung

Osteoporose ist durch eine Verminderung der Knochenmasse und der dadurch bedingten Verschlechterung der Knochengewebsarchitektur mit entsprechend erhöhtem Frakturrisiko charakterisiert (RINGE 1991).

In der Diagnostik dieser Krankheit werden planare und computertomographische Verfahren zur Knochenmineraldichte (KMD)- Bestimmung angewandt. Am häufigsten wird heute das planare Verfahren der Röntgenosteodensitometrie (DXA, DEXA, DPX oder QDR) eingesetzt.

Das in dieser Arbeit angewandte QDR-Verfahren besitzt als Strahlungsquelle eine Röntgenröhre und hat eine hohe Bildauflösung, so daß die Umrisse der Knochenstrukturen deutlich erkennbar sind. Der Meßfehler ist dadurch relativ gering. Des weiteren weist die Methode im Vergleich zu anderen Meßverfahren die geringste Strahlenbelastung für den Patienten auf (UFFMANN 1998).

In der Osteoporose-Diagnostik wird die KMD im Bereich der Lendenwirbelsäule (LWS), des proximalen Femur und des distalen Unterarmes gemessen. Da sich der Knochenmineralverlust am frühesten im Bereich des Stammskeletts manifestiert (MÜLLER-FASSBENDER 1996), ist der KMD-Messung der Lendenwirbelsäule (LWS) eine besonders große Bedeutung zuzuschreiben. Die Untersuchung wird mit Ausnahme besonderer Fragestellungen im posterior – anteriorem (P/A) Strahlengang durchgeführt.

In Messungen an Referenzkollektiven hat sich gezeigt, daß zwischen verschiedenen ethnischen Gruppen große Unterschiede bezüglich der KMD auftreten können, die als Folge von unterschiedlichen Lebens- und Ernährungsgewohnheiten, aber auch aufgrund genetischer Faktoren auftreten können. So liegt die durchschnittliche KMD von Afrikanern und Amerikanern afrikanischer Abstammung um 10–15% über der der weißen amerikanischen Bevölkerung (COHN et al. 1977; MAYOR et al. 1978). Im Vergleich dazu ist die KMD von auf Hawaii lebenden Japanern 5–10% geringer als die des weißen amerikanischen Referenzkollektivs (YANO et al. 1984; NORAMATSU et al. 1989).

Für KMD-Messungen an historischen Skeletten fehlen Referenzkollektive. Darüberhinaus können die ohne Weichteilmantel gemessenen Werte nicht ohne weiteres mit Referenzdaten verglichen werden, die durch *in vivo*-Messungen gewonnen wurden. So gestatten Messungen von LWK historischer Skelette in Luft lediglich eine Aussage über geschlechts- und altersbedingte Unterschiede der Knochenmineraldichte. Auch können die Werte von *in vitro*-Messungen historischer Lendenwir-

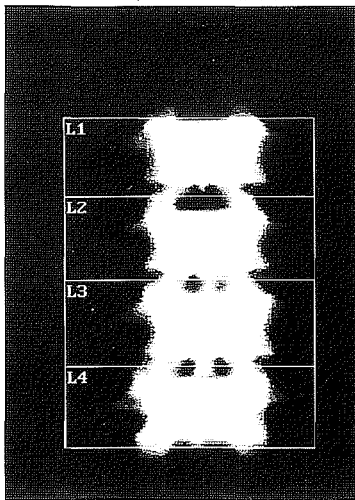
bel im Gegensatz zu Ergebnissen von *in vivo*-Messungen nicht direkt mit rezenten Normkollektiven verglichen werden, da aufgrund des meist schlechten Erhaltungszustandes der Wirbelfortsätze keine P/A-Messungen durchführbar sind. Die Wirbel sind durch postmortale Einflüsse (Lagerung; Bergung) fast immer so stark beschädigt, daß oft Teile des Processus transversus, costalis oder spinosus fehlen. So können nur laterale Messungen von Wirbelkörpern, bei denen der Erhaltungszustand der Wirbelfortsätze keine Rolle spielt, durchgeführt werden. In dieser Arbeit wurde unter Berücksichtigung der geometrischen Konstitution der Lendenwirbel L1-L4 ein Weg gesucht, um die von Lateralmessungen an LWK gewonnenen KMD-Werte in Werte, wie sie bei P/A-Messungen zu erwarten wären, umrechnen zu können.

Material und Methoden

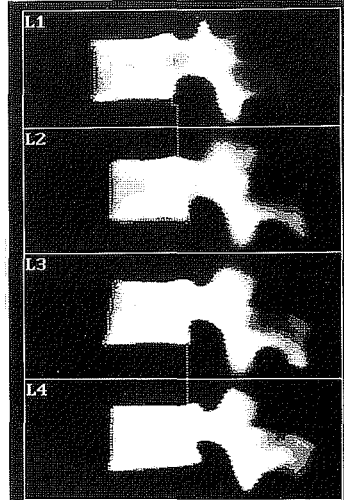
Lendenwirbel einer merowingischen Population (HAMMERL 1999) wurden mit dem Röntgendensitometer QDR-1000 der Firma HOLOGIC gemessen, wobei die Knochenproben auf einer 10 cm starken Schaumstoffunterlage fixiert waren. In vorher durchgeführten Testmessungen konnte ein Einfluß des Schaumstoffmaterials sowie des Abstandes der Probe vom Untersuchungstisch (bis zu 20 cm) auf die Meßresultate ausgeschlossen werden.

Um eine einfache mathematische Formel aufzustellen, mit der die KMD lateral gemessener Wirbelkörper unter Vernachlässigung des Weichteilmantels in Werte für P/A-Messungen umgerechnet werden können, wurden innerhalb von für einzelne LWK (L1-L4) definierten Meßregionen bzw. regions of interest (ROI) Messungen des Mineralgehalts (KMG) vollständig erhaltener Lendenwirbel von frontal und lateral (Abb. 1) durchgeführt. Außerdem wurden P/A-Messungen von Patienten hinzugezogen. Um die verschiedenen Verhältnisse bzgl. KMD, KMG und der gemessenen Wirbelkörperaufsichtsflächen in den einzelnen Projektionen zu ermitteln, wurden die Meßregionen unterschiedlich angesetzt. Durch Bestimmung der Aufsichtsflächen (area) der LWK konnte die KMD in g/cm² errechnet werden. Zur Umrechnung der Werte von Lateralmessungen in Werte, wie sie für P/A-Messungen gültig wären, wurden für die Wirbel L1-L4 folgende Parameter ermittelt:

- das Verhältnis zwischen gemessener Lateralfäche und Frontalfäche
- das Verhältnis zwischen lateral und P/A gemessenem KMG des Wirbels



·08.Jan.1998 10:13 [97 x 127]
Hologic QDR-1000 (S/N 000)
Lumbar Spine U4.47



·09.Jan.1998 14:48 [122 x 188]
Hologic QDR-1000 (S/N 000)
Lumbar Spine U4.47

Abb. 1: Messungen des Knochenmineralgehaltes (KMG) in g und der Knochenmineraldichte (KMD) in g/cm² von historischen Lendenwirbeln *in vitro*. Links ist der Scan einer KMD-Messung einer Lendenwirbelsäule (L1-L4) unter *in vivo*-Bedingungen in der P/A-Projektion dargestellt. Die Meßregion (weiße gestrichele Linie) verläuft an den lateralen Begrenzungen der LWK, unter Ausgrenzung der Processus costales. Rechts wurden dieselben LWK in der lateralen Projektion gemessen. Die Meßregion umfaßt lediglich den gut erhaltenen Bereich der LWK, unter Ausschluß der Wirbelbögen.

Um das Verhältnis der gemessenen Lateralfächen der LWK (L1-L4) zu den frontalen Aufsichtsfächen der gleichen Wirbel zu bestimmen, wurden zunächst jeweils 12 LWK von lateral und in der P/A-Projektion gemessen. Weiterhin wurde der Anteil der Zwischenwirbelräume an der Gesamtmeßregion von P/A-Messungen bestimmt, da diese Fläche bei den Lateralmessungen der LWK nicht berücksichtigt wurde, doch bei P/A-Messungen in den üblichen Auswerteprogrammen der Wirbelkörperaufsichtsfäche zugeschlagen wird. Hierzu wurde die Region L1-L4 von 5 Patienten verschiedener Altersstufen (3 weibl.; 2 männl.) P/A gemessen, und der Zwischenwirbelraum durch unterschiedliches Setzen der ROI ermittelt. Auf diese Weise läßt sich ein Umrechnungsfaktor zur Bestimmung der frontalen Aufsichtsfäche der LWK, ausgehend von lateralen Messungen, gewinnen.

Um aus lateral gemessenen KMD-Werten die KMD errechnen zu können, wie sie bei P/A-Messungen bestimmt worden wäre, ist zu berücksichtigen, daß bei P/A-Messungen die Wirbelfortsätze miterfaßt werden.

So wurde zunächst der prozentuale KMG-Anteil der Wirbelkörper am Gesamt-KMG der Lendenwirbel L1-L4 ermittelt. Dazu wurden Lateralmessungen von Lendenwirbeln merowingischer Skelette (L1, n = 12; L2-4, n = 14) verschiedenen Alters und Geschlechts, sowohl mit Einschluß als auch unter Ausschluß der Wirbelbögen in die Meßregion durchgeführt. Da die Processus costales *in vivo* außerhalb der Meßregion liegen, wurde auch der Anteil des KMG der Processus costales am Gesamt-KMG der Lendenwirbel L1-L4 bestimmt. Hierzu wurden die Lendenwirbel (L1, n = 7; L2, n = 3; L3, n = 6; L4, n = 6) in der P/A-Projektion, sowohl mit Ein- als auch unter Ausgrenzung der Processus costales gemessen.

Bei Knochendichtemessungen an Patienten wird das Meßergebnis um den Einfluß des, den Knochen umgebenden, Weichteilmantels korrigiert. Ein solcher Weichteilfaktor fehlt bei der KMD-Messung frühmittelalterli-

cher Knochen. Da die Hauptkomponenten des Weichteilmantels Wasser und Fett sind, wurde zur Abschätzung des Weichteilfaktors bei *in vivo*-Messungen ein gut erhaltener Lendenwirbel (L2) jeweils dreimal in den Medien Luft, Wasser (13cm Schichtdicke) und Speiseöl (13cm Schichtdicke) unter ansonsten gleichen Voraussetzungen gemessen.

Ergebnisse

Die Untersuchung der Beziehung zwischen den frontalen und lateralen Wirbelkörperaufsichtsfächen der LWK 1-4 ergab eine Zunahme des Quotienten in craniocaudaler Richtung. Er beträgt bei LWK1 1,25, bei LWK2 1,3, bei LWK3 1,4 und bei LWK4 1,5 (Abb. 2).

Bei Messungen von fünf Patienten verschiedener Alters und Geschlechts betrug die Aufsichtsfäche der Zwischenwirbelräume L1/2, L2/3, L3/4 und L4/5 jeweils ca. 20% der P/A-Gesamtaufsichtsfäche eines Wirbels. Damit entspricht die Dicke des Bandscheibenapparates im Bereich der LWS in etwa 1/4 der der LWK. Zwischen den verschiedenen Altersstufen bzw. Geschlechtern der Patienten traten keine signifikanten Differenzen auf.

Laterale KMG-Messungen von 26 gut erhaltenen Lendenwirbeln männlicher und weiblicher merowingischer Individuen verschiedener Altersstufen ergaben, daß der Anteil der Wirbelkörper am Gesamt-KMG der Lendenwirbel L1-L4 jeweils 50% ± 2% beträgt. Alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede waren nicht zu beobachten.

In P/A-Messungen zeigte sich, daß der KMG der Lendenwirbel L1-L4 ohne Berücksichtigung der Processus costales um 10% geringer gegenüber dem Gesamt-KMG der Wirbel ist, wobei sich zwischen den einzelnen Wirbeln in den verschiedenen Altersstufen bzw. Geschlechtern keine signifikanten Unterschiede offenbarten.

Bei KMD-Messungen eines Lendenwirbels L2 in den

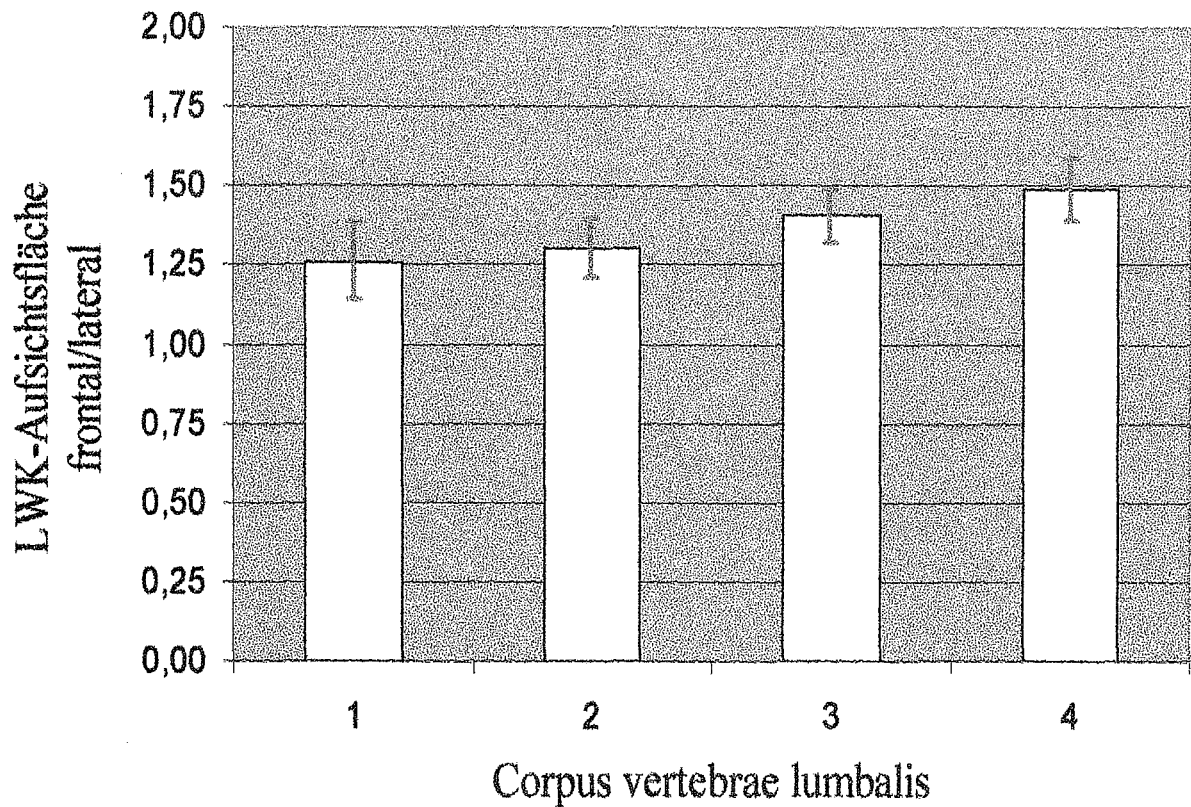


Abb. 2: Verhältnis der frontalen zur lateralen Aufsichtsfläche der Lendenwirbelkörper L1-L4; Zunahme in craniocaudaler Richtung.

Medien Luft, Wasser und Öl (jeweils 3-fach), ergab sich ein unterschiedlicher Einfluß dieser Medien auf das Meßergebnis (Abb. 3).
Gegenüber der üblicherweise durchgeführten Messung

in Luft lag das Meßergebnis bei Messungen in Wasser im Mittel um 5% niedriger, in Öl hingegen lag der KMD-Wert im Mittel 15% über dem Ergebnis der Luftmessung, bei einer jeweiligen Schichthöhe von 13 cm. Die

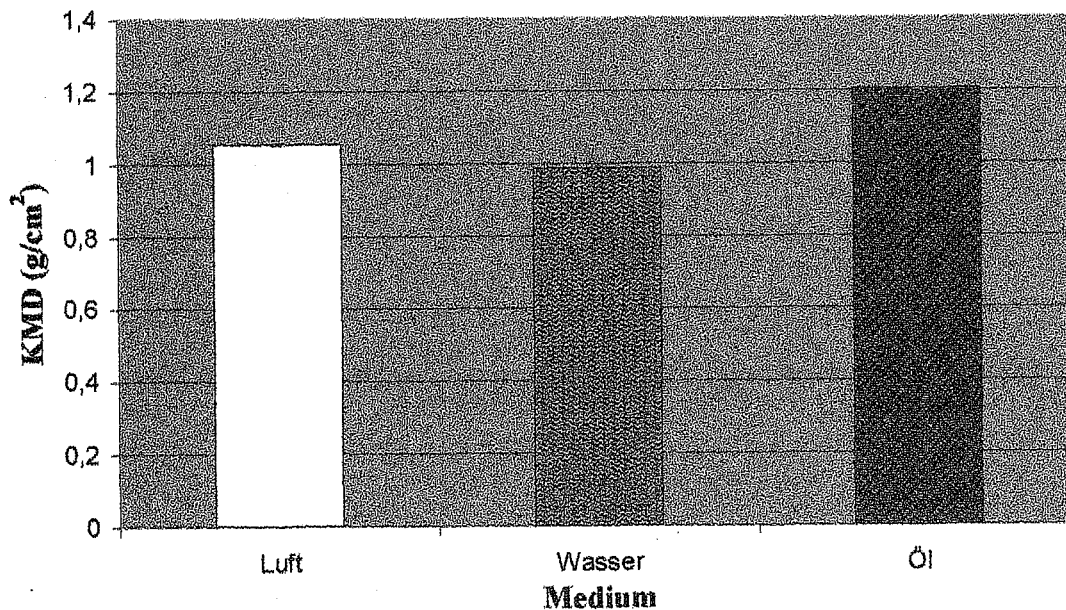


Abb. 3: Einfluß der den Knochen umgebenden Medien auf die Messung der Knochenmineraldichte. P/A-Messung der KMD eines Lendenwirbels (L2) in den umgebenden Medien Luft, Wasser (13cm Schichtdicke) und Speiseöl (13cm Schichtdicke), mit einfacher Standardabweichung ($x + 1$).

maximale Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert betrug in jeder Meßreihe mehr als 1%.

Diskussion

Zielsetzung der Untersuchung war es, die lateral gemessenen KMD-Werte von merowingischen LWK unter Berücksichtigung der anatomischen Verhältnisse in Werte umzurechnen, wie sie bei P/A-Messungen *in vivo* gewonnen worden wären. Die laterale bzw. frontale Aufsichtfläche ergibt sich grob gesehen aus Höhe (H) × Sagittaldurchmesser (S) bzw. Höhe × Querdurchmesser (Q) des Wirbelkörpers. Da die Höhe in beiden Fällen in etwa konstant ist, kann das Verhältnis frontale Fläche zu lateraler Fläche als Q/S-Index bezeichnet werden. In craniocaudaler Richtung nahm das Verhältnis der frontalen zur lateralen Aufsichtfläche zu (Abb. 2), was einer von cranial nach caudal zunehmenden Breite der LWK entspricht, d.h. einer Zunahme des Q/S-Index. Die Dicke des Bandscheibenapparates beträgt den vorliegenden Untersuchungsergebnissen zufolge im Bereich der LWS ca. 1/5 der Gesamthöhe der LWS.

Bei Umrechnung der lateralen Meßflächen auf diejenigen, die bei P/A-Messungen gelten würden, muß der Wert der lateral gemessenen Fläche, je nach Wirbel, mit den folgenden Faktoren multipliziert werden.

- L1: Fläche_(lateral) x 1,25 x 1,2 = Fläche_(frontal)
- L2: Fläche_(lateral) x 1,3 x 1,2 = Fläche_(frontal)
- L3: Fläche_(lateral) x 1,4 x 1,2 = Fläche_(frontal)
- L4: Fläche_(lateral) x 1,5 x 1,2 = Fläche_(frontal)

Bei der Untersuchung des Knochenmineralgehaltes der Lendenwirbel zeigte sich, daß der prozentuale Anteil der Wirbelkörper am Gesamt-KMG ca. 50% beträgt. SEEMAN et al. (1995) fanden mit DXA ähnliche Werte für den L2 von Frauen, *in vivo* und *in vitro*.

Der prozentuale Anteil der Processus costales am Gesamt-KMG beträgt bei P/A-Messungen *in vitro* ca. 10%. Zur Berechnung des Knochenmineralgehaltes der Lendenwirbel L1-L4, für P/A-Projektionen, muß der lateral gemessene KMG-Wert des Wirbelkörpers mit den folgenden Faktoren multipliziert werden:

$$\text{KMG}_{(\text{lateral})} \times 2 \times 0,9 = \text{KMG}_{(\text{frontal})}$$

Bei *in vivo*-Messungen macht der Querfortsatz nur 3–5% des KMG des Wirbels aus. Als mögliche Ursache dafür kommt in erster Linie eine Unterschätzung der Querfortsatzaufsichtfläche durch das Konturfundungsprogramm der EDV-gestützten Auswertung in Betracht.

Die Umrechnung einer lateral gemessenen KMD eines Lendenwirbelkörpers in die entsprechende KMD des Wirbels für P/A-Messungen kann also mit Hilfe der folgenden Formel durchgeführt werden:

$$\frac{\text{KMG}_{(\text{lateral})} \times 1,8}{\text{Fläche}_{(\text{lateral})} \times X_{(\text{L1;L2;L3;L4})}} = \text{KMD}_{(\text{frontal})}$$

mit

- X_{L1} = 1,5
- X_{L2} = 1,56
- X_{L3} = 1,68
- X_{L4} = 1,8

Nach Umrechnung der lateral gemessenen Werte eines merowingischen Skelettkollektivs (HAMMERL et al. 1999) mit der oben aufgeführten Formel zeigt sich, daß die errechneten KMD-Werte tendenziell den gemessenen Werten entsprechen, jedoch insgesamt um ca. 10–20% höher liegen (Abb. 4a u. b).

Diese Formel berücksichtigt nur geometrische Faktoren. Der Weichteilmantel der Patienten ist hier nicht berücksichtigt. Über den Einfluß der umgebenden Medien des gemessenen Knochens lassen sich keine klaren Aussagen treffen. Die den Knochen umgebenden Medien stellen den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung nach einen nicht zu vernachlässigenden Faktor dar. So erhöhte das Medium Öl den Meßwert um ca. 15% und verminderte die Messung in Wasser das Ergebnis um ca. 5%, bei jeweils 13cm Schichtdicke. Da aber der Wasseranteil im Körper ca. 50–66% beträgt und der Fettanteil ca. 10% des Körpergewichts ausmacht (THEWS et al. 1991), könnten sich die durch die Medien Wasser und Öl bedingten Abweichungen der Meßwerte *in vivo* annähernd aufheben. Auch in der klinischen Routine sind Unsicherheitsfaktoren bei der KMD-Bestimmung von seiten der Weichteile zu berücksichtigen. So können Körperfettverteilung und Ödeme, evtl. auch der Darminhalt der Patienten auch *in vivo* Meßfehler herbeiführen. Darüber hinaus hängt der Einfluß der verschiedenen Medien noch von der KMD ab (STEFAN 1996). In Anbetracht all dieser Unsicherheitsfaktoren erscheint eine Einordnung von Meßergebnissen, die an historischen Knochen gewonnen wurden, in heute gültige Normbereiche für P/A-Messungen unter Vernachlässigung der Weichteilfaktoren im Sinne einer groben Orientierung möglich.

Weitere Faktoren, die bei der Bewertung von KMD-Werten historischer Knochen berücksichtigt werden müssen, sind physikalische, chemische und biologische Dekompositionerscheinungen des Knochens. Zum Beispiel können durch Lagerung bedingte Austauschprozesse von Mineralstoffen zwischen Knochen und Umgebung, Erdeinlagerungen in die spongiöse Struktur des Knochens und pflanzliche, bakterielle und fungide Einlagerungen in den Knochen die Meßresultate verfälschen.

Beim Vergleich der errechneten KMD-Werte männlicher und weiblicher merowingischer Individuen mit Werten von knochengesunden, deutschen bzw. weißen US-amerikanischen Probandenkollektiven wird deutlich, daß die Abweichungen der KMD zwischen den Kollektiven relativ gering sind. LEHMANN et al. (1994) haben mit

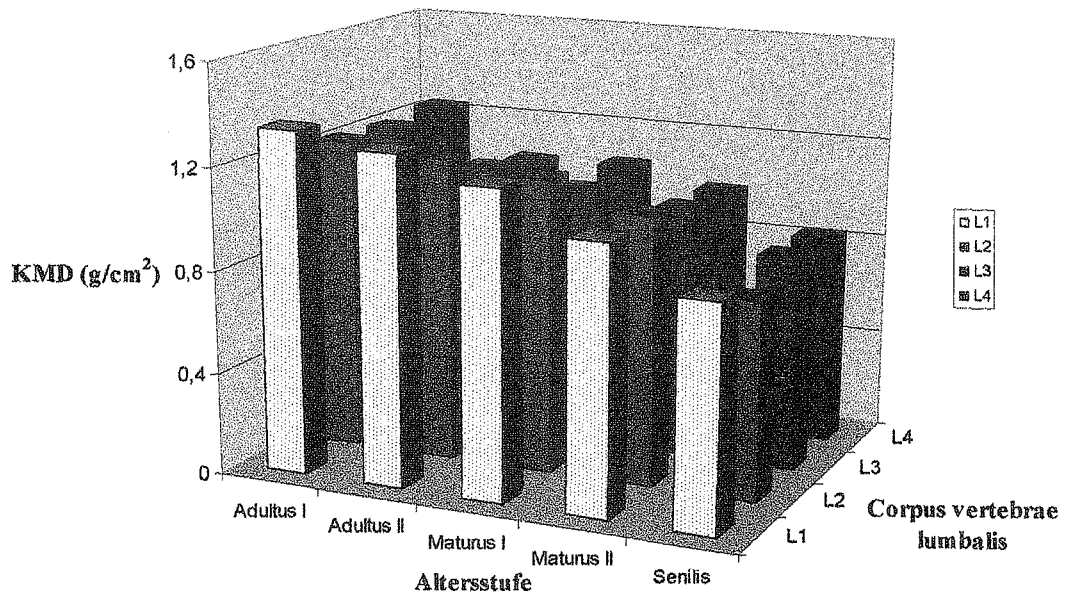


Abb. 4a: Errechnete KMD-Werte für P/A-Messungen der Lendenwirbel L1-L4 bei weiblichen merowingischen Individuen.

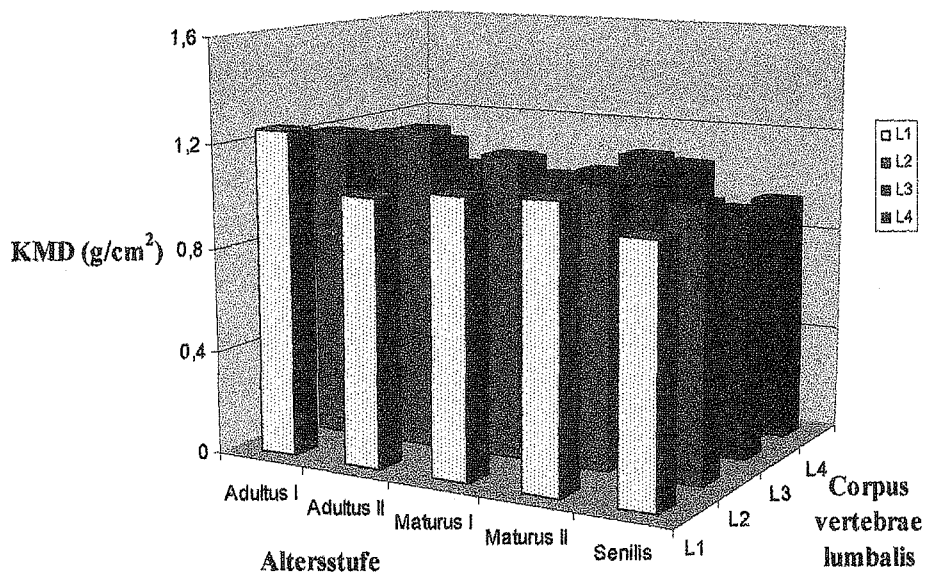


Abb. 4b: Errechnete KMD-Werte für P/A-Messungen der Lendenwirbel L1-L4 bei männlichen merowingischen Individuen.

dem Gerät QDR-1000 (Hologic) die KMD eines deutschen, knochengesunden Kollektivs gemessen. Die Werte der männlichen Probanden weisen keine großen Differenzen im Vergleich zu den errechneten KMD-Werten der männlichen merowingischen Individuen auf. Die Werte der weiblichen Individuen sind ab der Altersstufe Maturus II ebenfalls miteinander vergleichbar. Lediglich in den jüngeren Altersstufen liegt die errechnete KMD der merowingischen Individuen deutlich über der KMD der deutschen Frauen. Die Differenz beträgt ca. 15–20%. Das bedeutet, daß eine stärkere altersbedingte Abnahme der KMD merowingischer Frauen zu beobachten ist. Als

Ursache für die recht hohen KMD-Werte merowingischer Frauen im Alter von 20–50 Jahren im Vergleich zum deutschen Referenzkollektiv könnten die unterschiedlichen Lebens- und Ernährungsgewohnheiten in Betracht gezogen werden. So ist davon auszugehen, daß die körperliche Aktivität, die zu einer erhöhten KMD führt, in der heutigen Zeit stark abgenommen hat. Im Einklang hiermit wurde auch die KMD von Femora merowingischer Individuen höher als die des Referenzkollektivs weißer US-Amerikaner gefunden (HAMMERL 1990). Das von WETZEL et al. (1996) mit dem LUNAR-DPX Densitometer gemessene Kollektiv knochengesun-

der deutscher Frauen zeigte ähnliche KMD-Werte und entsprach den von der Herstellerfirma anhand eines weißen, nordamerikanischen Referenzkollektivs erhobenen Daten. Insgesamt unterscheidet sich die errechnete KMD des merowingischen Skelettkollektivs also nur bei adulten und frühmaturen weiblichen Individuen von der von rezenten deutschen und weißen nordamerikanischen Populationen.

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. Dr. Reiner Protsch von Zieten, Dr. Johanna Hammerl

Institut der Anthropologie und Humangenetik
Johann Wolfgang Goethe-Universität
Siesmayerstraße 70
D-60323 Frankfurt/Main

Micha Schwikardi
Fichtenstraße 21
D-58332 Schwelm

Prof. Dr. med. Joachim Happ
Düsseldorfer Straße 1
D-60329 Frankfurt/Main

Literatur

- COHN, S. H., C. ABESAMIS, S. YASUMURA, J. F. ALOIA, I. ZANZI & K. J. ELLIS (1977): Comparative Skeletal Mass and Radial Bone Mineral Content in Black and White Women. *Journal of Metabolism* 26, No.2, 171–178.
- DANIELIS, B. (1997): Die Bedeutung des ersten Lendenwirbelkörpers im Vergleich zu anderen Meßorten bei der Planaren Röntgen-Osteodensitometrie. Dissertation im FB Medizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- HAMMERL, J., M. SCHWIKARDI, J. HAPP & R. PROTSCH VON ZIETEN (1999): Knochenmineraldichte von Lendenwirbeln historischer Skelette. In: M. KOKABI & E. MAY (Hrsg.): Beiträge zur Archäozoologie und Prähistorischen Anthropologie 2, 186–188.
- HAMMERL, J. (1990): Bestimmung der Knochendichte durch quantitative digitale Radiographie (QDR) am Femurhals bei einer merowingischen Population aus Bockenheim/Landkreis Bad Dürkheim. Dissertation im FB Biologie der J. W. Goethe-Universität, Frankfurt/Main.
- LASKEY, M. A., A. J. CRISP, T. J. COLE & J. E. COMPSTON (1992): Comparison of the effect of different reference data on Lunar DPX and Hologic QDR-1000 dual-energy-X-ray absorptiometers. *Brit. J. of Radiology* 65, 1124–1129.
- LEHMANN R., M. WAPNIARZ, O. RANDEATH, H. M. KVASNICKA, W. JOHN, M. REINCKE, S. KUTNAR, K. KLEIN & B. ALLOLIO (1995): Dual-Energy X-Ray Absorptiometry at the Lumbar Spine in German Men and Women: A Cross-Sectional Study. *Calcif Tissue Int.* 56, 350–354.
- MÜLLER-FASSBENDER, H. (1996): Konventionelle bildgebende Verfahren in der Diagnostik der Osteoporose. In: H. BRÖLL & M. A. DAMBACHER (Hrsg.): Osteoporose. Pathogenese, Diagnostik und Therapiekonzepte. Karger Verlag Basel, 86–109.
- RINGE, J. D.: Osteoporose. In: J. D. RINGE (Hrsg.): Pathogenese, Diagnostik und Therapiemöglichkeiten. Walter de Gruyter Verlag Berlin/New York, 1991.
- SEEMAN, E., C. FORMICA & L. MOSEKILDE (1995): Equivalent Deficits in Bone Mass of the Vertebral Body and Posterior Processes in Women with Vertebral Fractures: Implications Regarding the Pathogenesis of Spinal Osteoporosis. *Journal of Bone and Mineral Research* 10, No.12, 2005–2010.
- STEPHAN-SEFTER, Ch., (1996): Untersuchungen zum Einsatz der Osteodensitometrie mittels quantitativer digitaler Radiographie für die Verlaufskontrolle von zementfreien Hüftendoprothesen. Diss. FB Medizin d. Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- THEWS, G., E. MUTSCHLER & F. VAUPEL (1991): Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen. Wiss. Verlagsgesellschaft. Stuttgart.
- UFFMANN, M., T. P. FUERST, M. JERGAS & H. K. GENANT (1998): Noninvasive Assessment of Bone. *Metabolic Bone Disease*, Chapter 9, Academic Press.
- WETZEL R., S. PFANDL, R. BODENBURG & W. PUHL (1996): Knochendichte – Referenzwerte von deutschen Frauen – Untersuchung der LWS mit dem Lunar DPX-Densitometer. *Osteologie* Bd. 5, Heft 2, 71–81.