

Histomorphometrische Untersuchungen zur Osteoporoseprädisposition in frühmittelalterlichen Bevölkerungen

Thomas Beilner



**Beiträge zur Paläopathologie
Band V**

Herausgegeben von M. Schultz

Cuvillier Verlag • Göttingen

Beiträge zur Paläopathologie

Band V

Beiträge zur Paläopathologie

Herausgegeben von Michael Schultz
Georg-August-Universität Göttingen

- | | |
|----------|--|
| Band I | Ätiologie und Epidemiologie von Erkrankungen des Kindesalters bei der bajuwarischen Population von Straubing (Niederbayern)
Kerstin Kreutz |
| Band II | Ätiologie und Epidemiologie von Erkrankungen des Kindesalters bei der bajuwarischen Population von Straubing (Niederbayern) – Katalog
Kerstin Kreutz |
| Band III | Ergebnisse makro- und mikroskopischer Untersuchungen an den römischen Brandgräbern von Rheinzabern (Rheinland-Pfalz)
Michael Wolf |
| Band IV | Kindersterblichkeit im frühen Mittelalter – Morphologische und paläopathologische Ergebnisse an der Skeletserie von Altenerding, Ldkr. Erding, Bayern
Albert Zink |
| Band V | Histomorphometrische Untersuchungen zur Osteoporoseprädisposition in frühmittelalterlichen Bevölkerungen
Thomas Beilner |

Der Autor

Dr.rer.nat. Thomas Beilner, geboren in München 1970, studierte von 1990-1996 Biologie und Chemie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. In dieser Zeit untersuchte er Spuren von Grabraub an bodengelagertem Skeletmaterial. Nach dem Abschluss des Studiums mit Staatsexamen in den Fächern Biologie und Chemie 1996 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anthropologie und Humangenetik der Ludwig-Maximilians-Universität München, wo er auch 2000 promovierte. Das Promotionsvorhaben wurde durch ein Stipendium der Universität München gefördert. Seine Tätigkeit als Studienreferendar für die Fächer Biologie und Chemie führte ihn seit 2000 an das Gisela-Gymnasium München, das Frobenius-Gymnasium Hammelburg und das Gymnasium Erding. Seit 1990 arbeitet er ehrenamtlich für den Arbeitskreis für Erdstallforschung Roding an der Lokalisation, Ausgrabung und Dokumentation von Erdstallanlagen. Publikationen auf den Gebieten Dekompositionsforschung, Paläopathologie, Epidemiologie, prähistorische Anthropologie und Erdstallforschung.

Der Herausgeber

Professor Dr.med. Dr.phil.nat. Michael Schultz studierte Medizin, Anthropologie, Mikrobiologie, Vor- und Frühgeschichte und Ethnologie an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt am Main. Nach dem Diplom in Biologie 1972 und dem medizinischen Staatsexamen 1973 wurde er 1977 in Medizin und 1979 in Biologie promoviert. Er habilitierte sich 1988 für das Fach Anatomie. Von 1974 bis 1979 wissenschaftlicher Assistent am Zentrum Anatomie der Georg-August-Universität Göttingen. Seit 1980 Leiter der Prosektur und seit 1985 Leiter der Arbeitsgruppe Paläopathologie am Zentrum Anatomie der Universität Göttingen. Ernennung zum Professor 1993. Von 1997-1998 und von 1999-2000 Vorsitzender der Gesellschaft für Anthropologie (GfA). Seit 1998 einer der Schriftleiter (Managing Editor) des Journal of Comparative Human Biology (HOMO). Seit 2001 Präsidenten der amerikanischen Paleopathology Association (PPA). Forschungsaufenthalte u.a. in USA, Mexiko, UdSSR, Italien, Spanien, Österreich, Griechenland, Türkei, Iran, Syrien, Jordanien, Ägypten, Tunesien. Arbeiten zu Krankheitsursachen und -häufigkeiten bei prähistorischen und historischen Populationen in der Alten und Neuen Welt (Paläopathologie), zur prähistorischen Anthropologie und Paläoanthropologie sowie zur vergleichenden Morphologie und funktionellen Anatomie der Primaten.

Histomorphometrische Untersuchungen zur Osteoporoseprädisposition in frühmittelalterlichen Bevölkerungen

Thomas Beilner



**Beiträge zur Paläopathologie
Band V**

Herausgegeben von M. Schultz

Cuvillier Verlag • Göttingen

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Beilner, Thomas:

Histomorphometrische Untersuchungen zur Osteoporoseprädisposition in frühmittelalterlichen Bevölkerungen / Thomas Beilner. -

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2001

(Beiträge zur Paläopathologie; Bd. 5)

Zugl.: München, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-89873-172-3

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2001

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2001

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-89873-172-3

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Die Osteoporose und hier besonders die Altersosteoporose stellt in der heutigen Zeit ein nicht zu unterschätzendes Problem dar, das nicht nur in den Industrieländer stetig zuzunehmen scheint. Wie Untersuchungen an archäologischen Skelettfunden ergeben haben, ist Osteoporose offenbar kein Gesundheitsproblem der Neuzeit. Schon im Mittelalter dürfte dieses Krankheitsbild weit verbreitet gewesen sein. Allerdings sind unsere Kenntnisse über die damaligen Ursachen und die Auswirkungen der Osteoporose auf die Angehörigen einer vor- oder frühgeschichtlichen Population zum Teil immer noch sehr lückenhaft. So kann beispielsweise nur vermutet werden, dass in einer frühmittelalterlichen Population die an Osteoporose Erkrankten aufgrund ihrer Sozialgruppenzugehörigkeit unterschiedlichen Faktoren ausgesetzt waren, die das weitere Krankheitsgeschehen maßgeblich bestimmten.

Der Münchner Biologe Dr.rer.nat. Thomas Beilner hat an den frühmittelalterlichen Skeleten von Wenigumstadt (5.-8. Jh.n.Chr.) mit Hilfe histomorphometrischer Techniken ein standardisiertes Verfahren entwickelt, das er auf ein ausgewähltes Skelettkollektiv des bajuwarischen Gräberfeldes von Altenerding (5.-7. Jh.n.Chr.) anwandte, um Rückschlüsse auf das individuelle Entstehungsalter, die Ursachen und die Intensität der Osteoporose in dieser germanischen Population zu erhalten. Dabei setzte er die Ergebnisse neuerer Methoden der Lebensaltersbestimmung mit den auf Osteoporose zurückzuführenden mikromorphologischen Veränderungen in Beziehung. Bei der Befundaufnahme und -auswertung fanden digitale Techniken sowie ein spezielles Bildanalyseprogramm Verwendung. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen, die er in dem 5. Band der *Beiträge zur Paläopathologie* unter dem Titel "*Histomorphometrische Untersuchungen zur Osteoporoseprädisposition in frühmittelalterlichen Bevölkerungen*" vorstellt, führen zu interessanten Erkenntnissen, die unser Wissen über die Entstehung und die Intensität der Osteoporose bei germanischen Populationen der ausgehenden Völkerwanderungszeit bereichern, aber auch das Methodenspektrum in der Paläopathologie erweitern. Dabei finden auch soziobiologische Aspekte Berücksichtigung, die einen wichtigen Beitrag zur anthropologisch-paläopathologischen Ursachenforschung osteoporotischer Erkrankungen darstellen.

Abschließend möchte ich es nicht versäumen, dem Cuvillier Verlag für die Ausstattung des Bandes und die gute Zusammenarbeit zu danken.

Göttingen, der 23. Juli 2001

Michael Schultz

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1. Einführung in das Krankheitsbild der Osteoporose.....	1
1.1.1. Aspekte der Osteoporosedefinition.....	1
1.1.2. Umbau und atrophische Veränderungen des Knochengewebes.....	3
1.1.3. Osteoporoseformen.....	5
1.1.4. Risikofaktorenkonzept der Osteoporose.....	7
1.1.5. Diagnostische Verfahren.....	8
1.1.6. Sozioökonomische Folgen der Osteoporose.....	10
1.2. Osteoporoseforschung als Arbeitsfeld von Paläopathologie und historischer Umweltforschung.....	12
1.3. Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit.....	16
2. Material.....	18
3. Methoden.....	21
3.1. Entnahme von Prämolaren zur Sterbealtersbestimmung.....	21
3.2. Entnahme von Knochenproben.....	21
3.3. Reinigung spongiöser Knochenproben.....	23
3.4. Herstellung histologischer Dünnschnittpräparate.....	23
3.5. Digitale Erfassung der histologischen Präparate.....	25
3.6. Computerunterstützte Analyse der Zuwachsringe im Zahnwurzelzement zur Sterbealtersbestimmung.....	26
3.7. Computerunterstützte histomorphometrische Auswertung der Knochenpräparate.....	27
3.8. Quantifizierung des Osteoporosestatus einzelner Individuen eines Untersuchungskollektivs.....	31
3.9. Sozialstratigraphische und chronologische Unterteilung der Untersuchungskollektive.....	33
3.10. Korrekturmaßnahmen zum Vergleich der Beckentrabekelfläche mit medizinischen Referenzdaten.....	34
3.11. Vergleich zum altersabhängigen Verlauf knochenatrophischer Prozesse auf Kollektivebene.....	37
3.12. Röntgenuntersuchungen.....	37
3.13. Statistische Testverfahren.....	38

Inhaltsverzeichnis

4. Ergebnisse.....	41
4.1. Histomorphometrische Parameter.....	41
4.1.1. Histomorphometrische Parameter der Lendenwirbelkörperspongiosa.....	42
4.1.2. Histomorphometrische Parameter der Beckenkammpongiosa.....	45
4.1.3. Porosität der Femurcompacta.....	49
4.1.4. Materialerfüllungsgrad der Rippen.....	51
4.2. Osteoporosestatus.....	52
4.2.1. Osteoporosestatuswerte Wenigumstadter Frauen.....	53
4.2.2. Osteoporosestatuswerte Wenigumstadter Männer.....	54
4.2.3. Osteoporosestatuswerte Altenerdinger Frauen.....	56
4.2.4. Osteoporosestatuswerte Altenerdinger Männer.....	56
4.2.5. Vergleich der Osteoporosestatuswerte mit Sozialstratigraphie und Chronologie der Gräberkollektive.....	58
4.3. Vergleich der Trabekelfläche im Beckenkamm mit medizinischen Referenzdaten.....	59
4.3.1. Ermittlung von Umrechnungsfaktoren.....	59
4.3.2. Vergleich des TBV%-Verhaltens.....	61
4.4. Altersabhängiger Verlauf knochenatrophischer Prozesse auf Kollektivebene.....	65
4.4.1. Vergleich der Indexwerte bei Wenigumstadter und Altenerdinger Frauen.....	66
4.4.2. Vergleich der Indexwerte bei Wenigumstadter und Altenerdinger Männern.....	67
5. Methodische Diskussion.....	69
5.1. Sterbealtersbestimmung nach der Zahnwurzelzementmethode.....	69
5.1.1. Die Zahnwurzelzementmethode als Verfahren der Wahl.....	69
5.1.2. Umstellung der Zahnwurzelzementmethode auf Digitaltechnik.....	70
5.1.3. Methodische Kontinuität.....	71
5.2. Möglichkeiten und Grenzen der Lagekonstanz bei Probenentnahme und Präparateherstellung.....	72
5.2.1. Seiteneffekte.....	72
5.2.2. Segmenteffekte.....	73
5.2.3. Positionseffekte.....	74
5.3. Einfluss der Schnittdicke auf die messbare Trabekelfläche spongiöser Präparate.....	75
5.4. Methodische Konsequenzen häufiger Dekompositionsphänomene.....	78
5.4.1. Sedimenteinspülungen und Versinterungen.....	78
5.4.2. Dekompositionsbedingte Auslöschung der osteonalen Compactastruktur.....	80
5.4.3. Allgemeine Konsequenzen für Untersuchungsverfahren an bodengelagertem Skeletmaterial.....	82

Inhaltsverzeichnis

5.5. Digitale Bildverarbeitung.....	83
5.5.1. Technische Details der digitalen Erfassung histologischer Präparate.....	83
5.5.2. Elimination von Artefakten durch Filterungsprozesse.....	84
5.5.3. Programmiertechnische Details der histomorphometrischen Bildanalyse.....	86
5.6. Berechnungsmodus der Indexwerte.....	93
5.6.1. Begründung der Parameterwahl.....	93
5.6.2. Diskussion zur Gewichtungsmöglichkeit von Indexkomponenten....	94
5.7. Das Osteoporosestatuskonzept.....	96
5.7.1. Begründung des Prinzips.....	96
5.7.2. Einschränkungen, Leistungen und Handhabung der Methodik.....	97
6. Inhaltliche Diskussion.....	101
6.1. Vergleich der archäologischen Messdaten mit Ergebnissen medizinischer Untersuchungen.....	102
6.1.1. Altersabhängige Verläufe histomorphometrischer Parameter.....	102
6.1.2. Trabekuläres Knochenvolumen im Beckenkamm.....	104
6.2. Vergleich der Indextrends beim Wenigumstadter und Altnerdinger Kollektiv.....	106
6.3. Interpretation der Osteoporosestatuswerte.....	107
6.3.1. Individuen mit auffälligen Osteoporosestatuswerten.....	108
6.3.2. Sozialstratigraphie und Osteoporosestatus.....	110
6.3.3. Gräberchronologie und Osteoporosestatus.....	112
7. Zusammenfassung.....	114
Literaturverzeichnis.....	117
Anhang.....	128
A1. Histomorphometrische Messdaten.....	128
A2. Korrelationsmatrizen histomorphometrischer Messwerte und individuellen Sterbealtersdaten.....	132
A3. Listings der Macroprogramme zur Datenanalyse mit NIH IMAGE.....	136
A4. Osteoporosestatuswerte.....	141
A5. Sozialstratigraphie und chronologische Gruppenbildung.....	142
A6. Messdaten der Schnittdicketestreihen.....	143
Stichwortverzeichnis.....	144

1. Einleitung

1.1. Einführung in das Krankheitsbild der Osteoporose

Die folgenden Kapitel geben einen exemplarischen Überblick zu medizinischen Aspekten des Osteoporoseproblems, soweit sie im Zusammenhang mit Fragestellung, Methodik und Ergebnissen der vorliegenden Arbeit stehen.

Darüber hinaus wird die aktuelle sozioökonomische Relevanz dieser verbreiteten Krankheit skizziert.

1.1.1. Aspekte der Osteoporosedefinition

Im Gegensatz zu anderen wissenschaftlichen Termini, war der Osteoporosebegriff in den letzten Jahrzehnten einem permanenten Bedeutungswandel unterworfen, der jeweils diesbezügliche Forschungsfortschritte und Sichtweisen reflektierte (Schapira und Schapira 1992). Heute akzeptierte und verbreitete Definitionen bezeichnen eine Krankheit als "Osteoporose", die durch verringerte Knochenmasse und Verschlechterung der Microarchitektur des Knochengewebes charakterisiert ist und zu gesteigertem Frakturrisiko führt (z.B. Consensus development conference 1991). In dieser Definitionsform werden die drei wesentlichen Aspekte osteoporotischer Erkrankungen berücksichtigt:

1. Eine Verminderung der reinen Knochensubstanz, die sich durch Absinken der radiologisch messbaren Knochenmineraldichte, gesteigerte Porosität kompakten Skeletmaterials und Ausdünnung des Trabekelnetzwerkes in spongiösen Skeletelementen bemerkbar macht.
2. Eine Verschlechterung der strukturellen Qualität und mechanischen Stabilität des Knochengewebes, z.B. durch die Auflösung von Trabekelverstrebnungen, die nicht notwendigerweise mit einer deutlich erkennbaren Reduktion der Knochensubstanz einhergehen muss.
3. Ein gesteigertes Frakturrisiko als Konsequenz der beschriebenen Veränderungen.

Diese beinahe allgemein akzeptierte Definition lässt allerdings exakte, quantitativ fassbare Grenzen, von denen an von Osteoporose gesprochen werden kann, offen. Schwierigkeiten bei ihrer diagnostischen Umsetzung bereitet die Tatsache, dass nicht jeder Verlust an struktureller Quantität und Qualität des Knochengewebes als osteoporotischer Prozess gedeutet werden darf.

Die Knochenmasse eines Menschen erhöht sich bis zum frühen Erwachsenenalter. Nach dem Erreichen eines Gipfels, der sog. peak bone mass, beginnt etwa ab der 4. Altersdekade eine lebenslang anhaltende Verringerung, die auf einem Ungleichgewicht der Umbauprozesse des Knochengewebes beruht (NIH 1984). Dieser Abbau betrifft prinzipiell jeden Menschen und muss als physiologischer Prozess betrachtet werden. Auf welche Werte sich die Knochenmasse eines Individuums im Alter reduziert, wird nicht zuletzt von der Höhe der erreichten peak bone mass beeinflusst (Kanis und Pitt 1992). Je nach Sichtweise tragen diese altersatrophischen Veränderungen zu pathologischen, osteoporotischen Prozessen bei bzw. überlagern diese. Das Feh-

len einer scharfen Trennlinie zwischen physiologischem und pathologischem Knochenabbau ist ein Grundproblem der Osteoporoseforschung.

In gewisser Weise ist die oben zitierte Definition eine Kompromissformel zwischen zwei etwas divergenten Betrachtungsweisen.

Ein möglicher Standpunkt misst dem steigenden Frakturrisiko als Charakteristikum osteoporotischer Erkrankungen zentrale Bedeutung bei. Entsprechende Definitionsvarianten werden z.B. bei Kanis und Pitt (1992), Ringe (1992) und Cooper (1999) verwendet. Dabei ist man bemüht, die Krankheit am Auftreten klinischer Symptome festzumachen.

In Extremfällen wird die Verwendung des Osteoporosebegriffes nur propagiert, wenn es auf Grund verminderter Knochenmasse bereits zu Frakturen gekommen ist (Ziegler 1988, Minne et al. 1986, Kanis 1990). Diese Sichtweise scheint problematisch, weil man die Existenz einer Erkrankung erst einräumt, wenn ihre schlimmste Folge bereits eingetreten ist. Auch Nordin (1987) widerspricht dieser, unter dem Aspekt von Forschung, Prävention und Therapie wenig hilfreichen Definitionsauslegung: "What osteoporosis does is to increase the fracture risk, not cause the fracture." Auf ihn geht ein sinnvollerer und mittlerweile im medizinischen Bereich weit verbreitetes Diagnosekonzept zurück. Es vergleicht radiologisch bestimmte BMD-Werte (bone mineral density) von Patienten mit dem Populationsdurchschnittswert zum Zeitpunkt des Erreichens der peak bone mass. Der Abstand von diesem Vergleichswert, ausgedrückt in Standardabweichungen, wird als sog. Z-score bezeichnet (Kipersztok 1997). Beträgt er bei Frauen mehr als 2,5 Standardabweichungen, so spricht man von Osteoporose, im Bereich von 1 bis 2,5 Standardabweichungen von Osteopenie (WHO 1994). Ob diese Grenzwerte auch für Männer verwendet werden können, ist umstritten.

Auch dieses Konzept ist vor allem geeignet, das steigende Frakturrisiko von Patienten zu diagnostizieren, welches sich im Absinken der BMD-Werte unter gewisse Grenzen offenbart. Obwohl die Festlegung des Grenzwertes von 2,5 Standardabweichungen einer gewissen Willkür unterliegt, stellt sie eine quantitative Definitionsmöglichkeit der Krankheit Osteoporose dar. Fälle, in denen Patienten klinische Konsequenzen der Krankheit drohen, sind klar diagnostizierbar, bevor ein Frakturereignis eingetreten sein muss.

Unter dem Gesichtspunkt der Früherkennung, Prävention und Ursachenforschung hat das Konzept gewisse Schwächen: Jüngere Individuen sind auf Grund geringerer altersatrophischer Prozesse vom Grenzwert noch weit entfernt, selbst wenn sie für ihr Alter zu geringe BMD-Werte aufweisen. Dafür erhöht sich nach dieser Definition, durch die physiologische Altersatrophie, der Prozentsatz an Osteoporosekranken automatisch mit dem Alter. Treibt man diesen Punkt auf die Spitze, so könnte man sagen: Jede Person, die nicht rechtzeitig stirbt, wird nach diesem Konzept früher oder später als osteoporosekrank erkannt. Das Diagnosekriterium wird im höheren Lebensalter alleine durch das Phänomen der physiologischen Altersatrophie erfüllt. Die Frage, ob man das Altern als pathologischen Prozess, als Krankheit auffassen soll tangiert dabei durchaus philosophische Dimensionen.

Ein zweiter möglicher Standpunkt legt mehr Gewicht auf die prozesshafte Entwicklung des osteoporotischen Krankheitsgeschehens und seine Abgrenzung von der physiologischen Altersatrophie. Ein pathologisch osteoporotischer Prozess liegt demnach vor, wenn die strukturelle Quantität und Qualität des Knochens bei einem

Individuum deutlich unter der alters- und geschlechtsspezifischen Norm liegt. Steigert sich im höheren Alter oder bei postmenopausalen Frauen dadurch das Risiko von Frakturen, so wird dies eher als sekundäre Folge, nicht als primäres Kennzeichen einer Osteoporose gesehen. Entsprechende Definitionsvarianten finden sich z.B. bei Kruse und Kuhlencordt (1984), Siegenthaler et al. (1987) und Gross et al. (1987).

Vergleicht man die BMD-Werte eines Patienten mit den typischen Durchschnittswerten alters- und geschlechtsgleicher Individuen und bezieht sie auf die Standardabweichung, so ergibt sich der sog. T-score. Er zeigt, ob neben physiologischen, altersatrophischen Prozessen noch andere Faktoren zur Reduktion der BMD-Werte beitragen (Kipersztok 1997). Auch dieses Konzept stellt eine akzeptierte Möglichkeit zur quantitativen Osteoporosedefinition dar (WHO 1994). Für postmenopausale Frauen wird ab T-score-Werten unter -1 Behandlungsbedarf gesehen (Australian national consensus conference 1997).

Ein Definitionskonzept, das Quantität und Qualität des Knochengewebes mit der alters- und geschlechtsspezifischen Norm vergleicht, eignet sich besonders zur Früherkennung, Prävention und Ursachenforschung der Osteoporose. Jüngere Individuen mit zu niedrigen Werten können lange vor dem Auftreten eines akuten Frakturrisikos erkannt, behandelt und weiter beobachtet werden. Frühes Entdecken unphysiologischer knochenatrophischer Prozesse erleichtert zudem die Ableitung kausalanalytischer Bezüge.

Das aktuelle Frakturrisiko eines Individuums hingegen kann nur durch den Z-score abgeschätzt werden. So führt ein Vergleich mit der Altersnorm selbst bei stark reduzierten BMD-Werten im hohen Alter nur dann zu einer Osteoporosediagnose, wenn die ohnehin niedrige Altersnorm noch deutlich unterschritten wird. D.h. der normgerechte Anstieg des Frakturrisikos bei alten Menschen alleine wird noch nicht als pathologisch, sondern lediglich als natürliche Begleiterscheinung des Alterns begriffen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass prinzipiell über die Osteoporosedefinition weitreichender Konsens besteht. Ihre genaue quantitativ-diagnostische Auslegung ist allerdings abhängig von der Fragestellung, die man mit entsprechenden Untersuchungen verknüpft und nach wie vor Gegenstand kontroverser Diskussionen.

1.1.2. Umbau und atrophische Veränderungen des Knochengewebes

Knochen ist kein totes, statisches Gewebe. Selbst nach Abschluss der ontogenetischen Wachstumsprozesse eines Menschen unterliegt es permanenten Umbauvorgängen. Sie helfen einerseits die Funktion des Knochengewebes als Mineralspeicher des Körpers aufrecht zu erhalten, andererseits ermöglichen sie eine dynamische Reaktion auf veränderte Belastungsverhältnisse.

Realisiert wird der Knochenumbau durch ein bislang noch nicht gänzlich verstandenes Zusammenspiel von knochenabbauenden Osteoklastenzellen und matrixsezernierenden Osteoblasten. Dieser als Remodelling bezeichnete Prozess, erfolgt auf der Ebene von sog. basic multicellular units, den BMU's (Frost 1964). Darunter versteht man kleinräumige Zellgruppierungen, deren Osteoklasten zuerst Knochensubstanz lokal resorbieren, bevor Osteoblasten die entstandene Resorptionslücke mit Osteoid

auffüllen, welches nachfolgend mineralisiert wird. Ein entsprechender Umbauzyklus dauert etwa 90 bis 120 Tage. Eine erneute Aktivierung der BMU erfolgt erst nach einer Ruhephase von durchschnittlich 900 Tagen. Auf diese Weise werden pro Jahr etwa 4% des Knochengewebes ausgetauscht (Delling et al. 1991, Delling und Vogel 1992).

Wird der Remodellingprozess durch ein Ungleichgewicht zwischen Resorption und Anbau so gestört, dass eine negative Bilanz resultiert, so kommt es zu einem Verlust an Knochenmasse. Histomorphometrische Untersuchungen konnten zeigen, dass die Syntheseleistung der Osteoblasten innerhalb der BMU's mit dem Alter abnimmt (Lips et al. 1978). Bei mehr oder weniger gleich bleibender Resorptionstätigkeit führt diese Osteoblasteninsuffizienz zum Knochenabbau.

Eine wichtige Rolle beim Verlust von spongiöser Knochensubstanz spielen Trabekelperforationen. Sie können immer dann entstehen, wenn sich zwei Resorptionslakunen an einem Trabekelstück direkt gegenüberliegen. Die Resorptionstiefe beider Lakunen reicht statistisch aus, um Trabekel zu perforieren. Die Durchtrennung führt zu einem unwiederbringlichen Knochenmassenverlust, da den einer Resorption folgenden Osteoblasten nun das Substrat zur Anlage neuen Knochens fehlt (Delling et al. 1991).

Zusätzlich zum genannten Mechanismus postulieren Delling, Vogel und Hahn (1991) die Existenz sog. Killerosteoklasten mit verändertem Resorptionsmuster. Anstatt die üblichen wannenförmigen Resorptionslakunen zu schaffen, sollen sie stärker in die Tiefe bohren und so für Trabekelperforationen verantwortlich sein.

Verlässt man die zelluläre Ebene des Remodelling, so kommt es als Konsequenz des gestörten Umbaugleichgewichtes ganz allgemein zu einer Abnahme der Knochenmasse. Damit verbunden ist das Auftreten struktureller Defizite des Knochens, welche seine mechanische Stabilität reduzieren. Röhrenknochen sind von einem Rückgang der Corticalisdicke bei gleichzeitiger Erhöhung der Compactapoporosität betroffen. Abb. 1 zeigt vergleichend, wie es in einem Fall progredienter Osteoporose zu einer dramatischen Erweiterung der Lumina Haversscher Kanäle kommt.

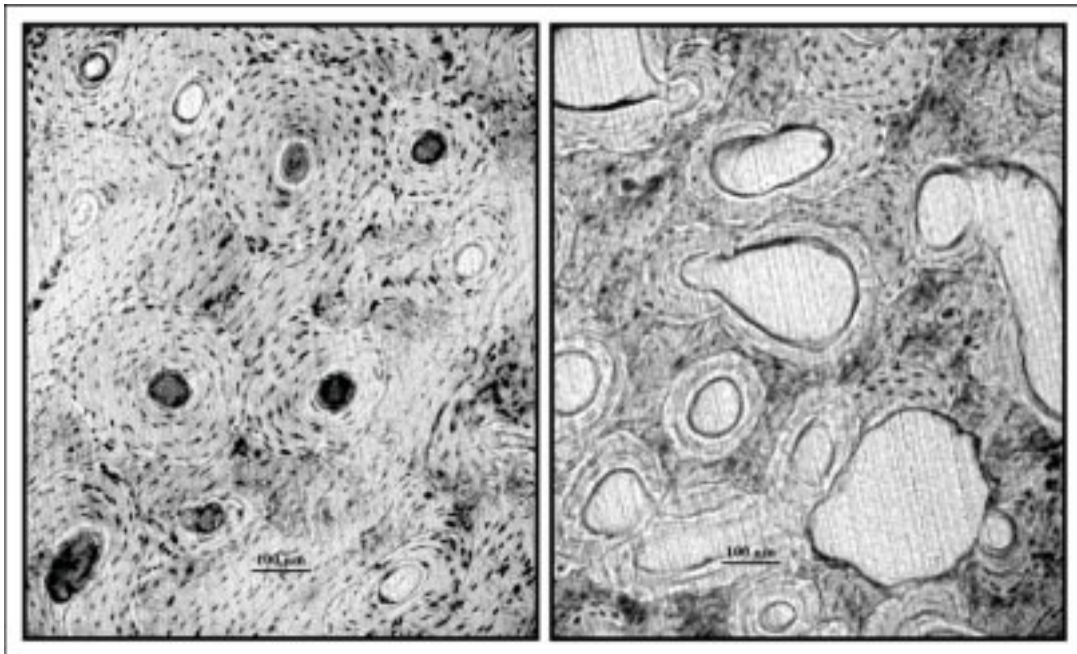


Abb. 1. Gräberfeld Altenerding. Mikrofotografien histologischer Präparate der Femurcompacta. Links: 38jähriger, gesunder Mann. Rechts: 68jähriger Mann mit manifester Osteoporose. Deutlich sind die erweiterten Kanallumina zu erkennen.

In spongiösen Skeletelementen muss mit einer Rarefizierung der Trabekel gerechnet werden. Besonders im Wirbelkörper werden plattenartige Strukturen mehr und mehr zu Stäben reduziert und horizontale Trabekel zu Gunsten vertikaler abgebaut (Arnold 1981). Gleichzeitig schwindet in spongiösen Skeletelementen der dreidimensionale Vernetzungsgrad der Knochenbälkchen, was zu einer starken Verminderung der mechanischen Festigkeit führt, ohne dass damit notwendigerweise ein auffälliger Knochenmasseverlust einhergehen muss (Hahn et al. 1992).

Abb. 2 zeigt vergleichend die Rarefizierung von Trabekelstrukturen und den Rückgang der Vernetzung in einem Fall schwerer Osteoporose. Der Prozess der Trabekelperforation lässt sich z.T. noch erahnen.

1.1.3. Osteoporoseformen

Mittlerweile kennt man eine große Zahl unterschiedlicher Osteoporoseformen, die nach mehreren Systemen klassifiziert werden. Ihre exakte Abgrenzung voneinander ist oft problematisch. Einige Varianten sind auf Grund ihres seltenen Auftretens von untergeordneter Bedeutung. Der folgende Abschnitt soll dieses Thema nicht umfassend erörtern, sondern lediglich einen exemplarischen Überblick zu den Klassifikationsmöglichkeiten der wichtigsten Osteoporoseformen geben.

Die Einteilung osteoporotischer Erkrankungen kann nach dem Zeitpunkt ihres Auftretens bzw. der Diagnosestellung erfolgen. Man spricht so z.B. von juveniler, postmenopausaler und seniler Osteoporose. Nur teilweise geben diese Bezeichnungen Hinweise auf pathogenetische Bezüge (Ringe 1995).



Abb. 2. Gräberfeld Altenerding. Bearbeitetes Bild eines histologischen Querschnittspräparates der Lendenwirbelkörperspongiosa. Links: 32jähriger, gesunder Mann. Rechts: 68jähriger Mann mit manifester Osteoporose. Deutlich ist eine Trabekelrarefizierung und eine Reduktion des Trabekelnetzungsgrades zu erkennen.

Klinik- und praxisrelevanter ist die Unterteilung in primäre und sekundäre Osteoporoseformen. Letztere lassen sich auf ein konkretes Grundleiden zurückführen, während die Ätiologie primärer Osteoporosen, zumindest weitgehend, unbekannt ist. Eine konsequente Anwendung beider Begriffe in der medizinischen Praxis ist allerdings schwierig, da sich die Differenzierung zwischen Risikofaktoren und definierbaren Stoffwechselstörungen mitunter problematisch gestaltet (Kruse und Kuhlen cordt 1984, Ringe 1995).

Wegen ihrer hohen Frequenz sind vor allem primäre Osteoporoseformen epidemiologisch von größter Bedeutung.

Zu ihnen zählen postmenopausale Osteoporosen bei Frauen, welche durch einen beschleunigten peri- bzw. postmenopausalen Knochenabbau gekennzeichnet sind. Eine ursächliche Beteiligung des sinkenden Östrogenspiegels steht außer Frage. Allerdings lässt sich die Krankheit allein darauf nicht zurückführen. Da etwa 70% der Frauen nicht erkranken, müssen andere Risikofaktoren im Einzelfall unterschiedlich stark beteiligt sein (Ringe 1995).

Ähnlich verhält es sich mit der senilen Osteoporose, die im höherem Alter bei Männern und Frauen auftritt. Auch hier gibt es keine klar erkennbare Hauptursache. Neben den Folgen seniler Involution, d.h. dem progredienten Funktionsverlust zahlreicher Organsysteme (Gonaden-, Nierenfunktion, Muskulatur etc.) und steigender Immobilität können verschiedene Risikofaktoren, die z.T. während des ganzen Lebens wirksam waren, zur Manifestation einer Osteoporose beitragen.

Schließlich zählt man zu den primären Krankheitsformen noch die eher seltenen, sog. ideopathischen Osteoporosen im engeren Sinne, deren Auftreten mit keinerlei Risikofaktoren oder Grunderkrankungen in Zusammenhang gebracht werden kann. Sekundäre Osteoporosen haben sehr unterschiedliche, aber, gemäß ihrer Definition, bekannte Ursachen. Beispielsweise werden sie durch konkrete endokrine, renale und intestinale Störungen ausgelöst. Des Weiteren können sie als Folge hereditärer Bindegewebserkrankungen (z.B. Osteogenesis imperfecta), anhaltender Immobilität oder als unerwünschte Konsequenz einer Kortikoidtherapie auftreten (Kruse und Kuhlen-cordt 1984, Ringe 1995, Schulz und Manns 1992).

Ursprünglich aus dem angloamerikanischen Sprachraum stammen die Begriffe Typ I- und Typ II-Osteoporose, die praktisch synonym, für postmenopausale und senile Osteoporose gebraucht werden (Riggs und Melton 1983, Delling und Vogel 1992).

1.1.4. Risikofaktorenkonzept der Osteoporose

In zahlreichen Studien aus dem Bereich der Humanmedizin (z.B. Kelly et al. 1990, Hansen et al. 1991, Jonsson et al. 1992, Kanis u. Pitt 1992, Hu et al. 1994) wird versucht, den Einfluss individueller Faktoren (Ernährungsverhalten, Drogenkonsum, körperliche Aktivität, Schwangerschaften und Stillzeiten, Hautfarbe etc.) auf das Osteoporoserisiko der Patienten zu klären. Die erzielten Ergebnisse bezüglich einzelner potenzieller Risikofaktoren sind dabei nicht immer deckungsgleich.

Die zuverlässige Recherche individueller Lebensgewohnheiten bei Patientenkollektiven, insbesondere das Abschätzen, in welcher Quantität und über welche Zeiträume Risikofaktoren wirksam waren, erweist sich als schwierig. Zwischen vielen Einflussgrößen bestehen Wechselbeziehungen. So können z.B. die Variablen Rauchen, Alkoholkonsum und Bewegungsmangel voneinander abhängig sein (Ringe 1995). Oft ist nicht völlig geklärt, ob Risikofaktoren direkt den Knochenabbau beschleunigen, einen negativen Einfluss auf die peak bone mass ausüben oder über beide Wege osteoporotische Prozesse fördern.

Trotz dieser Schwierigkeiten sind eine Reihe von Einflüssen bekannt, die als echte Risikofaktoren für das Ausbilden osteoporotischer Erkrankungen betrachtet werden müssen. Von definierbaren Ursachen für sekundäre Osteoporoseformen unterscheiden sie sich oft nur in Intensität und Wirkungsdauer.

Im Sinne des Risikofaktorenkonzeptes gilt mittlerweile eine genetische Prädisposition der europäischstämmigen und asiatischen Bevölkerung für Osteoporose als gesichert. Auch muss eine positive Familienanamnese als Risiko betrachtet werden (Schulz und Manns 1992, Ringe 1995). Wie schwer die genetische Konstitution im Vergleich mit Umwelteinflüssen wiegt, ist umstritten. Mit Sicherheit sind aber beide Faktoren an der Ausprägung des individuellen Osteoporoserisikos beteiligt (Kelly et al. 1990, Cooper 1999).

Des Weiteren gilt Bewegungsmangel als Osteoporoserisikofaktor, bei völliger Immobilität sogar als Ursache einer sekundären Osteoporose. Umgekehrt konnten Studien mit verschiedensten Ansätzen einen Zusammenhang zwischen gesteigerter physischer Aktivität und einem verbesserten Knochenstatus nachweisen (Joakimsen et al. 1997, Mosekilde et al. 1994, Jonsson et al. 1992).

Ein weiteres Risiko birgt eine Ernährungsweise, aus der eine verminderte Kalziumaufnahme resultiert. Im Vordergrund steht dabei die direkte Kalziumzufuhr durch die Nahrung. Obwohl ihr Stellenwert durchaus kontrovers diskutiert wird (Kanis und Pitt 1992), gibt es Anzeichen, dass eine gesteigerte Kalziumzufuhr einer höheren Knochenmasse bzw. peak bone mass förderlich ist und somit einer Osteoporose entgegenwirkt (Matkovic et al. 1979, Heaney und Recker 1981, Hansen et al. 1991, Schulz und Manns 1992). Protein- und phosphatreiche Kost, insbesondere hoher Fleischkonsum, werden im Sinne einer negativen Beeinflussung der Kalziumbilanz als Risikofaktoren eingestuft (Minne et al. 1986, Schulz und Manns 1992, Ringe 1995). Hingegen konnte erst kürzlich im Tierversuch gezeigt werden, dass der Konsum verschiedener Gemüsesorten zu einer Erhöhung der Knochenmasse durch Hemmung von Resorptionsprozessen führt (Mühlbauer und Li 1999).

Zumindest chronisch hoher Alkoholkonsum und starkes Rauchen werden als Risikofaktoren betrachtet (Ringe 1995).

Die Gefahr eine Osteoporose zu entwickeln ist des Weiteren von der physischen Konstitution eines Menschen abhängig. Schlanker Habitus, grazieller Körperbau und niedriger body mass index müssen als Risikofaktoren betrachtet werden (Joakimsen et al. 1998).

Bei Frauen stellt das Absinken des Östrogenspiegels nach der Menopause gewiss einen Risikofaktor dar. Kanis und Pitt (1992) warnen aber vor seiner Überbewertung. Inwieweit Partus und Lactation einen protektiven Einfluss auf den Knochenstatus haben, ist nicht völlig geklärt.

1.1.5. Diagnostische Verfahren

Eine auf Risikofaktorensuche ausgerichtete Anamnese und biochemische Laboruntersuchungen sind wichtige Werkzeuge für die medizinische Osteoporosediagnose. Da sie aber bei archäologischem, bodengelagertem Skeletmaterial nicht greifen, werden sie hier lediglich der Vollständigkeit halber erwähnt. Auch die nachfolgende Kurzbeschreibung der wichtigsten Techniken zur Beurteilungen der Knochenstruktur soll nur exemplarischen Charakter haben und einen Überblick ermöglichen.

Die konventionelle Röntgenaufnahme stellt nach wie vor die erste technische Maßnahme zur Abklärung eines Osteoporoseverdachts dar. Sie lässt sich sowohl am Achsenskelet, als auch an den Röhrenknochen der Gliedmaßen anwenden. Dabei liefert eine Röntgenaufnahme Informationen zur Morphologie und Struktur von Skeletelementen und zum Vorliegen von Frakturen. Für die Beurteilung der Knochendichte ist die Methode nicht empfindlich genug. So kann ein Mineraleichtverlust der Wirbelsäule frühestens nach einer Reduzierung um 30-40% sicher erkannt werden (Kalender 1992).

In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurde eine ganze Reihe technischer Verfahren zur absorptiometrischen Erfassung der Knochenmineraldichte eingesetzt. Die Entwicklung verlief dabei von der single photon absorptiometry (SPA) über die dual photon absorptiometry (DPA) hin zur dual x-ray absorptiometry (DXA). Alle drei Verfahren basieren auf der quantitativ messbaren Schwächung eines Photonenstrahls durch ein in den Strahlengang eingebrachtes biologisches Objekt. Dabei werden vor allem kalziumhaltige Strukturen in einer integrativen Messung erfasst.

Die SPA-Technik verwendet eine Isotopenquelle zur Erzeugung des Photonenstrahls und kann aus technischen Gründen nur am peripheren Knochen eingesetzt werden. Absorptiometrische Messungen an Wirbelsäule und Femurhals wurden erst durch DPA-Verfahren ermöglicht. Die Verwendung von Photonen zweier verschiedener Energieniveaus ermöglicht hier eine gewisse, rechnerische Eliminierung von Einflüssen der Weichgewebe.

Eine weitere Verbesserung kann mit DXA-Geräten durch die Verwendung von Röntgenröhren an Stelle von Isotopenquellen unter Beibehalt des Zwei-Spektren-Prinzips erzielt werden. Die auf Grund der Alterung von Isotopenquellen, geringe Reproduzierbarkeit der mittels SPA oder DPA gemessenen Werte ließ sich so deutlich verbessern (Kalender 1992).

Eine relativ neue Technik ohne Strahlenbelastung der Patienten, bei geringen Kosten, bietet die Ultraschallmessung. Ausgeführt wird sie meist an Calcaneus oder Patella. Erfasst wird die Schallleitgeschwindigkeit und die Schallbedämpfung durch den Knochen. Kritisiert wurde, dass diese Methode an Skeletelementen misst, deren Beeinträchtigung durch osteoporotische Prozesse noch nicht umfassend geklärt ist. Nach dem derzeitigen Wissensstand scheint die Ultraschallmessung gut geeignet, das Frakturrisiko älterer Menschen abzuschätzen (Kanis et al. 1999).

Eine genau lokalisierte Erfassung der Knochenmineraldichte, bei getrennter Erfassung von spongiösen und kompakten Knochenanteilen gewährleistet die quantitative Computertomographie (QTC). Greift man auf die neueste Generation hochauflösender Computertomographen zurück, so ist neben der Messung von BMD-Werten bereits eine strukturelle Analyse des Knochengewebes möglich (z.B. Gordon et al. 1998, Kanis et al. 1999). Begrenzender Faktor dieser eleganten, nichtinvasiven Methode ist, neben den immensen Gerätekosten, bislang das noch immer zu geringe Auflösungsvermögen der Tomographen.

So ist zur Zeit die Histomorphometrie die Methode der Wahl, wenn man präzise Informationen zur Mikrostruktur des Knochens erhalten will. Sie wird im medizinischen Bereich sowohl zu Forschungszwecken auf Sektionsmaterial, als auch auf Knochenbiopsien von Patienten angewandt, die mittlerweile fast ausschließlich dem Beckenkamm entnommen werden. Nach einer Verarbeitung der Knochenproben zu histologischen Dünnschnittpräparaten erfolgt deren Auswertung heute meist mittels computergestützter Bildanalysesysteme.

Das zweidimensionale Bild der histologischen Schnitte kann prinzipiell vier verschiedene Typen an Primärdaten liefern: Flächen, Umfänge, Abstände und die Anzahl von Strukturen (Parfitt 1983, Kimmel und Jee 1983). Mit Hilfe der Stereologie lassen sich sekundäre Parameter berechnen, aus denen auf die Verhältnisse im dreidimensionalen Raum geschlossen werden kann (Elias et al. 1971, Schwartz und Recker 1981, Parfitt 1983) oder die - im Falle digitaler Bildverarbeitung - rechnerisch, über den Vernetzungsgrad von Trabekeln Aussagen zur mechanischen Qualität der Spongiosa erlauben (Hahn et al. 1992). Wichtigster Parameter ist das trabekuläre Knochenvolumen, der Volumenanteil eines spongiösen Knochens, der von Knochen-trabekeln eingenommen wird. Es entspricht nach dem stereologischen Prinzip von Delesse direkt dem im zweidimensionalen bestimmten Trabekelflächenanteil des Schnittbildes (z.B. Parfitt 1973). Einen direkten Informationsgewinn erhalten die Primärdaten durch ihre Übertragung auf dreidimensionale Verhältnisse nicht. Eine entsprechende Angabe der Parameter wurde allerdings zum Standard erklärt (Parfitt et al. 1987).

Das trabekuläre Knochenvolumen ist ein direktes Maß für die Knochendichte der Spongiosa, dass nicht wie bei den meisten radiologischen Verfahren durch Weichgewebeeinflüsse und Überlagerungseffekte der Compacta beeinflusst ist.

Neben solchen statischen Strukturparametern lassen sich vor allem an medizinischem Material auch eine Reihe von Parametern ermitteln, die Aussagen zur Umbaudynamik des Knochengewebes ermöglichen. Gemessen werden z.B. die Länge von Resorptionsbereichen, der Besatz von Trabekelkanten mit Osteoblasten bzw. Osteoklasten und der Abstand von fluoreszierenden Markierungen, die durch zeitlich gestaffelte Verabreichung von Tetrazyklin vor der Biopsieentnahme entstehen und somit ein quantitatives Maß für Knochenanbauprozesse darstellen.

Somit ermöglicht die Histomorphometrie, bislang als einzige Methode, die präzise Erfassung statischer und dynamischer Parameter im Zusammenhang mit osteoporotischen Prozessen (Boivin und Meunier 1993).

Aus der medizinischen Routinediagnostik der Osteoporose wurde die Histomorphometrie allerdings mittlerweile durch die weit weniger aufwendigeren und nicht-invasiven radiologischen Verfahren (v.a. DXA) verdrängt. Die zwar aussagekräftigen, aber durch die Biopsientnahme patientenbelastenden, histomorphometrischen Techniken, werden heute vor allem in der Forschung und zur Abklärung ungewöhnlicher Osteoporoseformen, bei denen andere Diagnoseverfahren versagen, angewandt (Kraenzlin 1995).

1.1.6. Sozioökonomische Folgen der Osteoporose

Osteoporose ist die häufigste Knochenerkrankung. Klinisch manifestiert sie sich überwiegend im höheren Erwachsenenalter, vor allem durch steigendes Frakturrisiko. Osteoporosetypisch sind Knochenbrüche in Folge eines inadäquaten Traumas oder Spontanfrakturen. Besonders stark betroffen sind Frauen nach der Menopause. Für Europa und die USA wird der Anteil von Patienten mit klinisch manifester Osteoporose auf 6-8% der Gesamtbevölkerung geschätzt (Ringe 1985, Spencer u. Krämer 1986). Statistisch gesehen erleidet fast jede vierte weiße amerikanische Frau bis zu ihrem siebzigsten Geburtstag eine osteoporosebedingte Fraktur. Gerade die in diesem Zusammenhang häufigen Oberschenkelhalsbrüche sind im fortgeschrittenen Alter mit einer relativ hohen Mortalität verbunden (Kanis und Pitt 1992). Schätzungen zu Folge soll in den USA alle 20 Minuten ein Mensch an den Folgen seiner Osteoporose sterben (Schulz 1991). Auf jeden Fall führen gerade Oberschenkelhalsfrakturen zu einer drastischen Einschränkung der Lebensqualität. Oft bleiben die Patienten pflegebedürftig und können nie mehr selbstständig gehen. Die dadurch bedingte Immobilität leistet nicht nur dem Verlust sozialer Kontakte, sondern auch dem Fortschreiten osteoporotischer Prozesse Vorschub.

Abgesehen von der Tragik der individuellen Patientenschicksale entstehen durch osteoporotische Erkrankungen auch gewaltige sozioökonomische Belastungen für die Gesellschaft. Vorsichtige Schätzungen beziffern die unmittelbaren und mittelbaren Kosten für Frakturen infolge von Osteoporose für Deutschland auf jährlich 4-5 Milliarden DM (Seibel u. Kraenzlin 1995).

Angesichts einer demographischen Entwicklung mit steigender Lebenserwartung und einem stetig wachsenden Anteil älterer Menschen werden sich die sozioökonomischen Konsequenzen dieser Volkskrankheit noch weiter verschärfen. Allein auf

Grund der demographischen Gegebenheiten, bei Annahme einer konstanten Inzidenz in entsprechenden Altersklassen, wird sich die Anzahl von Oberschenkelhalsbrüchen bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts fast verdreifachen (Cooper 1999). Beunruhigend ist, dass die Osteoporoseinzidenz in den Industriestaaten z.T. schneller steigt als es alleine durch die Altersstruktur erklärbar wäre. Somit tragen möglicherweise auch Veränderungen im Lebensstil zu einer Verschärfung der Situation bei (Ringe 1995).

Bislang waren vor allem die Industriestaaten betroffen. Spätestens innerhalb der nächsten 50 Jahre, wenn die rapide gewachsenen Bevölkerungen der Schwellenländer Lateinamerikas und Asiens das Risikoalter erreichen, wird das Osteoporoseproblem globale Dimensionen annehmen (Cooper 1999). Politik und Medizin sind gegenwärtig intensiv bemüht, die Krankheit Osteoporose und mögliche Präventionsmaßnahmen ins Licht der Öffentlichkeit zu stellen. Weltweite Informationskampagnen und zunehmende Berichterstattung in den Medien unterstreichen die steigende gesellschaftliche Relevanz dieser Forschungsrichtung.

1.2. Osteoporoseforschung als Arbeitsfeld von Paläopathologie und historischer Umweltforschung

Während der letzten drei Jahrzehnte wurde eine Reihe von Studien unterschiedlichster Methodik zum Phänomen der Knochenatrophie an archäologischem Skelettmaterial durchgeführt. Der Zustand und die altersabhängige Veränderung von Knochenmasse und -struktur bei archäologischen Skelettpopulationen verschiedenster Zeitstellung und geographischer Verbreitung standen dabei im Vordergrund.

Der generelle Rückgriff auf rein morphologische Techniken zur Sterbealtersbestimmung, der mit hohen Ungenauigkeiten verbunden ist (Kemkes-Grottenthaler 1996) und die häufige Verwendung relativ kleiner Untersuchungskollektive ermöglichen jedoch kaum Aussagen auf der Bevölkerungsebene.

Des Weiteren wurde versucht, gewonnene Resultate mit medizinisch-klinischen Daten lebender Bevölkerungen zu vergleichen und die Eignung diverser Diagnoseverfahren für die Untersuchung archäologischen Skelettmaterials zu testen (z.B. Dewey et al. 1969, Perzigian 1973, Ericksen 1976, Thompson et al. 1981, Cook et al. 1988, Burr et al. 1990, Hammerl 1990, Kneissel 1993, Kneissel et al. 1997, Farquharson et al. 1997, Mays et al. 1998).

Fasst man die wichtigsten Ergebnisse dieser Studien zusammen, so zeigt sich, dass Osteoporose und Altersatrophie keine auf unsere Zeit beschränkte Phänomene sind, sondern ebenfalls an archäologischem Skelettmaterial auftreten. Die Beeinflussbarkeit atrophischer Prozesse durch sog. Lifestyle-Faktoren, wie z.B. Ernährung und physische Aktivität, scheint auch in historischen Bevölkerungen evident. Hinweise auf generelle Unterschiede zum klinischen Bild der Osteoporose bei heute lebenden Bevölkerungen erhält man aus der Seltenheit, mit der osteoporosetypische Frakturen bei der Auswertung archäologischer Skeletserien gefunden werden (Agarwal und Grynepas 1996). Weitere Studien an größeren Kollektiven mit einer auf die speziellen Gegebenheiten bodengelagerten Skelettmaterials abgestimmten Methodik und einer genaueren Sterbealtersbestimmung sind jedoch nötig, um weiter reichende Informationen auf Individuen- und Bevölkerungsebene zu erhalten.

Im Gegensatz zu medizinischen Studien müssen bei der Suche nach osteoporotischen Veränderungen an archäologischen Skeletserien einige Nachteile in Kauf genommen und methodische Schwierigkeiten bewältigt werden:

So ist an historischem Fundmaterial kein Patientenmonitoring möglich. Die mikrostrukturelle Organisation der Skeletreste stellt als einziger diagnostischer Parameter zunächst den status quo zum Sterbezeitpunkt dar. Das zu Grunde liegende prozesshafte Geschehen muss alleine daraus erschlossen werden.

Bei Krankheiten, die sich am Skelet manifestieren, besteht prinzipiell die Möglichkeit, dass die zum Sterbezeitpunkt vorliegenden Informationen überliefert werden. Beeinträchtigungen durch Dekompositionsprozesse während der Liegezeit des Materials entsprechen jedoch der Realität und können vor allem die Ergebnisse radiologischer Untersuchungsverfahren verfälschen (vgl. 5.4.). Dies gilt insbesondere für bodengelagerte Skelete.

Die möglichst genaue Kenntnis des Individualalters ist Voraussetzung für die Analyse altersabhängiger Knochenabbauphänomene. Ein diesbezügliches Problem, sämtlicher bisher im Zusammenhang mit Osteoporose an archäologischem Skelettmaterial

durchgeführten Studien, konnte mittlerweile zufriedenstellend gelöst werden. Seit einigen Jahren hat sich in der Anthropologie eine neue Methode der Altersbestimmung durch Zuwachsringe im Zahnwurzelzement etabliert, die eine Schätzung des Sterbealters mit einer Genauigkeit von ca. 2-3 Jahren zulässt (Grosskopf 1990), was als entscheidende Verbesserung gegenüber bisher angewandten morphologischen Verfahren angesehen werden muss. Dabei werden auf Querschnittspräparaten der Zahnwurzel ringförmige Strukturen in der Zementschicht gezählt, die sich im jährlichen Rhythmus auf Grund unterschiedlich dichter Materialanlagerung bilden. Abb. 3 zeigt die den Jahresringen eines Baumes prinzipiell vergleichbaren Strukturen.

Im Gegenzug darf nicht übersehen werden, dass auch die medizinische Grundlagenforschung der Osteoporose gewissen Einschränkungen und Problemen unterworfen ist, die archäologisches Material nicht betreffen.

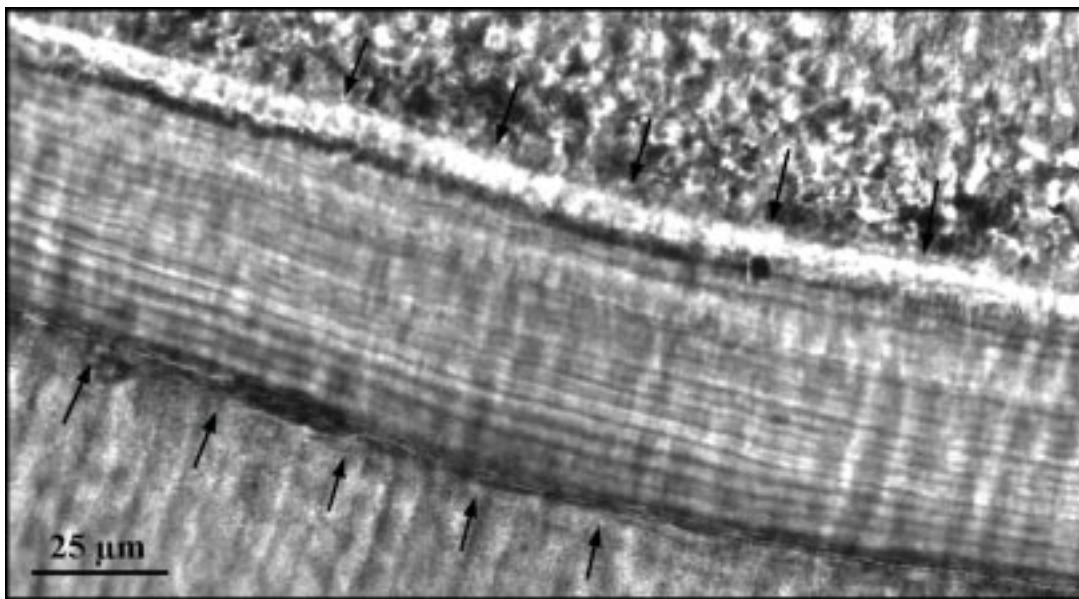


Abb. 3. Gräberfeld Altenerding. Mikrofotografie eines histologischen Querschnittspräparats der Zahnwurzel einer 30jährigen Frau. Oben rechts: Dentin. Unten links: Einschlussmittel. Pfeile weisen auf die Zementschicht mit den Ringstrukturen hin.

So dürfen Patienten bei Untersuchungen natürlich nur in einem möglichst geringen, ethisch vertretbaren Maße belastet werden. Nicht zuletzt aus diesem Grunde haben sich heute vor allem nicht-invasive, radiologische Verfahren wie DXA und die Computertomographie neben biochemischen Laboruntersuchungen durchgesetzt. Für Routinediagnostik und Präventionsuntersuchungen an Hand der Knochenmineraldichte bestens geeignet, erlauben sie allerdings keinen direkten Einblick in die tatsächlichen mikrostrukturellen Veränderungen des Knochengewebes. Nur wenn Indikationen zur Entnahme einer Knochenbiopsie vorliegen, können die zwar aussagekräftigen, aber aufwendigen histomorphometrischen Verfahren angewandt werden (vgl. 1.1.5.). Selbstverständlich muss dabei dem gesundheitlichen Wohlergehen des Patienten absolute Priorität vor wissenschaftlichen Interessen eingeräumt werden. So erlaubt zwar ein größerer Durchmesser des Biopsiezylinders einen besseren statistischen Ausschluss lokaler Variabilitäten der Knochenstruktur, stellt andererseits aber eine stärkere medizinische Belastung für den Patienten dar.

Aus medizinischen Gründen wird meist der Beckenkamm als Probenentnahmeort gewählt. Eine invasive Untersuchung der Wirbelsäule und des Oberschenkelknochens ist am lebenden Patienten nicht möglich, würde aber aus wissenschaftlicher Sicht wertvolle Informationen liefern. Dafür geeignete Studien an Sektionsmaterial sind mit erheblichen juristisch-ethischen, organisationstechnischen und finanziellen Problemen verbunden.

Bei der transiliakalen Beckenkammbiopsie am lebenden Patienten gelingt es selbst erfahrenen Operateuren nur in knapp zwei Drittel aller Fälle, den Biopsiezylinder komplett und gut erhalten zu entnehmen (Boivin und Meunier 1993). Als Folge kann die Auswertung beeinträchtigt oder, in seltenen Fällen, undurchführbar sein.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Erforschung osteoporoserelevanter Risikofaktoren im Rahmen medizinischer Studien resultiert aus der starken Heterogenität des Untersuchungsmaterials in den Industrieländern. Unabhängig davon, ob man sich mit Osteoporosepatienten oder Sektionsmaterial beschäftigt, man erhält stets ein Kollektiv verschiedener Individuen unterschiedlicher Herkunft mit z.T. drastisch variierenden Lebensgewohnheiten. Dies ist eine Folge unserer gut versorgten, vielfältig orientierten, multikulturellen und hochmobilen Gesellschaft. Eine Vereinheitlichung des Untersuchungsmaterials bezüglich der angesprochenen Parameter läßt sich nur ansatzweise, mit hohem Aufwand realisieren. Einerseits ist die genaue Recherche der Lebensumstände jedes Individuums nur sehr bedingt möglich, andererseits steht Untersuchungsmaterial nur in begrenztem Umfang zur Verfügung.

Angesichts solcher Probleme bietet sich in der Auswertung archäologischer Skeletserien eine große Chance, ihr Informationspotential sowohl für anthropologisch-sozialgeschichtliche Fragestellungen als auch für die Ursachenforschung der Osteoporose verfügbar zu machen.

Die Methodik der Histomorphometrie ist für diese Aufgabe das Verfahren der Wahl. Nicht nur, weil sie direkte Einblicke in die Mikrostruktur des Knochens gewährt, sondern auch, weil sie sich bei Verwendung geeigneter Parameter relativ robust gegenüber Dekompositionsartefakten verhält bzw. durch deren Identifizierbarkeit Fehlinterpretationen weitgehend ausschließt.

Die gute Eignung der Histomorphometrie wird unter anderem durch eine Studie der Universität Wien bestätigt, die invasive und nicht-invasive Verfahren zur Erfassung des altersbedingten Knochenmassenverlustes an neolithischen Skeletresten vergleicht (Kneissel 1993, Kneissel et al. 1994).

Das Skeletmaterial frühmittelalterlicher Reihengräberfelder ist für histomorphometrische Osteoporoseuntersuchungen prädestiniert. In der Regel stellt es Friedhofskollektive ehemals lebender Bevölkerungen dar. Konnten bei der archäologischen Bergung wesentliche Teile der Gräberfelder erfasst werden, so stehen meist Individuenzahlen zur Verfügung, die auch eine quantitative Auswertung von Ergebnissen zulassen. Da das Material keinen ausgesprochenen Seltenheitswert besitzt, erscheint auch die Anwendung invasiver Untersuchungsmethoden, in einem begrenzten Rahmen akzeptabel. Eine große Anzahl von Reihengräberfeldern wurde bereits ergraben und steht in Form magazinierten Skeletserien zur Verfügung.

Soweit es der Materialerhaltungszustand zulässt, können Knochenproben an den für Osteoporose besonders relevanten Skeletstellen entnommen werden. Auch die Entnahme mehrerer Proben an unterschiedlichen Stellen desselben Individuums ist hier im Vergleich zu lebenden Patienten unbedenklich. Die beprobten Skeletelemen-

te sind nicht von Weichgeweben überdeckt, was eine genau Lokalisation der Entnahmestelle ermöglicht. Im Gegensatz zu Biopsieproben an lebenden Patienten kann die Probengröße weitgehend frei gewählt werden.

Ethische Probleme ergeben sich allein aus der Frage nach der Störung der Totenruhe. Diese erfolgt vor allem bei der Bergung der Skelete, wenn entsprechende Grabanlagen, meist im Spannungsfeld ökonomischer Interessen, durch Baumaßnahmen zerstört werden. Die spätere Entnahme von Knochenproben an magaziniertem Skeletmaterial erscheint, unter der Voraussetzung einer pietätvollen Behandlung der menschlichen Überreste im Zuge einer sinnvollen, wissenschaftlichen Untersuchung, akzeptabel.

Die Methoden der Anthropologie, Umweltgeschichte und Archäologie haben in den letzten Jahrzehnten Möglichkeiten geschaffen, die Lebensbedingungen historischer Populationen zu rekonstruieren. Somit lassen sich erstaunlich detaillierte Aussagen über Sozialstruktur, Ernährungsweise und körperliche Belastung dieser Bevölkerungen machen. Da die frühmittelalterlichen Reihengräberfriedhöfe immer einer bestimmten Siedlung zugeordnet werden können, repräsentieren sie in aller Regel, zumindest was die erwachsenen Individuen betrifft, den Querschnitt einer lokalen Bevölkerung über mehrere Generationen. Bezüglich individueller Lifestyle-Faktoren sind diese historischen Skeletkollektive wesentlich homogener zusammengesetzt als viele im medizinischen Bereich untersuchte "Krankenhauspopulationen". Dadurch verbessern sich die Chancen, kausale Beziehungen zwischen Lebensumständen und Osteoporoseerkrankungen zu finden.

Gelingt es mit Methoden der Paläopathologie, osteoporotische Prozesse, post mortem, an Skeletmaterial aufzuspüren, so können die Befunde mit demographischen und archäologischen Daten verknüpft werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, interessante sozialgeschichtliche Fragestellungen zu erschließen:

Sozialstratigraphische Vergleiche können klären, ob bestimmte Sozialgruppen der Bevölkerung selektiv betroffen waren. Archäologische Datierungsmethoden der einzelnen Bestattungen eröffnen die Möglichkeit, chronologische Veränderungen im Auftreten osteoporotischer Prozesse zu verfolgen.

Sterbealtersbestimmungen an frühmittelalterlichen Skeletserien mit der Zahnwurzelzementmethode konnten zeigen, dass ein hohes Lebensalter in historischen Populationen viel öfter erreicht wurde als bisher angenommen (Cipriano-Bechtle 1994, Cipriano-Bechtle et al. 1996). Gerade ältere Menschen bilden die Risikogruppe für die so weit verbreiteten, primären Osteoporoseerkrankungen. Die gute Repräsentanz solcher Individuen in frühmittelalterlichen Skeletserien zieht unweigerlich die Frage nach Inzidenz und sozialer Relevanz osteoporotischer Erkrankungen für diese Bevölkerungen nach sich.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Untersuchung osteoporotischer Prozesse an archäologischem Skeletmaterial im Vergleich zur medizinischen Forschung mit Vor- und Nachteilen behaftet ist. Ein auf ihre Stärken abgestimmter Einsatz liefert wertvolle Informationen zu Prävalenz der Osteoporose in nicht künstlich selektierten Bevölkerungen ohne Prävention und Medikation, die zugleich von anthropologischer, sozialgeschichtlicher und medizinischer Relevanz sind.

1.3. Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, frühmittelalterliche Skeletserien mit histomorphometrischen Techniken unter dem Aspekt osteoporotischer Prozesse zu untersuchen. Dabei sollen Möglichkeiten gefunden werden, die bestehenden Methoden so einzusetzen, dass sich Osteoporoseprädispositionen auf Individuen- und Kollektivebene feststellen lassen. Im Vordergrund steht dabei nicht die Diagnose von einzelnen Fällen klinisch-manifester Osteoporose in archäologischen Skeletserien, sondern die Anwendung medizinischer Risikofaktorenkonzepte auf historische Bevölkerungen, so dass epidemiologischen Aspekten eine zeitlich Tiefe verliehen werden kann.

Die Untersuchungen werden an bodengelagertem Skeletmaterial zweier frühmittelalterlicher Reihengräberfelder durchgeführt. Der Einsatz der Zahnwurzelzementmethode soll erstmalig Osteoporoseuntersuchungen an historischen Individuen mit relativ genau bekanntem Sterbealter zulassen. Für eine der beiden Skeletserien liegt eine entsprechende Bestimmung bereits vor, am zweiten Untersuchungskollektiv muss sie im Rahmen dieser Arbeit noch durchgeführt werden. Dabei soll die Zahnwurzelzementmethode von konventioneller Mikrofotografie auf digitale Bildverarbeitung umgestellt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die möglichst konsequente, gleichzeitige histomorphometrische Untersuchung von vier verschiedenen Skeletelementen bei jedem Individuum. Eine Berücksichtigung der realen Überlieferungsverhältnisse bodengelagerter Skeletserien ist dabei essenziell. So müssen Techniken gefunden werden, liegezeitlich bedingte Dekompositiosartefakte zu beseitigen bzw. ihren verfälschenden Einfluss auf Ergebnisse zu verhindern. Dies beinhaltet die experimentelle Auswahl geeigneter Reinigungsverfahren, Einbettungs-, Schneide- und Färbetechniken bei der Herstellung der Präparate.

Histomorphometrische Messparameter, die sich gegenüber diagenetischen Veränderungen als so empfindlich erweisen, dass ihre Erfassung bei vielen Individuen in Frage gestellt ist, sind durch geeignetere zu ersetzen. Nur auf diese Weise lässt sich die Vergleichbarkeit der Messwerte bei einer großen Individuenzahl und somit eine quantitative Auswertbarkeit der Ergebnisse sichern.

Die altersabhängigen Verläufe histomorphometrischer Parameter beider Kollektive sollen erfasst und den Ergebnissen anderer Studien gegenübergestellt werden. Ein Vergleich der Parameterwerte mit Referenzdaten aus dem medizinischen Bereich bietet sich an, erfordert aber die Suche nach einer geeigneten Transformationsmöglichkeit der Ergebnisse auf die medizinischen Untersuchungen zu Grunde liegenden Messbedingungen.

Ziel ist es, für alle vier Skeletelemente histomorphometrische Parameter zu finden, die auch an bodengelagertem Material zuverlässig erfassbar sind und welche knochenatrophische Phänomene während des Alterungsprozesses deutlich widerspiegeln. Sobald dies gelingt, soll ein Verfahren entwickelt werden, mit dem sich die hohe individuelle Variabilität histomorphometrischer Messdaten, durch Kombination der Informationen aller vier Skeletelemente eines Individuums, nivellieren lässt. Ein entsprechender Kennwert soll gewissermaßen den Durchschnitt aller Aussagen der

verschiedenen Parameter zum Status der Knochenstruktur eines Individuums bereithalten. Festzulegen ab welchen Grenzwerten dabei von einer im medizinischen Sinne klinisch manifesten Osteoporose gesprochen werden muss, ist unter den gegebenen Bedingungen kaum möglich und nicht Ziel dieser Arbeit.

Um das Potenzial archäologischen Skelettmaterials sinnvoll ausnutzen zu können, soll nach Möglichkeiten gesucht werden, Individuen, deren Kennwerte, im Vergleich zum altersspezifischen Trend im Untersuchungskollektiv, eher auf osteoporotische Tendenzen hinweisen, von solchen mit gegensätzlichem Verhalten zu unterscheiden. Ziel ist es, den osteoporotischen Status eines Individuums an Hand der Abweichung seiner Kennwerte von der Altersnorm quantitativ abschätzen zu können. Ein solches Verfahren eröffnet die Chance, an historischen Bevölkerungen Untersuchungen im Sinne des Risikofaktorenkonzeptes der Osteoporose durchzuführen. Prinzipiell könnte man versuchen, bei Individuen, die innerhalb des Kollektivs unter die Altersnorm fallen und solchen die darüber liegen, Anhaltspunkte für das Wirken unterschiedlicher Lifestyle-Faktoren zu finden.

Des Weiteren soll ein Weg gefunden werden, den altersabhängigen Verlauf der Kennwerte bei verschiedenen Bevölkerungen zu vergleichen.

Da im Rahmen dieser Arbeit insgesamt mehrere tausend histologische Präparate zur Auswertung anstehen, soll der Einsatz digitaler Bildverarbeitungstechniken helfen, den Arbeitsaufwand in akzeptablen Grenzen zu halten. Da kommerzielle Bildanalysesysteme aus dem medizinischen Bereich nicht zur Verfügung stehen, ist es nötig, die Eignung verfügbarer Verfahren zur digitalen Bilderfassung experimentell zu prüfen. Für die Bildanalyse muss frei erhältliche Software den Erfordernissen der Histomorphometrie angepasst werden. Die damit verbundene Kenntnis der genauen Programmabläufe könnte sich durchaus als hilfreich erweisen.

Insgesamt soll die Entwicklung geeigneter Vorgehensweisen an einem der beiden Untersuchungskollektive erfolgen. Sobald eine quasi standardisierte Form vorliegt, kann sie auf das gesamte Material angewandt werden. Dabei wird sich zeigen, ob trotz der dekompositionsbedingten Widrigkeiten der anthropologischen Praxis, eine Anwendbarkeit auf weitere Untersuchungskollektive gegeben ist.

2. Material

Die Untersuchungen wurden an bodengelagertem Skeletmaterial von zwei frühmittelalterlichen Gräberfeldern durchgeführt. Dabei handelt es sich um die Reihengräberfriedhöfen von Wenigumstadt, Landkreis Aschaffenburg, Regierungsbezirk Unterfranken und Altenerding, Landkreis Erding, Regierungsbezirk Oberbayern. Das Wenigumstadter Untersuchungskollektiv diente zur Entwicklung der methodischen Vorgehensweise, welche schließlich auch auf das Altenerdinger Kollektiv angewandt wurde.

Die Belegungsphase des Wenigumstadter Gräberfeldes erstreckt sich vom zweiten Drittel des 5. Jahrhunderts bis in das 8. Jahrhundert. Der Landstrich gehört bis zur fränkischen Expansion um 500 n. Chr. zum alamannischen Stammesgebiet. Auf eine frühe, völkerwanderungszeitliche Nutzung des Gräberfeldes mit 15 festgestellten Bestattungen folgt eine völlige Belegungsunterbrechung etwa in der Zeit zwischen 500 und 540, ehe das Friedhofsareal, vermutlich von Neusiedlern, wieder zur Bestattung ihrer Toten verwendet wird (Stauch, in Vorbereitung).

Seit Anfang der 70er Jahre konnten weite Teile des Gräberfeldes in mehreren archäologischen Kampagnen ergraben werden. Schätzungsweise sind mindestens 40% des Gräberareales erfasst worden, wobei 304 menschliche Bestattungen und 4 Tierbestattungen festgestellt wurden. Mit Ausnahme von neun Brandgräbern handelt es sich um Körperbestattungen mit vorzugsweiser Ost-West-Ausrichtung der Grabgruben. Die zugehörige Siedlung ist unbekannt, wird aber auf Grund der topographischen Situation unter dem Dorfkern der Ortschaft Wenigumstadt vermutet (Stauch, in Vorbereitung). Vorsichtigen Schätzungen zu Folge kann eine Bevölkerung von durchschnittlich 90-100 Individuen angenommen werden. Die archäologische Auswertung des Gräberfeldes erfolgte durch Frau Dr. Eva Stauch (Institut für Vor- und Frühgeschichte, Universität Würzburg / Vorgeschichtliches Seminar der Universität Marburg). Entsprechende Publikationen sind in Vorbereitung.

Das Skeletmaterial des Wenigumstadter Gräberfeldes befindet sich in der anthropologischen Staatssammlung München, wo es wissenschaftlich bearbeitet wird. Der Erhaltungszustand der menschlichen Skelete kann als durchschnittlich bezeichnet werden. Eine hohe Zahl überlieferter Kinderskelete und die gute Repräsentanz aller Altersklassen machen die Wenigumstadter Skeletserie zu einer wertvollen Materialsammlung, auf die bereits in mehreren Untersuchungen zurückgegriffen wurde: So konnte bei 258 Skeleten das morphologische Sterbealter und bei vielen erwachsenen Individuen das Geschlecht bestimmt werden (Schröter, unveröffentlicht). Cipriano-Bechtle (1994) nahm eine histologische Sterbealtersbestimmung nach der Zahnwurzelzementmethode vor und konnte einen Anteil von 20% übersechzigjähriger Individuen in der Wenigumstadter Bevölkerung feststellen. Des Weiteren folgten Untersuchungen von postmortalen Knochenverletzungen, die auf Grabraub zurückgeführt werden (Beilner 1994, Beilner und Grupe 1996), die Erfassung von Aktivitätsmustern (Bergner 1994), eine Pilotstudie zur Abschätzung der Osteoporosehäufigkeit (Morosow 1996), Vergleiche dentaler Abrasionsspuren mittels Microwearanalyse (Gügel 1998) und eine Studie zu den Lebensbedingungen der Wenigumstadter Kinder (Dittmann 1999).

Die Belegungsphase des Altenerdinger Gräberfeldes erstreckt sich vom Ende des 5. bis zum Ende des 7. Jahrhunderts und fällt somit in eine Zeit noch vor der bisher angenommenen Landnahme der Bajuwaren (Helmuth 1977). Bei verschiedenen Notbergungen und archäologischen Grabungskampagnen zwischen 1965 und 1973 wurden insgesamt 1327 Bestattungen festgestellt. Alter und Geschlecht ließen sich noch bei 834 Individuen bestimmen (Helmuth et al. 1996). Eine planmäßige Ausgrabung des Gräberfeldes erfolgte zwischen 1967 und 1973 durch das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege unter der Leitung von Herrn Dr. Walter Sage.

Die ehemalige Friedhofsgröße wird auf 2200 bis 2300 Individuen geschätzt, die Größe einer zugehörigen Siedlung mit 250 bis 300 Personen angenommen (Helmuth 1977, Helmuth et al. 1996, Sage 1984). Man geht mittlerweile davon aus, dass der Reihengräberfriedhof trotz seiner ungewöhnlichen Größe nur zu einer einzelnen Ortschaft mit überregionaler Bedeutung im Sempttal zugeordnet werden muss. Unterstützt wird diese Annahme durch die ungewöhnlich hohe Anzahl weiterer Reihengräberfelder, die für eine generell sehr hohe Siedlungsdichte in der Region sprechen. Die Existenz einer Römerstraße mag zu einer dichten Besiedlung beigetragen haben. Voraussetzungen hierfür waren durch das Vorhandensein fruchtbarer Alm- bzw. Rieselkalkböden gegeben, deren hoher Kalkgehalt auch für den relativ guten Erhaltungszustand der Skelete verantwortlich ist (Sage 1974, 1984). Das Altenerdinger Skeletmaterial ist ebenfalls zu wissenschaftlichen Bearbeitung in der Anthropologischen Staatssammlung München magaziniert.

Die Publikation aller Funde und Befunde des Altenerdinger Gräberfeldes ist noch nicht endgültig abgeschlossen. Ausführliche Einsichten in die archäologische Fundsituation findet man bei Sage (1984). Ergebnisse anthropologischer Untersuchungen sind bei Helmut et al. (1996) beschrieben. Außerdem erfolgten am Altenerdinger Skeletmaterial Untersuchungen zur Ernährungsrekonstruktion mittels Spurenelementanalyse (Grupe 1990, Siegert 1993), histomorphometrische Analysen von Knochencompacta (Turban-Just 1993, Turban-Just und Grupe 1995) und paläopathologische Betrachtungen zur Kindersterblichkeit im frühen Mittelalter (Zink 1998).

Für die geplanten Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden von beiden Gräberfeldern einzelne Skelete nach folgendem Kriterienkatalog ausgewählt:

Bei jedem Individuum musste die Möglichkeit zur Entnahme von Knochenproben aus genau definierten Regionen des Beckens, der Lendenwirbelsäule, der Rippen und des Oberschenkelknochens gewährleistet sein (vgl 3.2.). In Frage kamen nur Individuen, bei denen eine sichere morphologische Alters- und Geschlechtsdiagnose möglich war. Gemäß den Zielen dieser Arbeit wurden ausschließlich Individuen der Altersklassen adult, matur und senil berücksichtigt. Eine Aufnahme in die Untersuchungskollektive konnte nur erfolgen, wenn eine glaubwürdige Altersbestimmung nach der Zahnwurzelzementmethode an einem Prämolaren erfolgreich durchgeführt werden konnte.

Beim Wenigumstadter Material erfüllten 67 Skelete alle Forderungen gleichzeitig. Konkret handelt es sich dabei um 36 weibliche und 31 männliche Individuen, deren Sterbealter, bestimmt nach der Zahnwurzelzementmethode, zwischen 18 und 77 Jahren liegt (Cipriano-Bechtle 1994). Sie bilden das Wenigumstadter Untersuchungskollektiv.

Bei der Skeletserie von Altenerding, wurde auf Individuen, welche nach morphologischen Kriterien offensichtlich der frühadulten Altersklasse zuzuordnen waren, verzichtet. Das Altenerdinger Untersuchungskollektiv besteht aus 82 Skeleten. Darunter sind 37 Frauen und 45 Männer, deren nach der Zahnwurzelzementmethode bestimmtes Sterbealter zwischen 24 und 82 Jahren liegt.

Zusammen mit den Altenerdinger Individuen, die auf Grund von Unsicherheiten bei der Sterbealtersbestimmung nicht in das Untersuchungskollektiv aufgenommen werden konnten, wurden 176 Skelete bzw. Zähne histologisch untersucht. Insgesamt mussten dazu etwa 2000 histologische Schnittpräparate hergestellt werden.

3. Methoden

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit verlangt die Entwicklung verschiedener, speziell auf die Anforderungen von bodengelagertem, archäologischen Skeletmaterial abgestimmter Vorgehensweisen zur histomorphometrischen Erfassung osteoporotischer Krankheitsprozesse.

Dazu musste ein standardisiertes Untersuchungskonzept in zahlreichen Vorversuchen, durch die Auswertung gesammelter Erfahrungen, die Wahl bzw. Entwicklung geeigneter Messparameter und das Erdenken informationsschaffender Auswertungsverfahren erarbeitet werden. Im Folgenden wird die endgültige Verfahrensweise dargestellt, die im Rahmen dieser Arbeit auf beide Untersuchungskollektive angewandt wurde und prinzipiell auf weitere Skeletserien übertragen werden kann.

Eine ausführliche Erklärung und Begründung der methodischen Details, die Diskussion von Schwierigkeiten und Problemen sowie die Auseinandersetzung mit verworfenen Strategien und Alternativverfahren erfolgt in Kapitel 5.

3.1. Entnahme von Prämolaren zur Sterbealtersbestimmung

Eine Sterbealtersbestimmung über jährliche Zuwachsringe im Zahnwurzelzement lag für das Wenigumstadter Skeletmaterial bereits vor (Cipriano-Bechtle 1994, Cipriano-Bechtle et al. 1996). Aus Gründen der Vergleichbarkeit musste sie für das Altenerdinger Untersuchungskollektiv in möglichst analoger Weise durchgeführt werden.

So wurde bei 48 weiblichen und 61 männlichen, potenziell für die histomorphometrischen Untersuchungen geeigneten Altenerdinger Individuen jeweils ein Prämolare entnommen. Berücksichtigung fanden nur Zähne, bei denen keine makroskopischen Anhaltspunkte für Zahnerkrankungen oder Erkrankungen des Zahnhalteapparates vorlagen. Insbesondere Hinweise auf Parodontose oder Parodontitis sowie deutlich sichtbare Zahnsteinbildung fungierten als Ausschlusskriterien. Wegen geringerer Variabilitäten beim Durchbruchstermin (Adler 1967) wurden erste Prämolaren den zweiten vorgezogen.

3.2. Entnahme von Knochenproben

Bei allen Individuen wurde jeweils eine Knochenprobe aus Oberschenkelknochen, Rippe, Beckenkamm und Lendenwirbelkörper entnommen.

Rippenproben von ca. 1 cm Länge erhielt man durch transversale Schnitte im lateralen Bereich der 6. bis 11. Rippe mittels einer Bandsäge (Fa. METABO, bestückt mit Metallsägeblatt Nr. 27644). Makroskopisch erkennbare Muskelansatzstellen blieben ausgespart.

Zylinderförmige Spongiosaproben aus Lendenwirbelkörper und Beckenkamm wurden mittels einer eigens für diesen Zweck konstruierten Hohlfräse gewonnen. Sie besteht aus einem dünnwandigen Edelstahlrohr mit einem Durchmesser von 18 mm.

Über ein gedrehtes Kopfstück aus Stahl wird die Fräse von einer handelsüblichen Säulenbohrmaschine aufgenommen. Der Fräskopf trägt 24 Zähne von ca. 2 mm Länge, deren Schrängung in Vorversuchen so optimiert werden konnte, dass die feinen Knochenbälkchen allenfalls an der äußersten Peripherie des ausgefrästen Spongiosazylinders beschädigt wurden.

Zur Gewinnung von Probenzylindern aus dem Lendenwirbelsäulenbereich wurde vorzugsweise der 4. Lendenwirbelkörper zentral von cranial nach caudal bei 2500 U/min. mit der Hohlfräse durchbohrt.

Um Vergleichsmöglichkeiten zu haben, wählte man am Becken eine Entnahmestelle, die der medizinisch angewandten transiliakalen Beckenkammbiopsie entspricht. Sie liegt 2 cm posterior der Spina iliaca anterior superior und 2 cm unterhalb des Beckenkammes (z.B. Chavassieux et al. 1985, Podenphant u. Engel 1987). Die Probe wurde jeweils in Form eines transiliakalen Spongiosazylinders, möglichst aus der rechten Darmbeinschaukel, entnommen. Trotz der Invasivität des Verfahrens bleibt die morphologische Gestalt der beprobten Skeletelemente weitestgehend erhalten.

Zur Beprobung der wesentlich widerstandsfähigeren Oberschenkelcompacta wurde auf eine käufliche Metallhohlfräse (20 mm, Fa. Nicolson) zurückgegriffen, bei welcher der Zentrierbohrer demontiert werden musste. Die Fräse wird ebenfalls von einer handelsüblichen Säulenbohrmaschine aufgenommen und bei 2500 U/min. betrieben.

Femurcompacta wurde so als Bohrzylinder aus der vorzugsweise rechten Diaphysenmitte, möglichst anterior, entnommen. Dazu musste der Mittelpunkt der Diaphyse auf Grundlage der größten Caput-Condylenlänge festgelegt werden. Im Bereich der Probeentnahmestelle wurde auf der Knochenoberfläche die Längsrichtung des Oberschenkelknochens mit Folienstift (Lumocolor 313 grün, permanent, Fa. Staedtler) markiert, um sich bei der späteren Anfertigung von Querschnitten daran orientieren zu können. Der Farbstoff des Stiftes zeigte sich gegenüber dem zur Einbettung verwendeten Kunstharz inert.

Bei der Probenentnahme musste der Knochenschaft nur in der ventralen Hälfte durchbohrt werden. Vor allem der dorsale Bereich mit der Linea aspera blieb unangetastet und verleiht dem Knochen so weiterhin Stabilität und seine ursprüngliche Gestalt.

3.3. Reinigung spongiöser Knochenproben

Häufig in intertrabekuläre Hohlräume eingespülte Bodensedimente können eine histomorphometrische Auswertung massiv behindern. Daher wurden alle spongiösen Knochenproben vor der Einbettung einer Reinigungsprozedur unterzogen:

Die Spongiosazylinder wurden jeweils in geeignete Behälter überführt, für eine Stunde in Leitungswasser auf einem Schüttler (IKA-VIBRAX-VXR, Fa. Janke & Kunkel GmbH u. CoKG) gewässert und dabei ausgespülte Sedimente abgegossen. Nach Austausch des Wassers behandelte man die Proben dreimal für je 15 Minuten im Ultraschallbad (Fa. Bachofer, Reutlingen). Freigesetzte Sedimente konnten dabei jeweils durch einen erneuten Wasseraustausch entfernt werden. Mit einem scharfen, dünnen Wasserstrahl wurden schließlich die Hohlräume der Probenzylinder von stärker anhaftenden Sedimenten befreit. Ein über einen dehnbaren Kunststoffschlauch mit der Wasserleitung verbundenes, zur Kapillare ausgezogenes Glasrohr diente dabei als Düse. Der Wasserdruck konnte auf der Grundlage von in Vorversuchen gewonnenen Erfahrungen so reguliert werden, dass die empfindlichen Knochenbälkchen nicht beschädigt wurden.

3.4. Herstellung histologischer Dünnschnittpräparate

Die Einbettung der Zähne und Knochenproben erfolgte mit dem Epoxidharz BIODUR E 12 (Fa. Gunther von Hagens, Heidelberg). Handelsübliche Kleinbildfilmdosen aus Hochdruckpolyethylen dienten dabei als Einbettungsgefäße. Um das Eindringen des Harzes in die feinen Hohlräume der Spongiosa zu erleichtern, wurde der Anteil des Härterers BIODUR E 1 von üblichen 28% auf 20% verringert. Experimente konnten zeigen, dass ein vollständiges Aushärten des Harzes noch bis zu einem Härteranteil von 18%, bei längerer Härtungsdauer, gewährleistet ist (Lillegraven 1995). Alle Prämolaren wurden mit 28% Härteranteil eingebettet.

Die frisch eingeschlossenen Materialproben wurden bei einem Unterdruck von -0,7 bar 24 Stunden lang im Exsikkator evakuiert und somit weitgehend von eingeschlossenen Luftblasen befreit. Eine Weiterverarbeitung erfolgte nach einer Gesamthärtungszeit von mindestens 120 Stunden bei Raumtemperatur.

Von dem eingebetteten Material wurden mit einem Innenlochsägemikrotom (Sägemikrotom 1600, Fa. Leitz) unter Wasserkühlung Dünnschnitte hergestellt. Bei spongiösen Präparaten aus Lendenwirbelkörper und Beckenkamm musste aus Gründen der Vergleichbarkeit eine konstante Schnittdicke von 100 µm genau eingehalten werden (vgl. 5.3.).

Die zylinderförmigen Proben beider Skeletelemente wurden senkrecht zur Längsachse des Zylinders, genau mittig angeschnitten, wobei sich die Mitte aus der kürzesten Längsausdehnung der Proben berechnete. Das Sägeblatt des Mikrotoms hat eine Dicke von 300 µm. Somit lag der erste Schnitt ca. 150 µm unter der Anschnittsebene, der zweite Schnitt weitere 400 µm tiefer. Von sämtlichen spongiösen Knochenproben wurden jeweils mindestens zwei Schnitte angefertigt. Die vertikale

proben wurden jeweils mindestens zwei Schnitte angefertigt. Die vertikale Lage der verschiedenen Schnittebenen wurde auf den Präparaten vermerkt.

Die Schnittdicke bei der Verarbeitung der Compactproben aus Rippe und Oberschenkelknochen betrug 75 µm. Von beiden Skeletelementen wurden jeweils mindestens zwei Querschnittspräparate gefertigt.

Während die Morphologie der entnommenen Rippenstücke die Querschnittsebene klar erkennen ließen, musste man sich bei den scheibenförmigen Compactproben der Femurdiaphysen an der eingezeichneten Längsrichtung des Knochens orientieren.

Die eingebetteten Zähne wurden im kronennahen Drittel der Zahnwurzel querschnitten. Die Schnittdicke betrug 75 µm. Unmittelbar nach jedem Schnitt erfolgte eine mikroskopische Qualitätskontrolle (Labormikroskop, Fa. Krüss Optronic). Von jedem Zahn wurden nach Möglichkeit 4-6 auswertbare Präparate mit erkennbaren Zuwachsringen in der Zementschicht hergestellt.

Um die Kontrastierung zwischen Markräumen und Knochensubstanz für die automatische Bildanalyse zu erhöhen, wurden alle Spongiosapräparate und die Rippendünnsschnitte einer Silberfärbung nach von Kossa (Romeis 1989) unterzogen.

Als Färbekammern dienten würfelförmige Kunststoffbehälter. Sie wurden mit jeweils 9, nebeneinander aufrecht stehenden Kleinbildfilmdosen bestückt. Der Boden- und Seitenbereich der Filmdosen war mit 8-10 4 mm weiten Bohrungen versehen, durch die das Färbemedium ein- und austreten konnte. Im Färbetrieb nahm jede Filmdose bis zu 6 Knochendünnsschnitte auf. Jeder Schnitt wurde zuvor im Bereich des Einschlussmittels mit Folienstift (Lumocolor 313 grün, permanent, Fa. Staedtler) beschriftet. Der Farbstoff zeigte sich gegenüber den Färbereagenzien inert. Bei jedem neuen Färbeschritt wurden die Filmdosen mit den empfindlichen Schnitten einfach in eine neue Färbekammer überführt, die das neue Medium enthielt. Das Volumen der eingesetzten Färbelösungen betrug ca. 300 ml. Alle Lösungen mussten nach 60-80 Schnitten gewechselt werden.

Die ursprüngliche Färbevorschrift (Romeis 1989) wurde leicht abgewandelt: Die mit Dünnsschnitten beladenen Filmdosen wurden bei Dunkelheit für 40 Minuten in 5% Sibernitratlösung eingestellt, in demineralisiertem Wasser gespült und kurz mit Leitungswasser gewaschen.

Die Entwicklung der Färbung erfolgte durch 2 minütiges Einstellen in eine Lösung aus 15 g Natriumcarbonat, 75 ml 37% Formalin und 225 ml Wasser. Nach Spülung in demineralisiertem Wasser wurde 2 Minuten in 5% Natriumthiosulfatlösung fixiert. Die Filmdosen mit den Schnitten wurden kurz mit Leitungswasser gewaschen, mit demineralisiertem Wasser gespült und in großen Glasschalen an der Luft getrocknet.

Alle Dünnsschnitte wurden mit dem Kunstharzklebstoff EUKITT (Fa. Kindler GmbH & Co, Reiburg) auf Objektträger (76 x 26 x 1, Fa. Menzel-Gläser) aufgezo-gen und mit Deckgläsern (22 x 22 x 0.14, Fa. Menzel-Gläser) bedeckt.

3.5. Digitale Erfassung der histologischen Präparate

Alle histologischen Präparate wurden durch ein Forschungsmikroskop (OPTIPHOT 2, Fa. Nikon) betrachtet. Das Gerät war mit Fototubus und einer Fotoeinrichtung (Microflex AFX-DX, Fa. Nikon) ausgerüstet, auf die eine digitale Kamera (N 90s, Fa. Nikon, ausgerüstet mit DCS 460, Fa. Kodak), ohne Objektiv, montiert werden konnte. Der Fototubus enthielt bei sämtlichen Aufnahmen ein Fotookular mit 2-facher Vergrößerung. Die Microflexfotoeinrichtung diente lediglich zur Aufnahme der Digitalkamera. Die Belichtungssteuerung wurde bei geöffneter Fototubusblende von der Programmautomatik (Einstellung P) der Kamera übernommen. Es erfolgte eine permanente Belichtungskorrektur um + 1,7 Belichtungseinheiten.

Für die Aufnahmen silbergefärbter Spongiosapräparate des Beckens und der Lendenwirbelkörper sowie ungefärbter Präparate der Oberschenkelknochencompacta wurde eine 4-fache Objektivvergrößerung (E 4/0,1 Fa. Nikon) gewählt. Daraus resultierte eine reale Bildausschnittsfläche von $7,35 \text{ mm}^2$, welche digitalisiert werden konnte.

Die Zahnpräparate wurden bei 40-facher Objektivvergrößerung (E Plan 40/0,65 Phasenkontrast, Fa. Nikon) digital mikrofotografiert. Durch eine exzentrische Verschiebung der Kondensorblende konnte eine Art Schieflichtbeleuchtung realisiert werden, die eine Kontrasterhöhung der Zementringe bewirkte. Auf den mehrfach beschriebenen Einsatz verschiedener Phasenringe (Großkopf 1990, Cipriano-Bechtle 1994) wurde verzichtet.

Die Digitalkamera war zur Zwischenspeicherung der Bilder mit einer 340 MB Festplatte bestückt. Ausgelesen wurden die Kamerabilder mittels verschiedener PlugIn's (Kodak DCS Aquire, Version 4.1.1 bis 5.5.10) für das kommerzielle Bildbearbeitungsprogramm PHOTOSHOP, Fa. Adobe (Version 4.0 bis 5.0) auf Macintosh- oder PC-Plattformen. Verwendet wurden, je nach Verfügbarkeit, unterschiedliche Rechnertypen mit mindestens 120 MHz Taktfrequenz und mindestens 64 MB RAM.

Alle Bilder wurden mit einer Auflösung von 300 dpi in die Computer übertragen, unter Beibehalt von Farbinformation und Auflösung auf eine Bildgröße von 12,00 cm x 7,98 cm heruntergerechnet und als unkomprimierte TIFF-Dateien im PC-Format gespeichert. Hieraus resultieren Bilddateien mit einer Größe von 3,82 MB.

Eine Digitalisierung der histologischen Rippenpräparate erfolgte mittels eines Flachbettscanners (SUPERVISTA S 12, Fa. Umax) der mit einem Transparenzaufsatz ausgerüstet war. Verbunden war der Scanner mit einem Power Macintosh 7600/120. Es kam die Scannersoftware UMAX VISTA SCAN 2.4D als PlugIn unter Adobe Phototshop 4.0 zum Einsatz.

Die silbergefärbten Präparate wurden mit der Objektträgerseite nach unten auf die Glasplatte des Scanners gelegt und der gesamte Rippenquerschnitt im Durchlichtmodus bei einer interpolierten Auflösung von 2400 dpi als Graustufenbilder eingescant. Die Parametereinstellungen der Scannersoftware (Lichter: 200, Tiefen: 20, Gamma: 1,2) blieben bei allen Präparaten konstant. Die Bilddateien wurden im unkomprimierten TIFF-Format für PC gespeichert.

3.6. Computerunterstützte Analyse der Zuwachsringe im Zahnwurzelzement zur Sterbealtersbestimmung

Basierte die von Cipriano-Bechtle (1994) auf die Wenigumstadter Skelet-serie angewandte Methode noch auf konventioneller Fotografie, so wurde die Auswertung der Altenerdinger Zahnwurzelpräparate ganz auf digitale Fototechnik und computergestützte Bildschirmauswertung umgestellt.

Beim Altenerdinger Untersuchungskollektiv wurden für jeden Zahn vier digitale Mikrofotografien (vgl. 3.5.) von möglichst verschiedenen Schnitten angefertigt. Alle Aufnahmen mussten die Dentin-Zement-Grenze und die komplette Breite der Zementschicht, in einem Bereich erkennbarer Ringbildung zeigen. Die Bearbeitung der Originalbilder wurde mit dem Bildbearbeitungsprogramm Adobe PHOTOSHOP (Version 4.0 bis 5.5) unter Verwendung der Menüfunktion Gradationskurven durchgeführt. Einer automatischen Anpassung auf Grundlage berechneter Histogramme durch die AUTO-Option folgte eine subjektive Kurvenanpassung durch den Bearbeiter mit dem Ziel einer zählungstechnisch wünschenswerten Kontraststeigerung.

Auf jedem der vier Bilder eines Zahnes wurde die Anzahl der Zementringe dreimal ermittelt. Die Zählungen erfolgten direkt am Bildschirm, jeweils nach Neubearbeitung der Originalbilder. Dabei wurden die insgesamt 12 Zählungen an den Bildern eines Zahnes in größeren zeitlichen Abständen voneinander, ohne Kenntnis vorausgegangener Zählergebnisse, durchgeführt.

Dank des hohen Auflösungsvermögens der digitalen Methodik konnten bei fast allen Zähnen durchschnittlich 3-4 sog. präeruptive Zementringe beobachtet werden. Sie entstehen noch während der Zahnentwicklung vor der Dentition (Kagerer, in Vorbereitung) und gingen daher nicht in die Altersberechnung ein. Soweit sie bei der Wenigumstadter Skeletserie erkennbar waren, wurden sie auch dort nicht berücksichtigt (Cipriano, persönliche Mitteilung).

Von der Verwertung ausgeschlossen blieben Zähne, bei denen der Variationskoeffizient aller 12 Zählungen 15% überstieg. Die Ergebnisse der Einzelzählungen eines Zahnes wurden aufsummiert und der Durchschnitt mit dem mittleren Durchbruchsalter nach Adler (Adler 1967) verrechnet. Diese Angaben dienten bereits für die Wenigumstadter Serie als Berechnungsgrundlage. Das auf ganze Jahre gerundete Ergebnis darf als gute Näherung für das Sterbealter des Individuums betrachtet werden (Großkopf 1990, Cipriano-Bechtle 1994, Cipriano-Bechtle et al. 1996).

Die so ermittelten Altersdaten wurden jeweils mit dem nach morphologischen Kriterien bestimmten Sterbealter verglichen. Grundlage hierfür waren die Untersuchungen von Helmuth (Sage 1984) und eigene Altersschätzungen, die auf Obliterationsgrad der Schädelnähte, Epiphysenverschluss und Beurteilung des Zustandes der Schambeinsymphyse (zusammengefaßt bei Herrmann et al. 1990) beruhten. In einigen Fällen schien eine von den Untersuchungsergebnissen Helmuths abweichende Einschätzung des morphologischen Sterbealters angebracht, was durch weitere Gutachten (Staskiewicz und Schweissing, persönliche Mitteilung) bestätigt werden konnten.

Individuen, bei denen sich ein Widerspruch zwischen histologisch und morphologisch bestimmten Sterbealter zeigte, wurden nicht in das Untersuchungskollektiv aufgenommen. Ebenso wurde mit Fällen verfahren, bei denen offensichtlich

Doublingartefakte der Zementzuwachsringe (Großkopf 1990, Cipriano-Bechtle et al. 1996) auftraten.

3.7. Computerunterstützte histomorphometrische Auswertung der Knochenpräparate

Alle digitalen Bilder der histologischen Knochenpräparate wurden durch Nachbearbeitung mit dem kommerziellen Bildbearbeitungsprogramm Adobe PHOTOSHOP (Version 4.0 bis 5.5) an die Erfordernisse der gewünschten Parametermessungen angepasst. Die eigentliche histomorphometrische Analyse erfolgte mit einem wissenschaftlichen Bildanalyseprogramm (NIH IMAGE Version 1.61; entwickelt an U.S. National Institutes of Health), das frei über Internet (<http://rsb.info.nih.gov/nih-image/>) erhältlich ist. Ursprünglich zur Bildanalyse von Gelen auf Macintoshrechnern entwickelt, kann es unter anderem auch Flächen und Umfänge von Bildobjekten messen. Eine umfangreiche, pascalähnliche Macroprogrammiersprache gestattet es den Benutzern, die Fähigkeiten des Programms auch für sehr spezielle Fragestellungen einzusetzen und eigene Berechnungsmodi gemessener Werte zu programmieren. Die bisher erhältlichen PC-Versionen des Programmes enthielten so erhebliche Fehler, dass die histomorphometrische Bildanalyse ausschließlich auf Macintoshrechnern (Power Macintosh 7600/120) durchgeführt werden musste.

Auswertung von Becken- und Wirbelkörperspongiosa

Von jedem der beiden Skeletelemente wurden bei allen Individuen nach Möglichkeit acht digitale Mikrofotografien der histologischen Präparate ausgewertet. Vier Bilder entstammen dabei jeweils der ersten und vier weitere der zweiten Schnittebene (vgl. 3.4.). Daraus resultiert pro Skeletelement eine Gesamtuntersuchungsfläche von 58,80 mm². In einigen Fällen starker Probenkontamination durch eingespülte Sedimente musste man sich mit einer geringeren Anzahl von Bildern pro Schnittebene zufrieden geben.

Die runde Fläche aller Querschnittspräparate wurde gedanklich in vier, im Uhrzeigersinn nummerierte Kreissektoren unterteilt. Startpunkt war jeweils der linke, obere Sektor (Abb. 4).

Aus dem Bildtitel ließ sich die Position der Aufnahme bestmöglich rekonstruieren. Er hatte folgendes Format: Grabnummer / Schnittebene - Bilderanzahl pro Schnittebene - Sektor des Präparates. Um eine PC-Lesbarkeit der Bildtitel zu gewährleisten wurde der Schrägstrich bei den Bildern des Altnerdingen Untersuchungskollektivs durch ein kleinschriebenes x ersetzt.

In Adobe PHOTOSHOP wurden die Digitalbilder durch die erwähnte Verkleinerung (vgl. 3.5.) und zusätzlich durch die Aufgabe der Farbinformation auf eine Dateigröße von 1,27 MB reduziert. Zur Vermeidung von Fehlern bei der automatischen Bildanalyse erfolgte eine Nachbearbeitung der Graustufenbilder. Mit der AUTO-Option des Tonwertkorrekturmenüs konnten die Bilder, auf Grundlage berechneter

Histogramme, automatisch in Richtung echter Binärbilder korrigiert werden. D.h. silbergefärbte Trabekelstrukturen wurden möglichst dunkel, ungefärbte Markräume möglichst hell dargestellt. Eine zusätzliche, in engen Grenzen durchgeführte, manuelle Tonwertkorrektur konnte den Effekt noch verstärken.

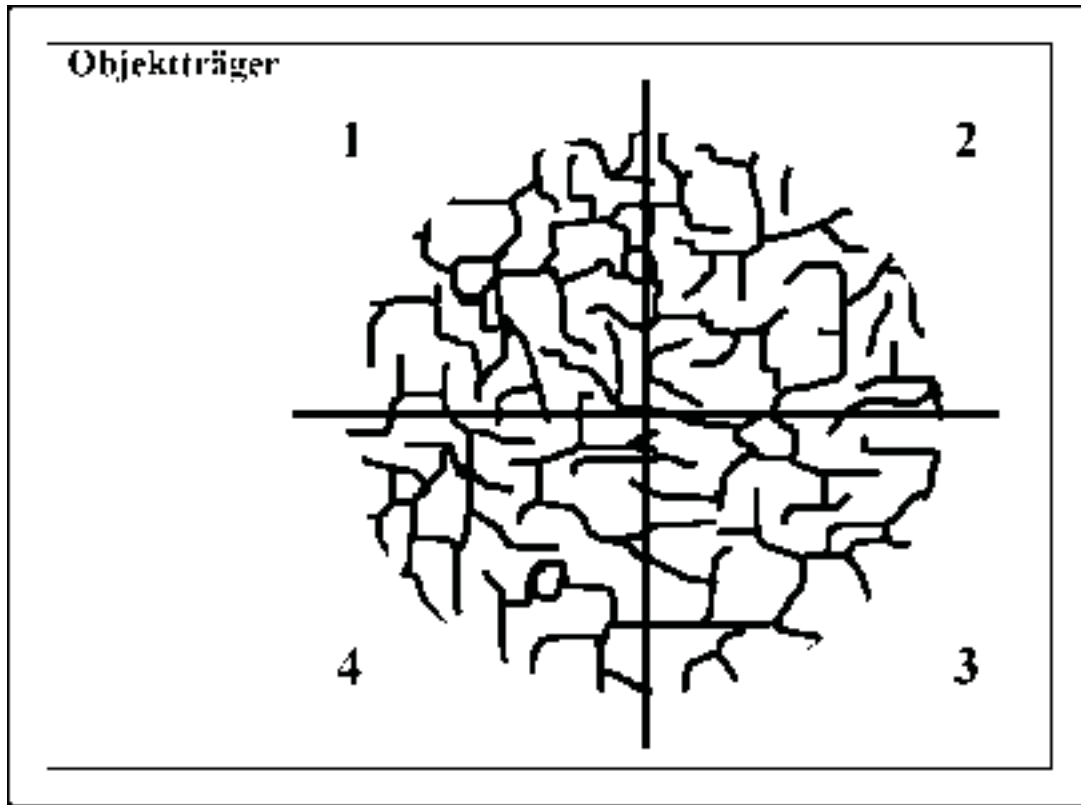


Abb. 4. Schematische Unterteilung der Spongiosaquerschnitte in 4 Kreissektoren.

In Fällen starker Kontamination wurden Sedimentpartikel mit dem Radierer-Tool manuell entfernt. Sedimentauflagerungen konnten von Trabekelstücken durch deren unregelmäßigere Konturen und deren, selbst im silbergefärbten Zustand, noch erkennbare körnige Struktur zweifelsfrei unterschieden werden. In seltenen Fällen mangelhafter Schwärzung von Trabekelstücken durch die Silberfärbung, konnten entsprechende Bereiche am Bildschirm nachgefärbt werden.

Schließlich wurde die Bearbeitung aller Bilder mit dem Filterprozess Staub & Kratzer (Radius 10; Threshold 0) abgeschlossen. Durch den Filter wird der Tonwert einzelner Bildpunkte entsprechend seines unmittelbaren Umfeldes korrigiert (vgl. 5.5.2).

Mit speziellen, selbst entwickelten Macroprogrammen unter NIH-IMAGE wurden die so bearbeiteten Bilder histomorphometrisch analysiert.

Dazu mussten die Macros in das Hauptprogramm geladen werden. Mit der Macrooption "Export Vorbereiten" wurde im Verzeichnis der Bilddaten eine Datendatei erstellt, welche die anfallenden Messdaten aufnahm und ihren Export in das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft EXCEL (Version 5.0 bis 2000) ermöglichte. Danach konnte mit der Macrofunktion Trabekelanalyse Serien von Bilddaten einer Skeletregion vollautomatisch analysiert werden. An den meist acht Bildern einer

Becken- oder Lendenwirbelkörperprobe wurden jeweils Anzahl, Fläche und Umfang der Trabekel im zweidimensionalen Schnittbild, sowie der sog. "Trabekular Bone Pattern faktor" (TBPf) bestimmt. Letzterer ist ein Maß für das Verhältnis von konvexen zu konkaven Trabekelflächen im zweidimensionalen Bild und gibt so Auskunft über den Vernetzungsgrad der Trabekel (Hahn et al. 1992). Um ihn messen zu können, mussten die Strukturen des Analysebildes, nach Erfassung der Standardparameter für Umfang (P1) und Fläche (A1) der Trabekel, mit einer 1-Pixel-breiten Linie erweitert und die Parameter erneut bestimmt werden (P2, A2). Die Fläche nimmt dabei immer zu, der Umfang (P2) vergrößert sich bei konvexen und verringert sich bei konkaven Strukturen gegenüber P1. TBPf wurde von Hahn et al. (1992) als

$$\text{TBPf} = (P1 - P2) / (A1 - A2)$$

definiert. Der Parameter kann positive und negative Werte annehmen. Tendenziell verkleinert er sich, wenn in Folge einer guten Trabekelvernetzung konkave Trabekelflächen überwiegen. Aus technischen Gründen wurden die TBPf-Werte im Rahmen dieser Arbeit jeweils mit dem Faktor 10^6 multipliziert.

Das Macroprogramm berechnete für jeden histomorphometrischen Parameter den Durchschnittswert aller Einzelbilder, die zu einer Grabnummer gehörten. Es bezieht so die Messergebnisse auf die sog. Standarduntersuchungseinheit, welche der realen Fläche eines Einzelbildes ($7,35 \text{ mm}^2$) entspricht.

Auswertung der Rippenquerschnitte

Die gescannten Bilder der silbergefärbten Rippenquerschnitte (vgl. 4.5.) wurden ebenfalls in ADOBE PHOTOSHOP nachbearbeitet. Auch hier erfolgte zunächst eine Angleichung in Richtung echter Binärbilder mit der AUTO-Option des Tonwertkorrekturmenüs. Gegebenenfalls wurden Störungen durch Sedimentpartikel manuell beseitigt, ehe eine Filterung (Staub & Kratzer: Radius 5; Threshold 0) aller Bilder erfolgte.

Zeigte die Rippencompacta liegezeitlich oder durch den Sägevorgang bedingte Risse, so mussten diese an der periostalen Seite durch eine 1 Pixel breite, schwarze Linie manuell geschlossen werden, um eine korrekte Parameterberechnung zu gewährleisten. Die Bilder wurden erneut gespeichert. Der Bildtitel bestand nur aus der Grabnummer.

Ein spezielles Macroprogramm unter NIH-IMAGE übernahm auch hier die metrische Analyse der so bearbeiteten Bilder. Gemessen wurden dabei die Rippenquerschnittsfläche, die knöcherne Fläche des Querschnitts und der Rippenquerschnittsumfang. Daraus wurde der sog. Rippenmaterialerfüllungsgrad, also der prozentuale Anteil an der Querschnittsfläche einer Rippe, der von Knochensubstanz eingenommen wird, berechnet. Wie bereits für Becken und Lendenwirbelkörper beschrieben, konnten auch hier die gewonnen Messdaten in das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft EXCEL zur statistischen Auswertung überführt werden.

Analyse der Oberschenkelcompacta

Bei jedem Individuum wurden jeweils zwei digitale Mikrofotografien (vgl. 4.5.) der Femurcompacta ausgewertet. Die Bilder waren längsparallel zur periostalen Seite

ausgerichtet und zeigten ausschließlich Compacta. Bereiche mit beginnender endostaler Spongiosierung durften nicht enthalten sein.

Bei der Bearbeitung der histologischen Bilder mit Adobe PHOTOSHOP wurden alle "kanalartigen" Strukturen am Bildschirm mit einer schwarzen, 1 Pixel breiten, Linie nachgezogen. Durch Ausnutzung der Bildvergrößerungsmöglichkeiten ließ sich die Präzision der Bearbeitung steigern. Zu den "kanalartigen" Strukturen zählten Haverssche, Nicht-Haverssche und Volkmannsche Kanäle, sowie Resorptionsräume. Sie ließen sich in den allermeisten Fällen selbst dann noch erkennen, wenn stark fortgeschrittene Dekompositionsprozesse eine Rekonstruktion von Lamellenflächen oder Kittlinien der Osteone verhinderten.

Das Nachzeichnen erfolgte auf einer zusätzlichen, dem Originalbild virtuell aufgelegten, transparenten Zeichenebene. Die resultierende Umgebungsfläche der "kanalartigen" Strukturen, welche im wesentlichen der Lamellenfläche entspricht, wurde schwarz gefüllt und, dank der Multilayer-Technik des Programmes, vom histologischen Originalbild getrennt, zu einem Graustufenbild reduziert und abgespeichert. Das Ergebnis ist ein schwarzes Bild, auf dem alle Kanalstrukturen als weiße Aussparungen zu erkennen sind.

Der Bildtitel hatte folgendes Format: Grabnummer - Bildnummer (1 oder 2). Auch hier erfolgte eine Analyse der so erhaltenen Bilddateien durch ein spezielles Macroprogramm unter NIH-IMAGE. Gemessen wurde die Anzahl der 'Kanalstrukturen' und deren Fläche. Zusätzlich erfolgte die Berechnung des Parameters Porosität, welcher den prozentualen Flächenanteil der 'kanalartigen' Strukturen am untersuchten Compactaareal beschreibt. Auch hier wurden die Messdaten in eine EXCEL-lesbare Datei exportiert.

Entsprechende Listings der Macroprogramme sind im Anhang aufgeführt. Erläuterung und Diskussion programmiertechnischer Details erfolgen in Kap. 5.5.3.

3.8. Quantifizierung des Osteoporosestatus einzelner Individuen eines Untersuchungskollektivs

Der Osteoporosestatus beschreibt den atrophischen Zustand eines Skeletes in Abhängigkeit vom alters- und geschlechtsspezifischen Trend im Untersuchungskollektiv. Um ihn abschätzen zu können, wurde die Aussagekraft der folgenden vier Messparameter, die jeweils an unterschiedlichen Skeletelementen eines Individuums erhoben worden waren, kombiniert: Porosität der Femurcompacta, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Beckenkamm, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper und Rippenmaterialerfüllungsgrad. Die Auswertung der Messdaten von männlichen und weiblichen Individuen erfolgte stets getrennt.

Die einzelnen histomorphometrischen Parameter werden z.T. mit verschiedenen Dimensionen gemessen und sind alle unterschiedlich skaliert. Um sie dennoch miteinander vergleichen zu können, wurden sie standardisiert, indem man jeweils die individuellen Messwerte x_i eines jeden Parameters auf ihren Mittelwert x_M bezog und mit der Standardabweichung s skalierte:

$$x_{i\text{std}} = (x_i - x_M) / s.$$

Durch jeweiliges Aufsummieren der vier standardisierten Parameterwerte erhielt man für jedes Individuum einen Indexwert (I_i). Die Porosität der Femurcompacta verhält sich gegenüber den anderen Parametern reziprok (vgl. 4.1.3.) und musste daher unter Vorzeichenwechsel verrechnet werden.

$$I_i = x_{i\text{std}_{\text{Becken}}} + x_{i\text{std}_{\text{Wirbel}}} + x_{i\text{std}_{\text{Rippe}}} - x_{i\text{std}_{\text{Femur}}}$$

Durch die mit dem Sterbealter abfallende Punktwolke der Indexwerte aller Individuen gleichen Geschlechtes wurde eine Regressionsgerade gelegt. Sie stellt eine Näherung für die alters- und geschlechtsspezifische Norm der Indexwerte im Untersuchungskollektiv dar. Die Berechnung der Regressionsgeraden erfolgte mit Hilfe der statistischen Funktionen des Tabellenkalkulationsprogrammes Microsoft EXCEL (Version 5.0 bis 2000, für Macintosh oder PC), nach der Methode der kleinsten Quadrate. Zur besseren Verständlichkeit illustriert Abb. 5 diesen Schritt exemplarisch für die Daten Wenigumstadter Frauen.

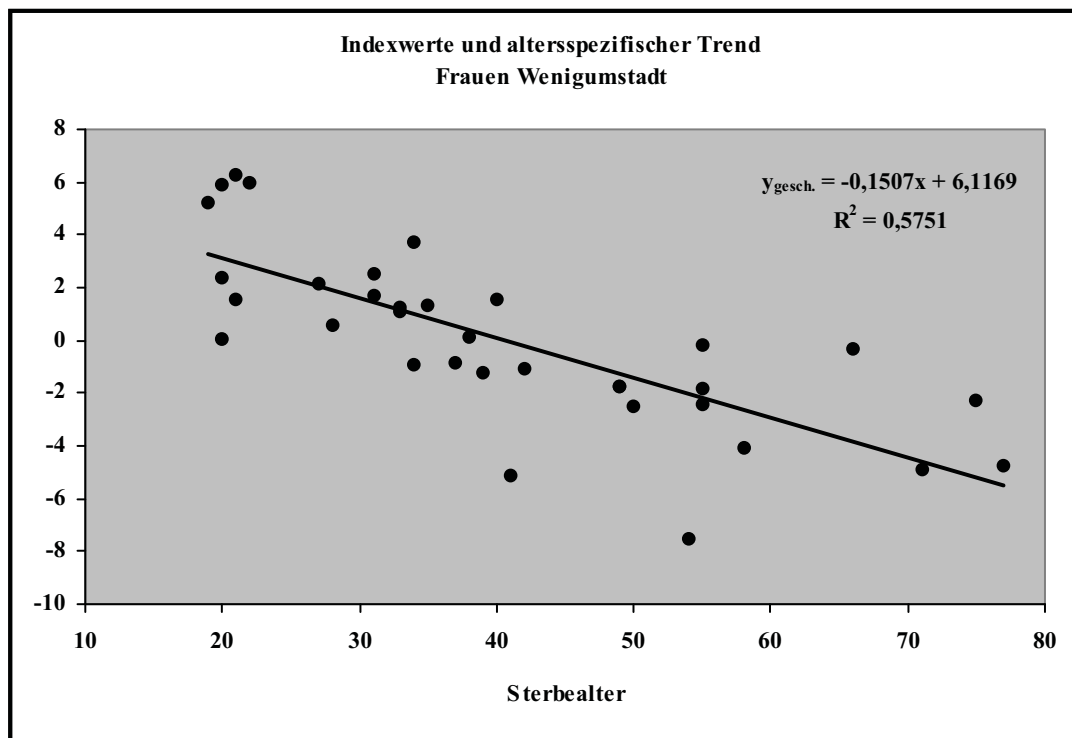


Abb. 5. Indexwerte Wenigumstadter Frauen. Die Regressionsgerade stellt ihren Abnahmetrend mit dem Lebensalter dar.

Anhand der Residuen e_i

$$e_i = y_i - y_{\text{gesch. } i}$$

y_i : aus den Parameterwerten berechnete Indexwerte

$y_{\text{gesch. } i}$: per Regression geschätzter Indexwert

ließ sich ablesen, wie weit und in welchem Sinne die einzelnen Individuen jeweils von der alters- und geschlechtsspezifischen Norm des Untersuchungskollektivs abwichen. D.h. die Entfernung eines Indexpunktes von der Regressionsgeraden unter Beachtung der Richtung, ausgedrückt durch das Vorzeichen, ist ein Maß für den quantitativen und qualitativen Zustand des Knochengewebes des entsprechenden Individuums bezüglich atrophischer bzw. osteoporotischer Veränderungen. Es bezieht sich dabei immer auf das zu Grunde liegende Untersuchungskollektiv und wurde als Osteoporosestatus definiert. Um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern schien es sinnvoll, die erhaltenen Abstandswerte e_i auf ihre Standardabweichung s_e zu beziehen:

$$\text{Osteoporosestatus} = e_i / s_e$$

Aus Gründen der Vereinfachung wurde s_e folgendermaßen berechnet.

$$s_e = \sqrt{\sum e_i^2 / (n-1)}$$

Der Osteoporosestatus eines Individuums ist damit kein statistisch korrekt standardisiertes Residuum, sondern ein praxisorientierter Kennwert für Osteoporoseuntersuchungen an archäologischem Skeletmaterial. Die angewandte Vereinfachung wird in Kap. 5.7.3. diskutiert.

3.9. Sozialstratigraphische und chronologische Unterteilung der Untersuchungskollektive

Um eventuelle Zusammenhänge zwischen Osteoporoseprädisposition, ausgedrückt durch den Osteoporosestatus, und der Zugehörigkeit von Bestattungen zu einer sozialen Schicht bzw. der Gräberchronologie untersuchen zu können, wurden die Individuen beider Kollektive zu entsprechenden Gruppen zusammengefasst.

Berücksichtigung fanden dabei alle Individuen, für die ein Osteoporosestatuswert berechnet werden konnte. Die Einteilung erfolgte auf Grundlage der archäologischen Fundkataloge für das Reihengräberfeld von Wenigumstadt (Stauch, in Vorbereitung) und Altenerding (Sage 1984, Helmuth et al. 1996). Im Folgenden werden die angewandten Auswahlkriterien beschrieben:

Wegen der hohen Beraubungsdichte, vor allem beim Wenigumstadter Gräberfeld, war eine präzise Einteilung generell schwierig. Bezüglich einer sozialstratigraphischen Einteilung wurde auf eine feine Binnengliederung verzichtet und lediglich gesichert wohlhabende Individuen allen anderen gegenübergestellt. Die chronologische Einteilung erfolgte in Dimensionen der einzelnen Jahrhunderte, unter Berücksichtigung wie stark diese chronologischen Klassen in den Untersuchungskollektiven dieser Arbeit vertreten waren.

Sozialstratigraphische Unterteilung des Wenigumstadter Kollektivs:

Der Gruppe wohlhabender Individuen wurden Grabnummern zugeteilt, deren überlieferte Ausstattung im Katalog (Stauch, in Vorbereitung) den Qualitätsstufen B und C nach Christlein zugeordnet oder die auf Grund anderer Beobachtungen als "wohlhabend" klassifiziert werden konnten. Möglich war dies für 13 Individuen. Ihnen stehen 50 Gräber gegenüber, von denen 9 der niedrigen Qualitätsstufe A zugeordnet werden konnten. Alle anderen besitzen keine nennenswerten Beigaben oder haben sie durch Grabraub verloren.

Chronologische Unterteilung des Wenigumstadter Kollektivs:

Bei der Datierung können in der Regel nur oft mehrere Jahrzehnte umfassende Zeitspannen angegeben werden. Eine Gruppenzuweisung erfolgte auf Grund der Mitte des von Stauch (in Vorbereitung) angegebenen Datierungsbereiches.

Das Untersuchungskollektiv wurde in zwei Gruppen unterteilt. Gruppe 1 enthält 5 Individuen aus der völkerwanderungszeitlichen Belegungsphase des ausgehenden 5.

Jahrhunderts. Gruppe 2 setzt sich aus 38 Gräbern zusammen, die ungefähr dem 7. und 8. Jahrhundert zugerechnet werden müssen und damit in den zweiten Belegungsabschnitt des Gräberfeldes (vgl. 2.) fallen. Berücksichtigt wurden alle Individuen, die von Stauch datiert werden konnten und für welche ein Osteoporosestatuswert vorlag.

Sozialstratigraphische Unterteilung des Altenerdinger Kollektivs:

Auch hier wurde nach dem von Sage (1984) verfassten Fundkatalog offensichtlich wohlhabende Individuen in einer Gruppe zusammengefasst. Kriterien für die Zuweisung waren reichhaltige Beigabenausstattung, insbesondere Bewaffung mit Sax und Spatha, sowie Edelmetallbeigaben. Einer entsprechenden Gruppe von 15 eindeutig wohlhabenden Altenerdingern konnten 67 Bestattungen mit geringerer bzw. fehlender Beigabenausstattung gegenüber gestellt werden.

Chronologische Unterteilung des Altenerdinger Kollektivs:

Nach Sage (Helmuth et al. 1996) hat sich die Anzahl der Gräber, die ins 5. Jahrhundert datiert werden müssen im Laufe der archäologischen Bearbeitungen weiter erhöht. Bei der chronologischen Unterteilung des Altenerdinger Kollektivs konnte allerdings nur auf die bei Helmuth et al. (1996) verwendete Datierung zurückgegriffen werden. Weil so nur drei Gräber mit bekanntem Osteoporosestatus dem 5. Jahrhundert zuzuordnen waren, wurden sie mit 30 Bestattungen des 6. Jahrhunderts zu einer Gruppe vereint und 18 Individuen des 7. Jahrhunderts gegenübergestellt.

3.10. Korrekturmaßnahmen zum Vergleich der Beckentrabekelfläche mit medizinischen Referenzdaten

Die Spongiosaprobe aus dem Beckenkamm wurden exakt an der Stelle entnommen, die auch zur Abklärung medizinischer Osteoporosefälle mittels Biopsie erschlossen wird. Ein Vergleich der am Becken gemessenen Parameterwerte für die Trabekelfläche bei archäologischem Skeletmaterial und heutigen Patienten bietet sich an.

Um dies zu ermöglichen, musste ein Umrechnungsfaktor ermittelt werden, der berücksichtigt, dass die jeweiligen Schnittdicken der histologischen Präparate aus technischen Gründen sehr verschieden sind. Medizinische Studien arbeiten üblicherweise mit Dicken im Bereich von 4-10µm; im Rahmen dieser Arbeit musste hingegen mit 100 µm geschnitten werden.

Nur mit Hilfe des Umrechnungsfaktors kann kompensiert werden, dass die wesentlich dickeren Präparate archäologischer Spongiosaprobe erhöhte Messwerte bezüglich der Trabekelfläche bedingen. Ursächlich für dieses Phänomen ist der sog. Holmes-Projektionseffekt, welcher die Querschnittsfläche von schräg stehenden lichtundurchlässigen Trabekelplatten in nicht-infinitesimaldünnen histologischen Präparaten

bei Betrachtung im Durchlicht größer erscheinen lässt, als sie in Wirklichkeit sind (vgl. 5.3.).

Es wurden zwei unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung von Umrechnungsfaktoren angewandt. Da beide gewissen, unvermeidlichen qualitativen Einschränkungen unterliegen, sollte durch einen Vergleich der erzielten Ergebnisse, deren Einfluss abgeschätzt werden.

Verfahren 1: Schnittdicketestreihen

Die Probenzylinder aus dem Beckenkamm von fünf Individuen (Wenigumstadt Nr. 25, 102; Altenerding Nr. 740, 848, 1305) wurden komplett aufgeschnitten. Daraus resultierten zwei Schnitte mit jeweils 100 µm Dicke (vgl. 3.4.) und weitere Präparate mit Dicken zwischen 50 µm und 200 µm. Die Anzahl der möglichen Schnitte wurde durch die Höhe des jeweiligen Probenzylinders bzw. die Dicke der Darmbeinschaukel im Probenentnahmebereich begrenzt. Sie variierte zwischen 5 und 11 Schnitten. Periphere, unmittelbar an die Compacta grenzende Spongiosabereiche mussten wegen ihres nicht ganz homogenen Charakters ausgespart bleiben.

Alle gewonnenen Präparate wurden, wie in Kapitel 3.5. und 3.7. beschrieben, digitalisiert und histomorphometrisch ausgewertet. Lediglich die Anzahl der pro Schnitt analysierten Bilder erhöhte sich von vier auf fünf. Zu den erwähnten vier Kreissektoren kam ein fünftes Bild, unmittelbar aus der Mitte der Präparate hinzu (vgl. 3.7.). Die fünf Messergebnisse jedes Präparates wurden gemittelt und zusammen mit den anderen Daten des entsprechenden Individuums in einem Streudiagramm gegen die Schnittdicke aufgetragen. Das Berechnen einer Regressionsgeraden ermöglichte die Extrapolation auf Parameterwerte A_{med} , die bei Verwendung von in medizinischen Studien üblichen Schnittdicken zu erwarten gewesen wären.

Daraus wurde ein Korrekturfaktor k für archäologisches Skeletmaterial berechnet:

$$k = A_{med}/A_{100}$$

A_{med} : extrapolierte Trabekelquerschnittsfläche; entsprechend der in einer medizinischen Vergleichsstudien angewandten Schnittdicke.

A_{100} : gemessene Trabekelquerschnittsfläche bei der im Rahmen dieser Arbeit angewandten Schnittdicke von 100µm

Einschränkungen erfährt diese Methode durch die Tatsache, dass die Anzahl der möglichen Serienschnitte einer Probe sehr begrenzt ist und durch die statistische Ungültigkeit der Regression außerhalb des Messdatenbereiches.

Verfahren 2: Theoretische Fehlerberechnung

Parfitt (1973, 1983) weist auf die Berechenbarkeit des Trabekelflächenfehlers bei nicht-infinitesimaler Schnittdicke nach folgender Formel hin:

$$E = 2 \cdot R / \pi \quad (1)$$

E: Fehler bedingt durch nicht-infinitesimale Schnittdicke

R: Verhältnis aus Schnittdicke und durchschnittlicher Trabekeldicke

Die typische durchschnittliche Trabekeldichte im Beckenkamm liegt bei ca. 100 μm (Parfitt 1973, Kimmel und Jee 1983).

Bei nicht-infinitesimaler Schnittdicke setzt sich der verfälschte Messwert A für eine reale Trabekelquerschnittsfläche A_0 (bei infinitesimaler Schnittdicke) folgendermaßen zusammen:

$$A = A_0 + A_0 * E \quad (2)$$

Unter der Annahme eines beliebigen, positiven Wertes für A_0 wurde nach (1) und (2) ein Korrekturfaktor für archäologisches Skeletmaterial berechnet:

$$k = A_{\text{med}}/A_{100}$$

A_{med} : berechneter, durch die Schnittdicke in einer medizinischen Studie verfälschter Messwert für die Trabekelquerschnittsfläche

A_{100} : berechneter, durch die Schnittdicke von 100 μm bei archäologischem Material verfälschter Messwert für die Trabekelquerschnittsfläche

Einschränkungen erfährt dieses Verfahren durch das Einsetzen eines empirischen Durchschnittswertes für die Trabekeldicke. Des Weiteren gilt Formel (1) nur für streng isotrope Strukturverhältnisse (Parfitt 1983, Whitehouse 1976), die in spongiösem Knochen nicht vollständig gegeben sind (Whitehouse 1974, Schwarz und Recker 1981).

In der medizinisch-klinischen Histomorphometrie ist es üblich, an Stelle von Flächenparametern die räumliche Erfüllung spongiöser Knochen mit Trabekeln als TBV% (Trabecular Bone Volume) bzw. als BV/TV% (Bone Volume / Tissue Volume) anzugeben. Dieser Messparameter schließt meist den Volumenanteil nichtmineralisierter Osteoidsäume an Knochenbälkchen mit ein. Grundlage für die Ableitung dieses dreidimensionalen Parameters aus zweidimensionalen Flächenmessungen ist ein Theorem, das auf den französischen Geologen Delesse zurückgeht. Es besagt, dass die Flächenerfüllung einer Struktur im zweidimensionalen Schnittbild zahlenmäßig mit ihrer Raumerfüllung in der dreidimensionalen Wirklichkeit übereinstimmt. Dies gilt unabhängig von der räumlichen Orientierung der Struktur. Vorausgesetzt wird lediglich eine infinitesimale Schnittdicke (Chayes 1954, Elias et al. 1971, Parfitt 1973, Schwartz und Recker 1981).

Um die Trabekelflächenwerte der archäologischen Skelete mit medizinischen Daten vergleichen zu können, wurden sie nach ihrer Korrektur durch den Umrechnungsfaktor auf ihre Standarduntersuchungsfläche (7,35 mm^2) bezogen und der Wert mit 100 multipliziert als TBV% angegeben.

$$\text{TBV}\% = A * k * 100 / 7350000 \mu\text{m}^2$$

A: Messwert der Trabekelfläche bei nicht-infinitesimaler Schnittdicke [μm^2]

k: ermittelter Umrechnungsfaktor

3.11. Vergleich des altersabhängigen Verlaufs knochenatrophischer Prozesse auf Kollektivebene

Folgende Schritte dienten dazu, eventuell vorhandene Unterschiede im altersabhängigen Verlauf knochenatrophischer Prozesse beim Wenigumstadter und Altenerdinger Untersuchungskollektiv nachzuweisen.

Um Zufallseinflüsse durch die individuelle Variabilität histomorphometrischer Parameter zu verringern, wurden abermals Messwerte verschiedener Skeletregionen zu einer Kenngröße kombiniert. Berechnungsgrundlage waren auch hier die Parameter Porosität der Femurcompacta, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Beckenkamm, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper und Rippenmaterialerfüllungsgrad.

Die Parameter wurden standardisiert, indem man jeweils die individuellen Messwerte $x_{i\ 1,2}$ eines jeden Parameters von geschlechtsgleichen Individuen beider Kollektive (1 und 2) auf ihren gemeinsamen Mittelwert $x_{M\ 1,2}$ bezog und mit der gemeinsamen Standardabweichung $s_{1,2}$ skalierte:

$$x_{i\ 1,2}std = (x_{i\ 1,2} - x_{M\ 1,2}) / s_{1,2}.$$

Für jedes Individuum erfolgte eine Indexbildung durch Aufsummieren der standardisierten Parameter unter Vorzeichenwechsel beim Femurporositätsparameter (vgl. 3.8.). Die Indexwerte der Wenigumstadter und Altenerdinger Individuen wurden in einem gemeinsamen Streudiagramm gegen das Alter aufgetragen. Das Einzeichnen zweier, jeweils kollektivspezifischer Regressionsgeraden ermöglichte einen deskriptiven Vergleich der atrophischen Trends.

3.12. Röntgenuntersuchungen

Als Hilfsmittel zur Abklärung ungewöhnlicher Histomorphometrie- und Skeletbefunde wurden Röntgenaufnahmen relevanter Skeletelemente angefertigt.

Soweit es der Materialüberlieferungsgrad zuließ, konnten von einem Individuum jeweils alle vorhandenen Wirbelkörper, die proximale Femurdiaphyse und die Oberschenkelhalsregion, in einigen Fällen auch noch weitere Skeletelemente, radiologisch untersucht werden. Beim Wenigumstadter Untersuchungskollektiv waren entsprechende Röntgenuntersuchungen präventiv an allen Individuen bereits vor der Entnahme von Knochenproben durchgeführt worden. Im Falle der Altenerdinger Skeletserie erfolgten sie erst nach der histomorphometrischen Analyse an auffälligen Individuen.

Das eingesetzte Röntgengerät (Siemens OPTIDENT ELECTRONIC) arbeitet mit einer Röhrenspannung von ca. 58 KV bei einer Stromstärke von 12 mA. Der Film-Fokus-Abstand betrug 60 cm. Bei den Individuen des Wenigumstadter Untersuchungskollektivs kamen DIN A4-Röntgenfilme vom Typ CEA RP Blue Sensitive in Kombination mit Verstärkerfolien (100x, blau) zum Einsatz. Die Belichtungszeit betrug jeweils 0,13 Sekunden. Wegen einer Geräteumstellung mussten für die Untersuchung von Altenerdinger Individuen DIN A4-Röntgenfilme vom Typ CEA OGA

Green Sensitive in Kombination mit Verstärkerfolien (50x, grün) verwendet werden. Die Belichtungszeit betrug jeweils 0,16 Sekunden.

3.13. Statistische Testverfahren

Hinsichtlich gemessener und berechneter Größen wurden Mittelwertsunterschiede getestet und untersucht, ob sich lineare Zusammenhänge zwischen Parametern bzw. Unterschiede zwischen knochenatrophischen Trends statistisch absichern ließen.

Die eingesetzten Testverfahren nehmen Normalverteilung der Daten in der Grundgesamtheit an, was in der Praxis unterschiedlich gut erfüllt wird. Eine Anwendung der Tests schien dennoch gerechtfertigt, da sie eine gewisse Robustizität gegenüber Abweichungen von der Normalverteilungsannahme besitzen. Zudem gibt es keine eindeutigen Kriterien dafür, ab wann die Anwendungsvoraussetzungen eines solchen Verfahrens nicht mehr gegeben sind (Janssen und Laatz 1999, Gröbmeyer, persönliche Mitteilung).

Alle nötigen Berechnungen wurden mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Microsoft EXCEL (Version 5.0 bis 2000) und des Statistikprogrammes SPSS für Windows (Version 9.0.1.) durchgeführt.

Test des Korrelationskoeffizienten (Precht und Kraft 1993; Bosch 1993)

Anwendung fand folgendes Verfahren bei der statistischen Absicherung linearer Zusammenhänge: Einerseits um Korrelationen zwischen histomorphometrischen Parametern und dem Lebensalter der untersuchten Individuen zu prüfen, andererseits um zu testen, ob histomorphometrische Parameter signifikant voneinander linear abhängig sind.

Dazu wurde als Nullhypothese $H_0: \rho=0$ angenommen. D.h. zwischen den untersuchten Zufallsvariablen besteht keine Korrelation, der gefundene empirische Korrelationskoeffizient ist nur zufällig von null verschieden.

Eine entsprechende Testgröße

$$t_0 = r \cdot \sqrt{(n-2)/(1-r^2)}$$

ist t-verteilt mit n-2 Freiheitsgraden. Da sachlich begründbare Erwartungen zum Vorzeichen des Korrelationskoeffizienten bestanden, konnten die Tests jeweils einseitig gegen folgende Alternativhypothesen durchgeführt werden:

$H_1: \rho < 0$ bzw. $H_1: \rho > 0$.

Statistisch gesichert ist die Korrelation zwischen den untersuchten Zufallsvariablen, wenn die Nullhypothese auf einem entsprechenden Signifikanzniveau abgelehnt werden kann. D.h. $t_0 > t_{n-2; 1-\alpha}$ bzw. $t_0 < -t_{n-2; 1-\alpha}$.

Mittelwertsvergleiche bei unterschiedlicher Varianz (Zöfel 1988, Bosch 1993, Precht und Kraft 1993)

Verwendung fand der sog. Welch-Test, um zu prüfen, inwieweit Mittelwertsunterschiede der Osteoporosestatuswerte verschiedener sozialstratigraphischer und chronologischer Bestattungsgruppen vom Zufall beeinflusst werden.

Die Nullhypothese $H_0: \mu_x = \mu_y$ nimmt die Gleichheit der Mittelwerte der beiden Gruppen an.

Eine entsprechende Testgröße

$$t_0 = (\bar{x}_{Mx} - \bar{x}_{My}) / \sqrt{s_x^2/n_x + s_y^2/n_y}$$

ist approximativ t-verteilt mit FG Freiheitsgraden:

$$FG = [(s_x^2/n_x + s_y^2/n_y)^2] / [s_x^4/(n_x^2(n_x-1)) + s_y^4/(n_y^2(n_y-1))]$$

Da sachlich begründbare Erwartungen bezüglich der Richtung einer Abweichung bestanden, konnten die Tests jeweils einseitig gegen folgende Alternativhypothesen durchgeführt werden: $H_1: \mu_x < \mu_y$ bzw. $H_1: \mu_x > \mu_y$.

Statistisch gesichert ist eine Mittelwertsdifferenz zwischen den untersuchten Gruppen, wenn die Nullhypothese auf einem entsprechenden Signifikanzniveau abgelehnt werden kann. D.h. $t_0 > t_{FG; 1-\alpha}$ bzw. $t_0 < -t_{FG; 1-\alpha}$.

Test des Bestimmtheitsmaßes der Regression (Precht und Kraft 1993)

Im Zusammenhang mit der Auswertung der Schnittdicketeststreifen diente die Prüfung des Bestimmtheitsmaßes als Anhaltspunkt dafür, inwieweit man, trotz der z.T. sehr kleinen Anzahl an Datenpaaren, noch von einer nicht zufällig Zustände gekommenen Regression ausgehen kann.

Die Nullhypothese nimmt an, dass das Bestimmtheitsmaß B nicht von null verschieden ist. $H_0: B = 0$.

Eine entsprechende Testgröße

$$F_0 = B \cdot (n-2) / (1-B)$$

ist F-verteilt mit 1 Zähler- und n-2 Nennerfreiheitsgraden.

Statistisch gesichert ist die Regression bzw. das Bestimmtheitsmaß, wenn H_0 auf einem entsprechenden Signifikanzniveau abgelehnt werden kann. D.h. $F_0 > F_{1, n-2; 1-\alpha}$.

Test auf Gleichheit zweier Regressionsgeraden (Küchenhoff, persönliche Mitteilung; Gröbmeyer, persönliche Mitteilung; Bosch 1993)

Das folgende Verfahren wurde angewandt, um zu testen, ob sich der altersabhängige Trend von Indexwerten bzw. histomorphometrischen Parametern bei zwei verschiedenen Untersuchungsgruppen unterscheidet. Dazu musste anhand der Fehlerquadratsummen geklärt werden, ob die altersabhängige Veränderung der Werte durch ein Modell mit einer gemeinsamen Regressionsgeraden signifikant schlechter beschrieben wird, als durch ein Modell mit zwei gruppenspezifischen Regressionen. Die Nullhypothese geht von einer unwesentlichen, d.h. zufälligen Verbesserung durch letzteres Modell aus.

Eine entsprechende Testgröße

$$f_0 = \text{MSH} / \text{MSE}$$

ist F-verteilt mit 2 Zähler- und n-4 Nennerfreiheitsgraden. Wobei gilt:

$$\text{MSE} = \text{SSE} / (n - p_2) = \sum (y_{i1,2} - y_{\text{gesch. } i1,2})^2 / (n - p_2)$$

MSE: Mittlere Fehlerquadratsumme bei 2 Regressionsgeraden der Gruppen 1 und 2

SSE: Gesamtfehlerquadratsumme bei 2 Regressionsgeraden der Gruppen 1 und 2

$y_{i1,2}$: Messwerte der Gruppe 1 bzw. 2; $y_{\text{gesch. } i1,2}$: Schätzwerte der Gruppe 1 bzw. 2

p_2 : Gesamtzahl der Parameter (4) beim Modell mit 2 Geraden

$$\text{MSH} = (\text{SSE}_1 - \text{SSE}) / (p_2 - p_1)$$

SSE_1 : Fehlerquadratsumme bei einer Gesamtregressionsgeraden für beide Gruppen

SSE: Gesamtfehlerquadratsumme bei 2 Regressionsgeraden der Gruppen 1 und 2

p_2 : Gesamtzahl der Parameter (4) beim Modell mit 2 Geraden

p_1 : Parameteranzahl bei einer Gesamtregressionsgeraden für beide Gruppen (2)

Die Verschiedenheit der beiden Regressionsgeraden ist statistisch gesichert, wenn die Nullhypothese auf einem entsprechenden Signifikanzniveau abgelehnt werden kann. D.h. $f_0 > f_{2,n-4;1-\alpha}$.

4. Ergebnisse

Dieses Kapitel stellt histomorphometrische Messergebnisse und die Resultate der Osteoporosestatusberechnungen vor. Diese werden mit Gräberchronologie, Sozialstratigraphie, medizinischen Referenzdaten und auf Kollektivebene verglichen.

Die Altersbestimmung nach der Zahnwurzelzementmethode ist praktisch ein etabliertes Verfahren (vgl. Grosskopf 1990, Cipriano-Bechtle 1994, Cipriano-Bechtle et al. 1996, Kagerer, in Vorbereitung). Da sie im Rahmen dieser Arbeit vor allem die Voraussetzungen für die geplanten Untersuchungen schaffen sollte und nur am Altenerdinger Kollektiv durchgeführt wurde, werden diesbezügliche Ergebnisse nicht ausführlich dargestellt. Die Resultate der Sterbealtersbestimmung sind den Tabellen des Anhangs A1 zu entnehmen.

4.1. Histomorphometrische Parameter

Prinzipiell zeigen alle Parameter, die im Zusammenhang mit der Knochendichte bzw. der Knochenmasse eines Individuums stehen, einen mehr oder weniger deutlich ausgeprägten Trend, der bereits aus den Ergebnissen zahlreicher Studien unterschiedlichster Methodik an medizinischem und archäologischem Material (z.B. Dewey et al. 1969, Ericksen 1976, Parfitt et al. 1983, Thomsen et al. 1986, Pun et al. 1991, Hu et al. 1994, Seeman 1999) zu erwarten war: Spätestens ab der vierten Lebensdekade beginnt eine fortschreitende Reduktion der Materialdichte bzw. strukturellen Qualität des Knochengewebes, die bis zum Tod des Individuums andauert. Die individuelle Variabilität ist dabei relativ hoch. Frauen sind prinzipiell stärker betroffen als Männer.

Wenn Parameter einen deutlichen Änderungstrend mit dem Lebensalter erkennen lassen, so verläuft dieser bei allen untersuchten Individuen, innerhalb der erfassten Altersspanne, weitgehend linear. Der Korrelationskoeffizient zeigt, wie gut der lineare Zusammenhang eines Parameters mit dem Lebensalter gesichert ist. Er dient zur Abschätzung des Manifestationsgrades altersatrophischer Prozesse an bestimmten Skeletelementen und in den zugehörigen Messparametern. Da sachlich begründbare Erwartungen bezüglich des Verlaufs der Parametertrends vorlagen, konnte die Signifikanz der Korrelationen jeweils einseitig getestet werden.

Alle wichtigen histomorphometrischen Parameterwerte sind im Anhang A1 zusammengefasst. Korrelationsmatrizen bezüglich des Sterbealters und dieser Parameter sind für männliche und weibliche Individuen beider Untersuchungskollektive im Anhang A2 vollständig dargestellt.

Die wichtigsten Parametertrends werden im Folgenden beschrieben und exemplarisch illustriert.

4.1.1. Histomorphometrische Parameter der Lendenwirbelkörperspongiosa

Bei den Daten handelt es sich jeweils um die durchschnittlichen Parameterwerte pro Standarduntersuchungseinheit (vgl. 3.7.) eines Individuums. Dekompositionsbedingt (vgl. 5.4.) konnten beim Wenigumstadter Untersuchungskollektiv von zwei weiblichen und einem männlichen Individuum (Grabnummer: 3, 231 und 212) keine Werte der Wirbelkörperspongiosa ermittelt werden, so dass sich die Anzahl der betrachteten Personen entsprechend verringerte.

Abweichend von der medizinischen Praxis wurde auf die Verwendung von, für den dreidimensionalen Raum abgeleiteten, TBV%- bzw. BV/TV%-Werte verzichtet und statt dessen direkt die pro Standarduntersuchungseinheit messbare Trabekelfläche angegeben. Eine Begründung dieser Maßnahme erfolgt in Kapitel 5.3.

Trabekelfläche

Die im zweidimensionalen Schnittbild gemessene Trabekelfläche nimmt bei Frauen und Männern beider Untersuchungskollektive kontinuierlich mit dem Lebensalter ab. Die Korrelation ist jeweils höchst signifikant. Tendenziell ist der Trend beim Alternderinger Kollektiv etwas weniger deutlich ausgeprägt. Frauen folgen ihm stärker als Männer. Eine hohe Korrelation zwischen Trabekelfläche und Lebensalter ($r=-0,74$; $p=0,000$) zeigt Abb. 6 für Wenigumstadter Frauen.

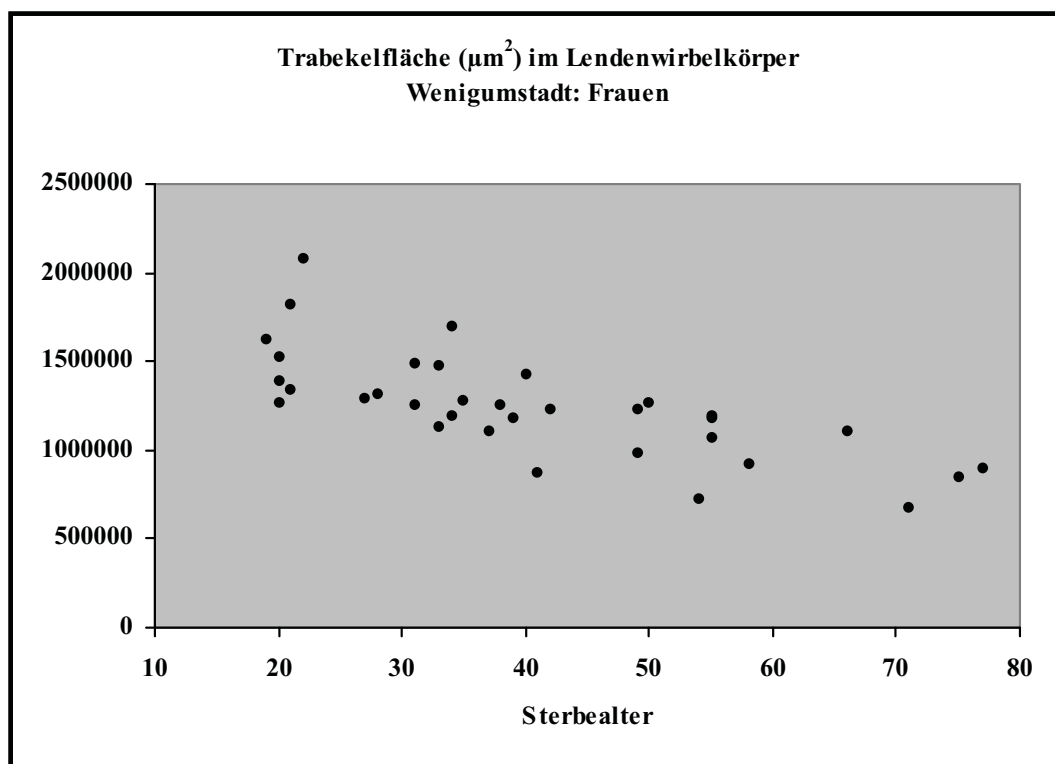


Abb. 6. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und der Trabekelfläche (µm²) pro Standarduntersuchungseinheit (7,35mm²) im Lendenwirbelkörper Wenigumstadter Frauen.

Trabekelumfang

Der Gesamtumfang aller im zweidimensionalen Schnittbild gemessenen Trabekelstücke nimmt ebenfalls bei allen untersuchten Individuen mit dem Lebensalter ab. Ein entsprechender Zusammenhang ist im Vergleich zum Parameter Trabekelfläche deutlich geringer ausgeprägt, kann aber noch auf dem 1%-Signifikanzniveau gesichert werden. Während bei allen weiblichen Skeleten und den männlichen Individuen des Wenigumstadter Kollektivs die Korrelationskoeffizienten um -0,45 betragen, zeigen die Altenerdinger Männer tendenziell den schwächsten Zusammenhang ($r=-0,36$; $p=0,007$) mit dem Sterbealter (Abb. 7).

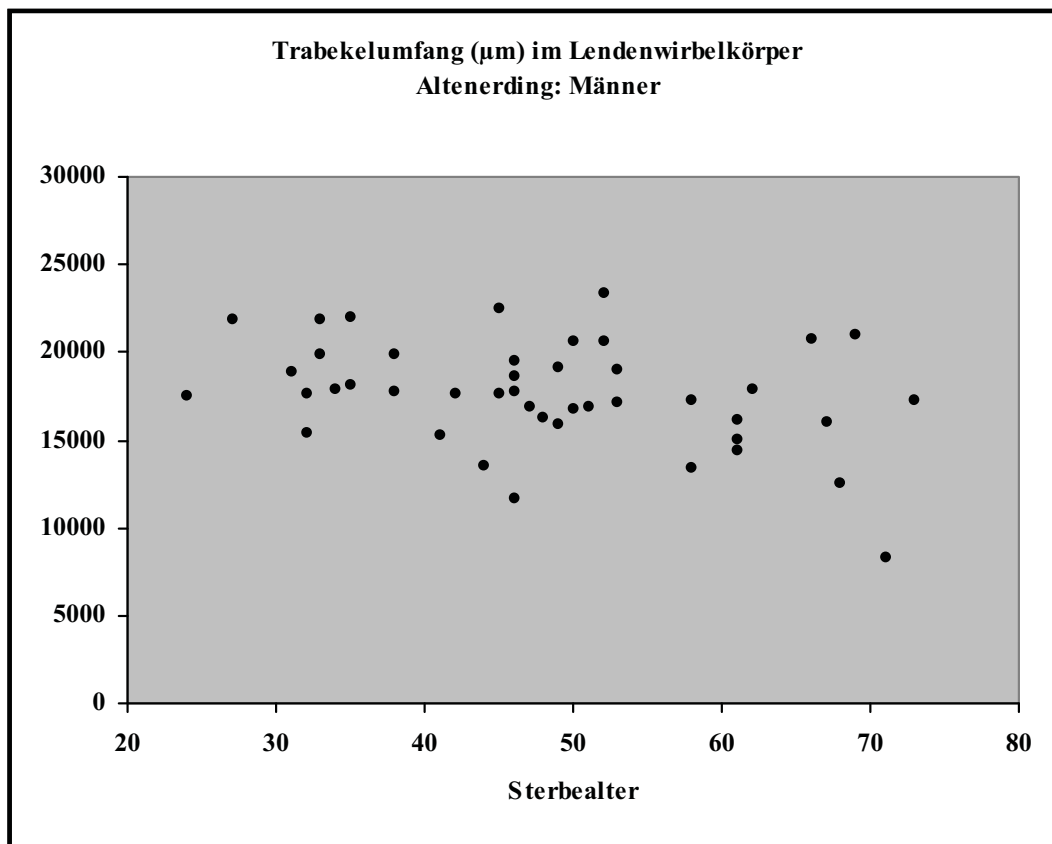


Abb. 7. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und dem Trabekelumfang (µm) pro Standarduntersuchungseinheit (7,35mm²) im Lendenwirbelkörper Altenerdinger Männer.

Erwartungsgemäß zeigt der Parameter Trabekelumfang bei Frauen und Männern beider Untersuchungskollektive eine hohe Korrelation mit der Trabekelfläche ($r=0,78$ bis $0,89$; $p=0,000$).

'Trabekular Bone Pattern faktor' (TBPf)

Ansteigende TBPf-Werte offenbaren einen gewissen Verlust an struktureller Qualität der Spongiosa durch Reduktion der dreidimensionalen Trabekelvernetzung (Hahn et

al. 1992). Bei allen untersuchten Individuen lässt sich ein solcher positiver Zusammenhang mit dem Sterbealter feststellen. Allerdings ist er im Vergleich zum Parameter Trabekelfläche deutlich schwächer ausgeprägt. Eine Sicherung auf dem 1%-Signifikanzniveau ist mit Ausnahme der Wenigumstadter Männer möglich, bei denen kein signifikanter Trend vorliegt ($r=0,23$; $p=0,11$). Ein erwartungskonformer Strukturverlust mit steigendem Lebensalter zeigt sich noch am deutlichsten bei den Alternenderinger Frauen ($r=0,44$; $p=0,003$). Die Korrelation ist allerdings eher gering. Eine Diskontinuität im TBPf-Verhalten, ausgelöst durch einen rapiden Verlust an struktureller Qualität der Spongiosa in Folge z.B. einsetzender Menopause, kann nicht beobachtet werden (Abb. 8).

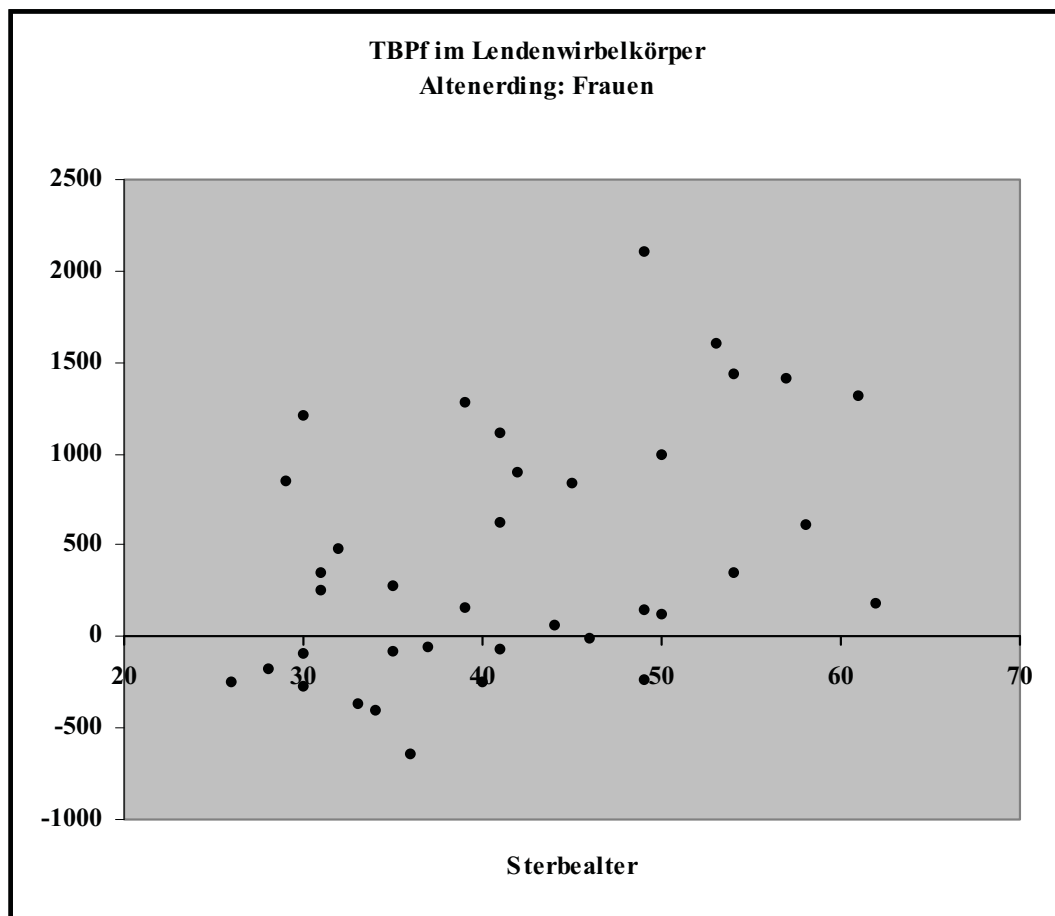


Abb. 8. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und dem Trabecular Bone Pattern factor ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit ($7,35\text{mm}^2$) im Lendenwirbelkörper Alternenderinger Frauen.

Bei allen Frauen und den Alternenderinger Männern findet man hohe gut gesicherte Korrelationen ($p=0,000$) der TBPf-Werte mit dem Parameter Trabekelfläche. Selbst die Wenigumstadter Männer zeigen dieses Verhalten in abgeschwächter Form ($r=-0,63$; $p=0,000$) und belegen eine starke Abhängigkeit des TBPf-Parameters von der Trabekelfläche.

4.1.2. Histomorphometrische Parameter der Beckenkammspongiosa

Bei den Daten handelt es sich jeweils um die durchschnittlichen Parameterwerte pro Standarduntersuchungseinheit (vgl. 3.7.). Dekompositionsbedingt konnten beim Wenigumstadter Untersuchungskollektiv von zwei weiblichen Individuum (Grabnummer: 3 und 231) keine Werte der Beckenkammspongiosa ermittelt werden, so dass sich die Anzahl der betrachteten Personen entsprechend verringerte.

Trabekelfläche

Sehr ähnlich den Verhältnissen im Lendenwirbelkörper, nimmt auch die Trabekelfläche des Beckenkammes bei Frauen und Männern beider Untersuchungskollektive kontinuierlich mit dem Lebensalter ab. Tendenziell ist dieser Verlauf beim Altenerdinger Kollektiv etwas deutlicher ausgeprägt. Frauen folgen ihm etwas besser als Männer.

Abgesehen von den Wenigumstadter Männern, lässt sich der Abnahmetrend der Trabekelfläche mit dem Lebensalter auf dem 0,1%-Niveau absichern. In dieser Gruppe befindet sich ein Individuum (Grabnummer 222) mit einem außergewöhnlich hohen Parameterwert. Ein Messfehler kann ausgeschlossen werden. Bereits bei der Probenentnahme konnte makroskopisch eine massive Verdichtung der Spongiosastruktur registriert werden. Die histomorphometrischen Parameter der anderen Skeletelemente sind bei diesem Individuum eher unauffällig. Inwieweit hier ein lokal begrenzter pathologischer Prozess vorliegt, ist noch zu diskutieren (vgl. 4.2.2.). Sieht man von diesem Extremwert ab, so folgen auch die Messwerte der Wenigumstadter Männer dem erwarteten Trend (Abb. 9).

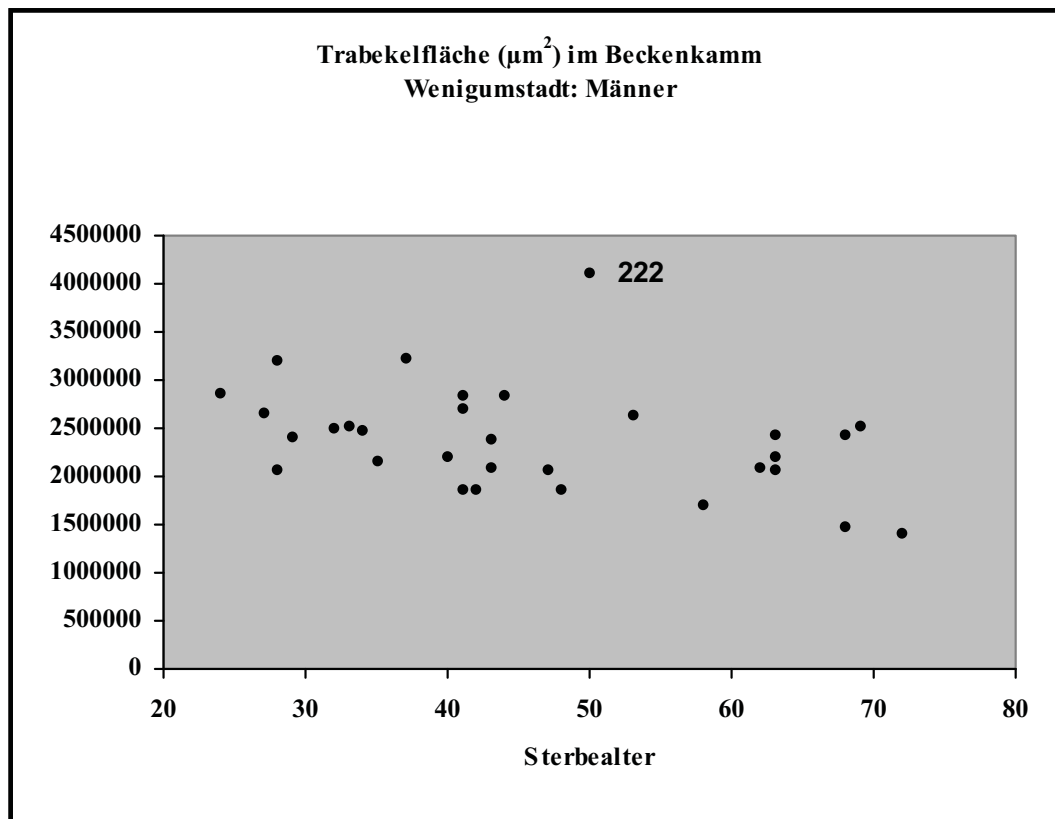


Abb. 9. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und der Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit ($7,35\text{mm}^2$) im Beckenkamm Wenigumstadter Männer.

Der Gesamtumfang aller im zweidimensionalen Schnittbild gemessenen Trabekelstücke nimmt ebenfalls bei allen untersuchten Individuen mit dem Lebensalter ab. Ein entsprechender Zusammenhang ist im Vergleich zum Parameter Trabekelfläche geringer ausgeprägt. Die vier untersuchten Individuengruppen verhalten sich unterschiedlich: Während der Trend bei allen männlichen Individuen noch auf dem 1%-Niveau gesichert werden kann, ist die Korrelation des Trabekelumfangs mit dem Sterbealter bei Wenigumstadter Frauen gering ($r=-0,31$; $p=0,038$). Die Altenerdinger Frauen zeigen hingegen einen ähnlich starken Zusammenhang ($r=-0,66$; $p=0,000$) wie bei der Trabekelfläche (Abb. 10).

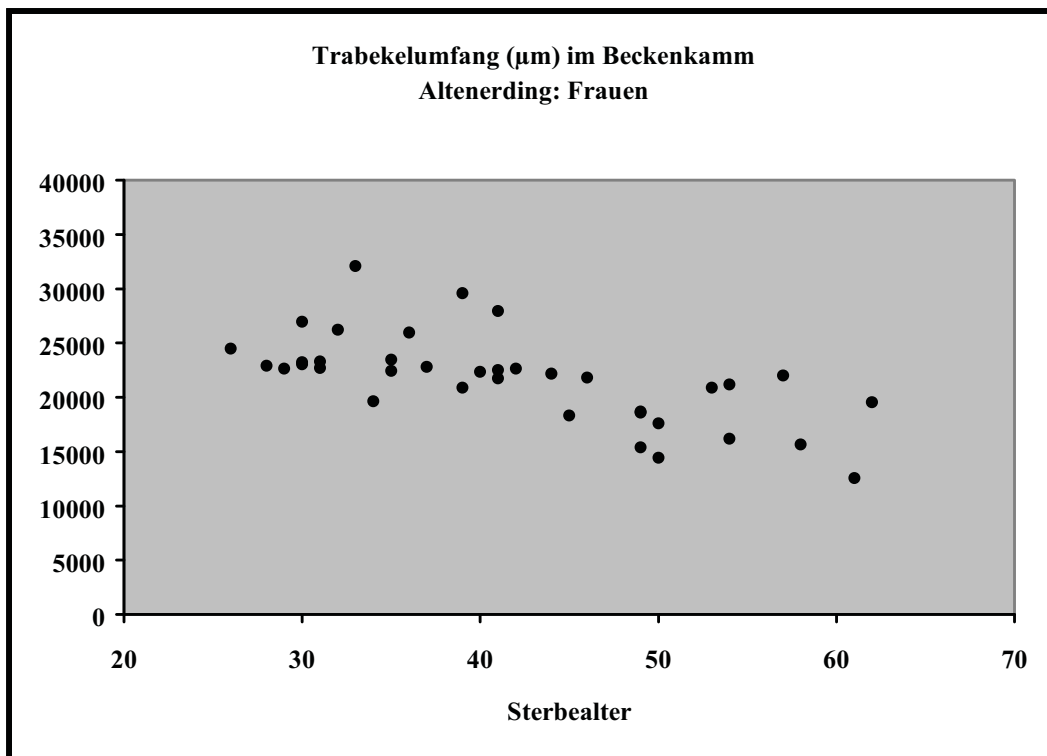


Abb. 10. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und dem Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit ($7,35\text{mm}^2$) im Beckenkamm Altenerdinger Frauen.

'Trabekular Bone Pattern faktor' (TBPf)

Bei allen untersuchten Individuen lässt sich ein signifikanter positiver Zusammenhang der TBPf-Werte mit dem Sterbealter feststellen. Allerdings ist er im Vergleich zum Parameter Trabekelfläche deutlich schwächer ausgeprägt. Die Korrelationskoeffizienten aller Männer und der Wenigumstadter Frauen liegen nur bei etwa 0,35. Wie bereits im Falle der Lendenwirbelkörper zeigen auch hier nur die Altenerdinger Frauen einen deutlichen, erwartungskonformen Strukturverlust mit steigendem Lebensalter ($r=0,63$; $p=0,000$). Eine Diskontinuität im TBPf-Verhalten, ausgelöst durch einen rapiden Verlust an struktureller Qualität der Spongiosa in einem bestimmten Lebensabschnitt, kann auch hier nicht beobachtet werden (Abb. 11).

Ähnlich wie bei den Lendenwirbelkörpern sind die TBPf-Werte von Frauen und Männer beider Untersuchungskollektive jeweils hoch mit dem Parameter Trabekelfläche korreliert ($r= -0,71$ bis $-0,86$; $p=0,000$).

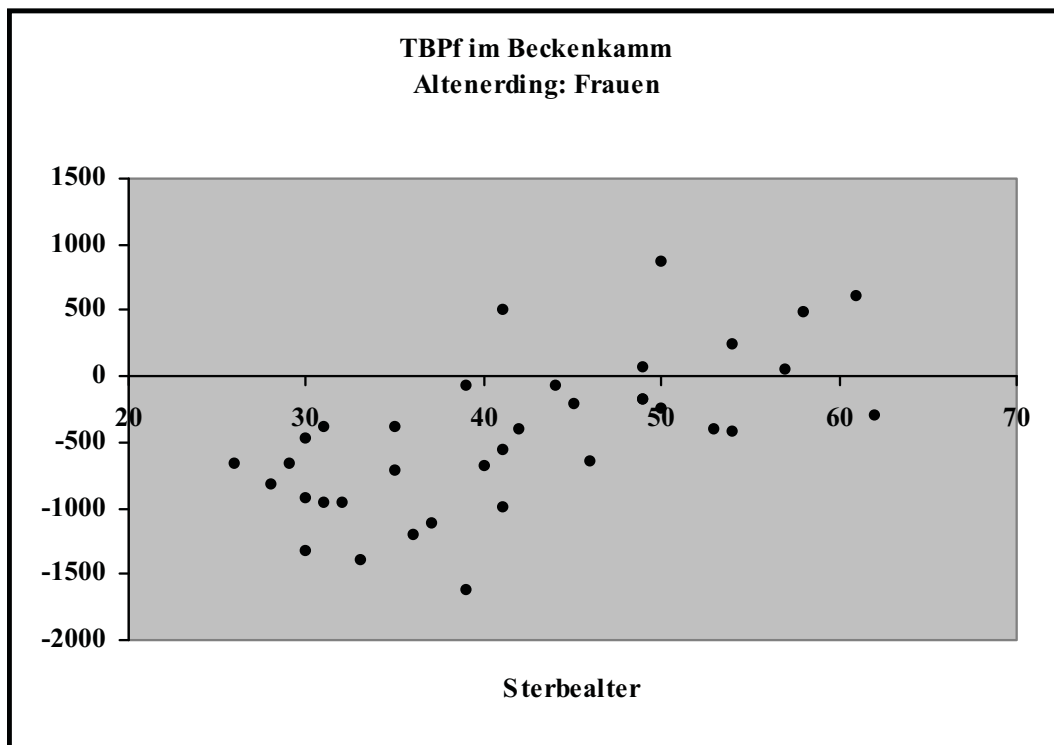


Abb. 11. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und dem Trabecular Bone Pattern factor ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit ($7,35\text{mm}^2$) im Beckenkamm Altenerdinger Frauen.

4.1.3. Porosität der Femurcompacta

Die Porosität der Femurcompacta nimmt mit steigendem Alter zu. Dieser Trend ist bei allen Frauen und den Altenerdinger Männern deutlich ausgeprägt ($r=0,61$ bis $0,71$; $p=0,000$). Hingegen zeigen Männer des Wenigumstadter Kollektives nur eine schwache Korrelation der Porosität mit dem Alter ($r=0,35$; $p=0,025$). Die Streuung ihrer Werte ist vergleichsweise gering, ein Anstieg aber kaum ausgeprägt (Abb. 12).

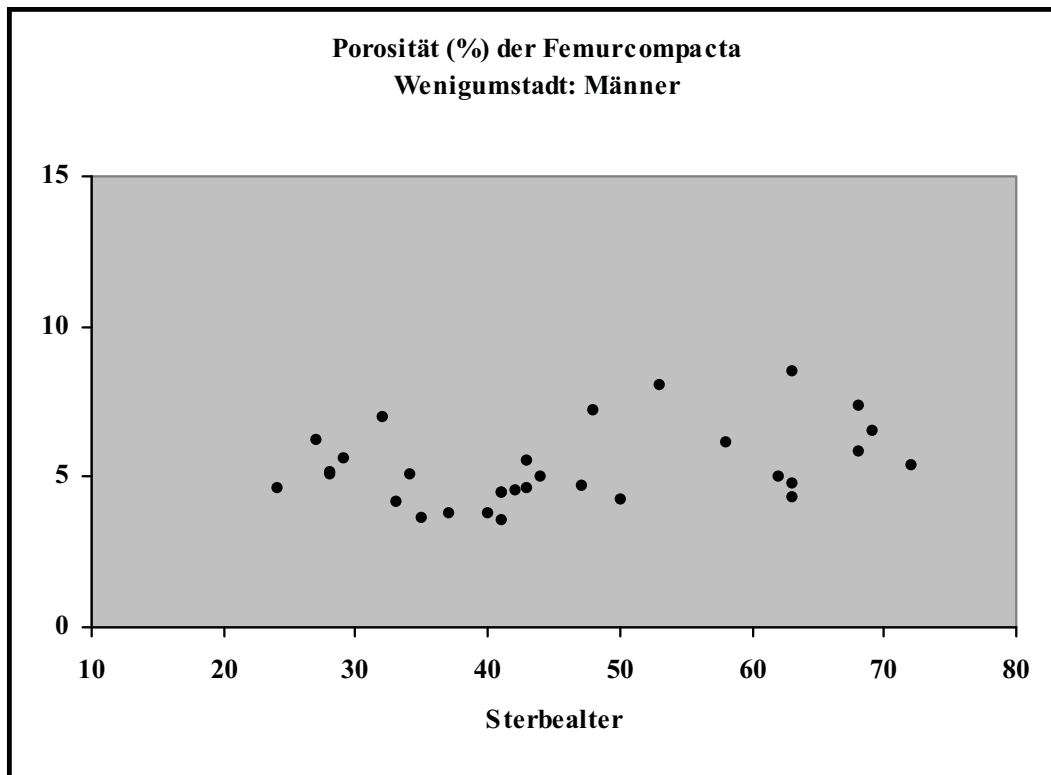


Abb. 12. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und der Porosität (%) der Femurcompacta Wenigumstadter Männer.

Die Frauen zeigen mit höherem Lebensalter einen gewissen Anstieg der individuellen Variabilität. Besonders deutlich erkennbar wird diese Tendenz bei den Wenigumstadter Frauen, bei denen die Porositätswerte einiger älterer Individuen den Trend des Kollektivs auffällig übersteigen (Abb. 13).

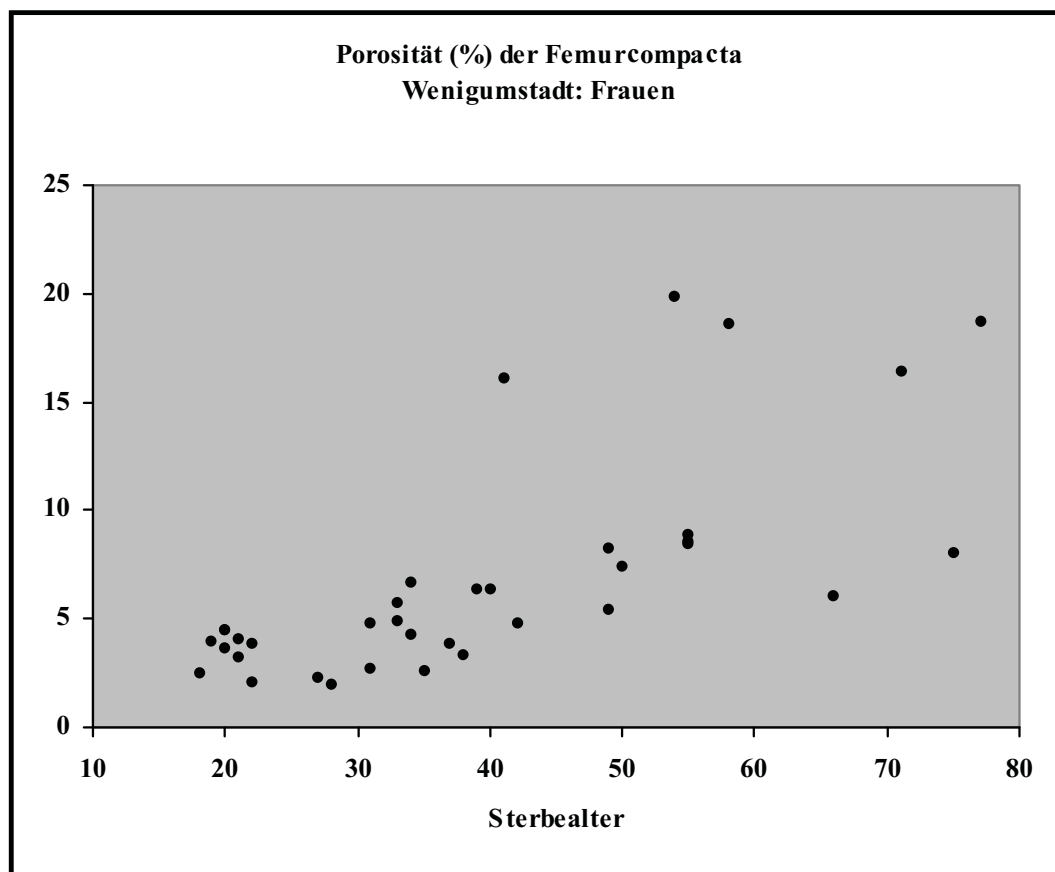


Abb. 13. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und der Porosität (%) der Femurcompacta Wenigumstadter Frauen.

In beiden Untersuchungskollektiven erfolgt der Anstieg der Femurcompactaporosität tendenziell im weiblichen Geschlecht stärker als im männlichen. Abb. 14 illustriert dieses Phänomen exemplarisch für das Altenerdinger Untersuchungskollektiv.

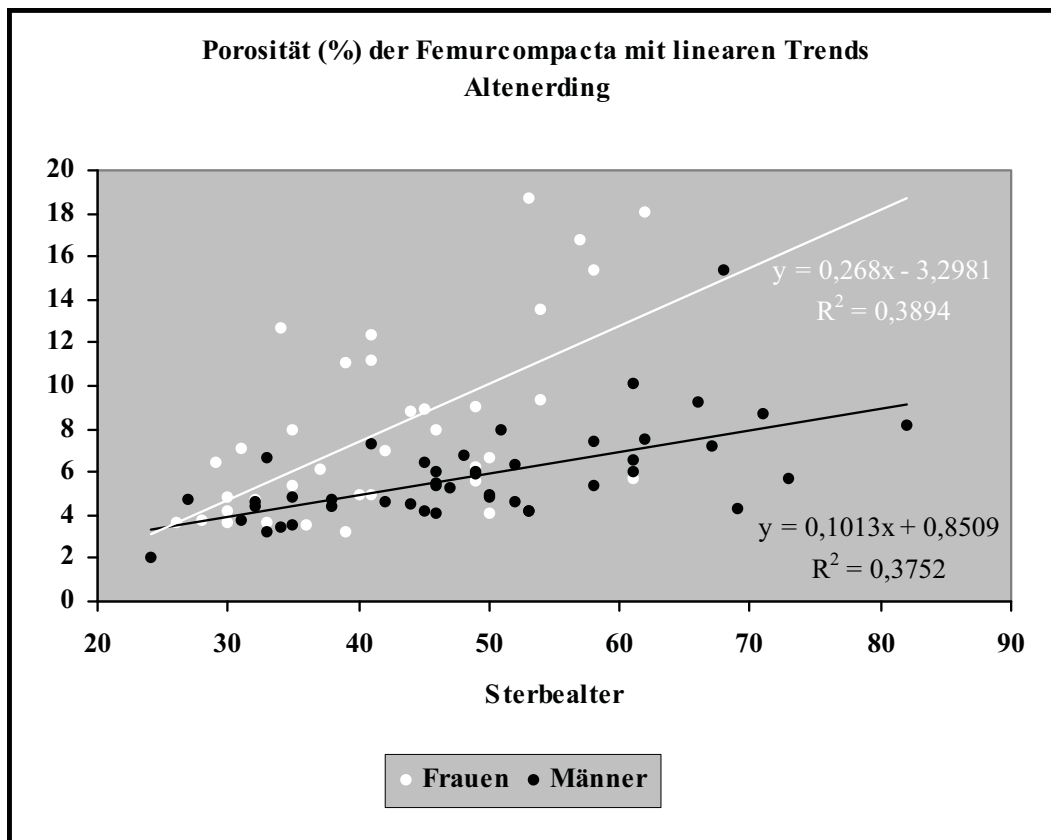


Abb. 14. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und der Porosität (%) der Femurcompacta Altenerdinger Individuen mit geschlechtsspezifischen Trends.

Die Erhöhung der Femurporosität beruht im Wesentlichen auf einer Dilatation vorhandener physiologischer Hohlräume. Ein deutlicher Anstieg ihrer Zahl mit dem Lebensalter ist nicht erkennbar.

4.1.4. Materialerfüllungsgrad der Rippen

Der Materialerfüllungsgrad der Rippen nimmt bei Frauen und Männern beider Untersuchungskollektive mit dem Alter ab. Dieser Trend ist bei Frauen höchst signifikant, bei den Männern kann er auf dem 1%-Niveau gesichert werden. Am deutlichsten stellt er sich für die Frauen des Altenerdinger Kollektivs dar ($r=-0,58$; $p=0,000$). Siehe Abb. 15.

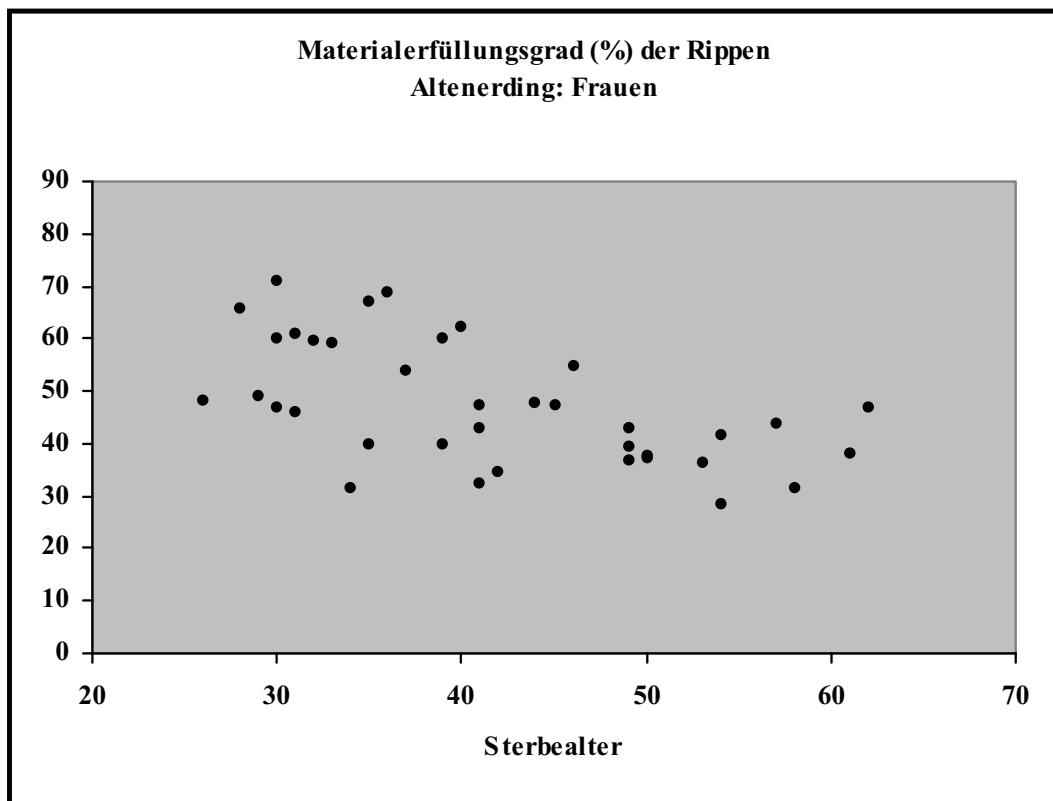


Abb. 15. Zusammenhang zwischen dem Sterbealter und dem Rippenmaterialerfüllungsgrad (%) bei Altenerdinger Frauen.

Ein gesicherter Trend zur Veränderung der Rippenquerschnittsfläche mit dem Alter konnte in beiden Untersuchungskollektiven nicht beobachtet werden.

4.2. Osteoporosestatus

Der Osteoporosestatus stellt einen Kennwert der Osteoporoseprädisposition auf der Individuenebene eines Untersuchungskollektivs dar (vgl. 5.7.). Er dient weniger zur Diagnose klinisch manifester Osteoporose bzw. zur Festlegung des Frakturrisikos, sondern zur Bewertung, ob, inwieweit und in welcher Richtung Individuen aller Altersklassen vom altersspezifischen Sollwert des histomorphometrischen Index abweichen. Negative Werte signalisieren einen mehr oder weniger starken Einfluss pathologischer bzw. osteoporotischer Veränderungen, welche zum physiologischen, altersspezifischen Knochenabbau beitragen.

Der Osteoporosestatus differenziert durch sein Vorzeichen kollektivintern zwischen Individuen, die eher osteoporotische Tendenzen zeigen (negative Werte) und solchen, die einen mehr oder weniger überdurchschnittlichen Knochenstatus aufweisen (positive Werte). Auffällig niedrige Werte legen den Verdacht manifester osteoporotischer Erkrankungen nahe (vgl. 6.7.). Röntgen- und Skeletbefunde sollten jedoch zur Absicherung entsprechender Interpretation herangezogen werden.

Da nach Kapitel 4.1. geschlechtsspezifische Unterschiede im Parameterverhalten bestehen wird der Osteoporosestatus jeweils für Frauen und Männer beider Untersuchungskollektive getrennt berechnet. Gemäß Kapitel 3.8. beruht er auf folgenden vier Messparametern: Porosität der Femurcompacta, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Beckenkamm, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper und Rippenmaterialerfüllungsgrad. Er wird als dimensionsloser Kennwert in Form der standardisierten Abweichung vom alters- und geschlechtsspezifischen Trend im Untersuchungskollektiv angegeben.

Die individuellen Osteoporosestatuswerte für Männer und Frauen beider Untersuchungskollektive sind im Anhang A4 tabelliert.

4.2.1. Osteoporosestatuswerte Wenigumstadter Frauen

Da beim Wenigumstadter Untersuchungskollektiv dekompositionsbedingt von zwei weiblichen Individuen (Grabnummer: 3 und 231) keine Parameterwerte für Beckenkamm und Lendenwirbelkörper ermittelt werden konnten, verringert sich die Anzahl der betrachteten Personen entsprechend.

Abb. 16 illustriert den Osteoporosestatus der Wenigumstadter Frauen. Auffällig verhalten sich die Individuen 86 und 131. Ihre Indexwerte weichen deutlich vom Osteoporosestatus der anderen Frauen ab und liegen mehr als 2 Standardabweichungen unterhalb der jeweiligen Altersnorm.

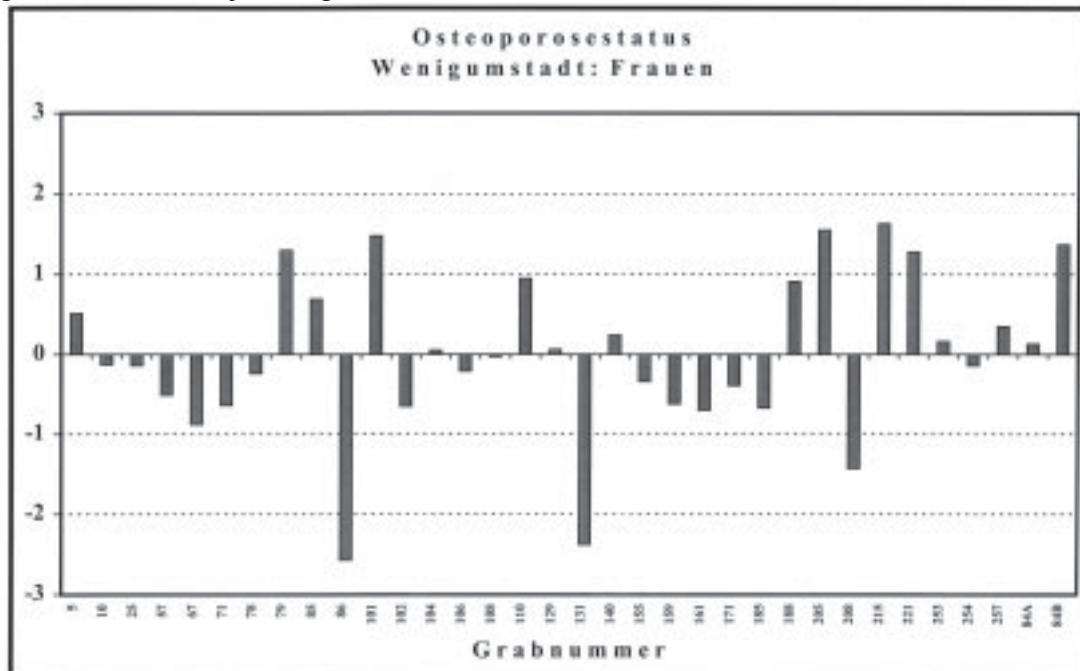


Abb. 16. Osteoporosestatuswerte Wenigumstadter Frauen, nach Grabnummern sortiert.

Frau Nr. 86 verstarb im Alter von 54 Jahren, Frau Nr. 131 wurde 41 Jahre alt. Die Skeletbefunde beider Individuen weisen Besonderheiten auf, die im Zusammenhang mit atrophischen Prozessen relevant erscheinen: Die großen Langknochen von Grab

Nr. 86 charakterisieren sich, bei relativ gutem Erhaltungsgrad und vor dem Hintergrund der übrigen Befunde, durch ein ungewöhnlich geringes Gewicht. Ihre Compacta wirkt fragil und spröde.

Die Femora von Frau Nr. 131 sind deformiert: Beide Diaphysen zeigen eine unphysiologische, dorsoventrale Krümmung. An postmortal entstandenen Bruchstellen anderer Skeletelemente (z.B. Wirbelkörper, Fersenbeine) erkennt man bereits makroskopisch eine dramatische Rarefizierung spongiöser Strukturen. Der radiologische Befund für Grab Nr. 86 ist dekompositionbedingt nur wenig aussagekräftig. Erkennbar ist lediglich eine gewisse Trabekelrarefizierung im Oberschenkelhalsbereich und eine ungewöhnlich geringe Dicke der proximalen Femurdiaphysencompacta. Der Röntgenbefund von Frau Nr. 131 ist gekennzeichnet durch auffällige Längsstreifung und starke Framing-Effekte an allen vorhandenen Wirbelkörpern. Das Wardsche Dreieck der Femora tritt extrem hervor, die proximalen Femurdiaphysencompacta erscheint ausgesprochen dünn, zeigt markseitige Spongiosierungstendenzen und weist eine Längsstreifung auf.

Die Werte für den Osteoporosestatus der übrigen Individuen verhalten sich wenig auffällig. Die Nulllinie unterteilt das Kollektiv in zwei Gruppen und zeigt so, bei welchen Individuen die alterstypische strukturelle Quantität des Knochens unterschritten wird.

Die stark negativen Werte der Individuen Nr. 86 und 131 nehmen einen gewissen Einfluss auf die Regression bzw. auf die Lage der Nulllinie. Inwieweit sich eine Neuberechnung unter Ausschluss dieser Extremfälle empfiehlt, muss in Abhängigkeit von sich anschließenden Fragestellungen entschieden werden.

4.2.2. Osteoporosestatuswerte Wenigumstadter Männer

Für das Individuum Nr. 212 konnten dekompositionsbedingt keine Messwerte der Lendenwirbelkörperspongiosa ermittelt werden, weshalb es nicht zur Osteoporosestatusberechnung heran gezogen wird. Ebenfalls von den Kalkulationen ausgeschlossen bleiben die Werte von Skelet Nr. 222. Im Bereich des Beckenkammes findet man bei diesem Individuum stark verdickte, geflechtartige Trabekelplatten, welche in der histomorphometrischen Analyse zu extremen Messwerten führen. Insbesondere die Trabekelfläche im Beckenkamm übersteigt den altersspezifischen Trend um fast 5 Standardabweichungen (siehe auch 4.1.2.). Die Parameter der anderen Skeletelemente hingegen liegen jeweils im üblichen Schwankungsbereich und verhalten sich unauffällig. Weil ein isolierter, derart unphysiologischer Extremwert das Kombinationsprinzip der Indexmethode unterläuft, indem er, beinahe unabhängig vom Einfluss der anderen Messparameter, einen stark positiven Osteoporosestatus erzwingt, wurde Individuum Nr. 222 nicht berücksichtigt. Der makroskopische Skeletbefund liefert keine Anhaltspunkte zur Klärung dieser ungewöhnlichen Situation. Der radiologische Befund ist stark durch Dekompositionsprozesse beeinträchtigt. Er lässt lediglich eine hohe Röntgendichte aller untersuchten Skeletelemente erkennen. Weil das Individuum 222 von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen blieb, erfolgt eine Stellungnahme zur möglichen Interpretation bereits an dieser Stelle der Arbeit:

Man könnte den ungewöhnlichen Befund dieses 50jährigen Mannes als einen Fall von Morbus Paget deuten, von der über 40jährige mit einer Wahrscheinlichkeit von 2-3% betroffen sind (Aufderheide und Rodríguez-Martín 1998). Eine monostotische

Manifestation ist nicht ungewöhnlich. Kruse und Kuhlencordt (1984) konnten zeigen, dass gerade das Becken sehr häufig betroffen ist.

Abb. 17 zeigt den Osteoporosestatus Wenigumstadter Männer unter Ausschluss von Grab Nr. 222.

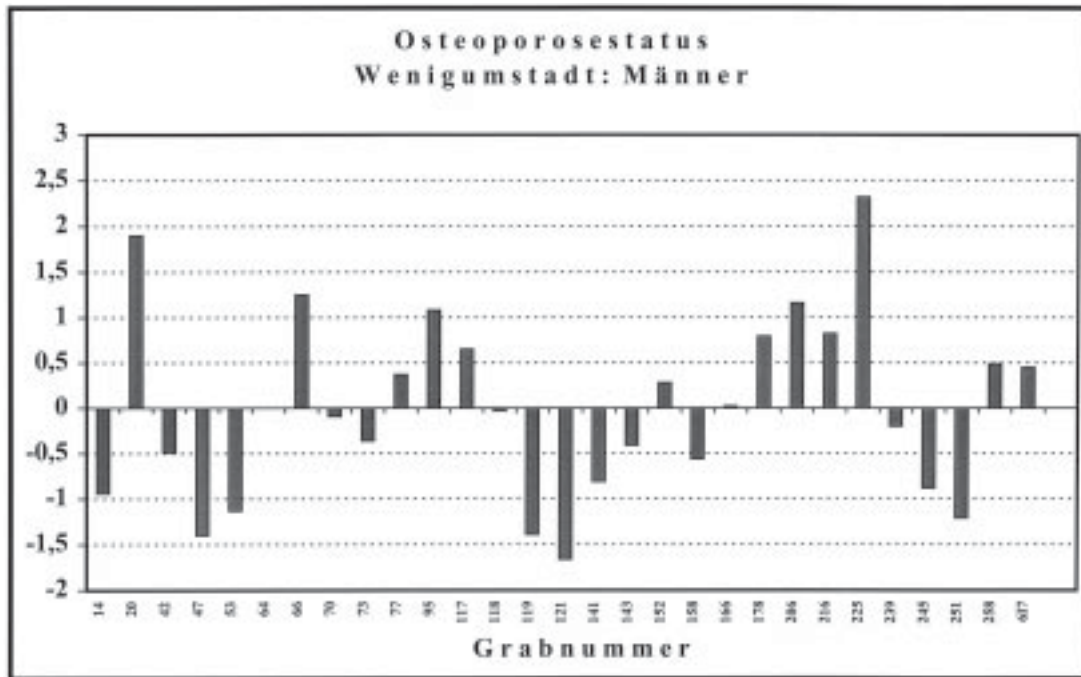


Abb. 17. Osteoporosestatuswerte Wenigumstadter Männer, nach Grabnummern sortiert.

Es ergibt sich ein relativ ausgewogenes Bild. Auffällige Extremfälle, die den Schwankungsbereich der Werte deutlich verlassen, gibt es nicht. Lediglich der Osteoporosestatus des Mannes mit Grabnummer 225 liegt etwas mehr als 2 Standardabweichungen über dem altersspezifischen Trend. Der Mann wurde 63 Jahre alt. Makroskopisch betrachtet besitzt er einen sehr robusten Skelettbau, was sich auch im Röntgenbefund bestätigt. Schwache degenerative Veränderungen im Bereich der Wirbelsäule treten, angesichts seines fortgeschrittenen Alters, erwartungskonform auf.

4.2.3. Osteoporosestatuswerte Altnerdinger Frauen

Die Werte für den Osteoporosestatus Altnerdinger Frauen sind ebenfalls relativ ausgewogen verteilt (Abb. 18).

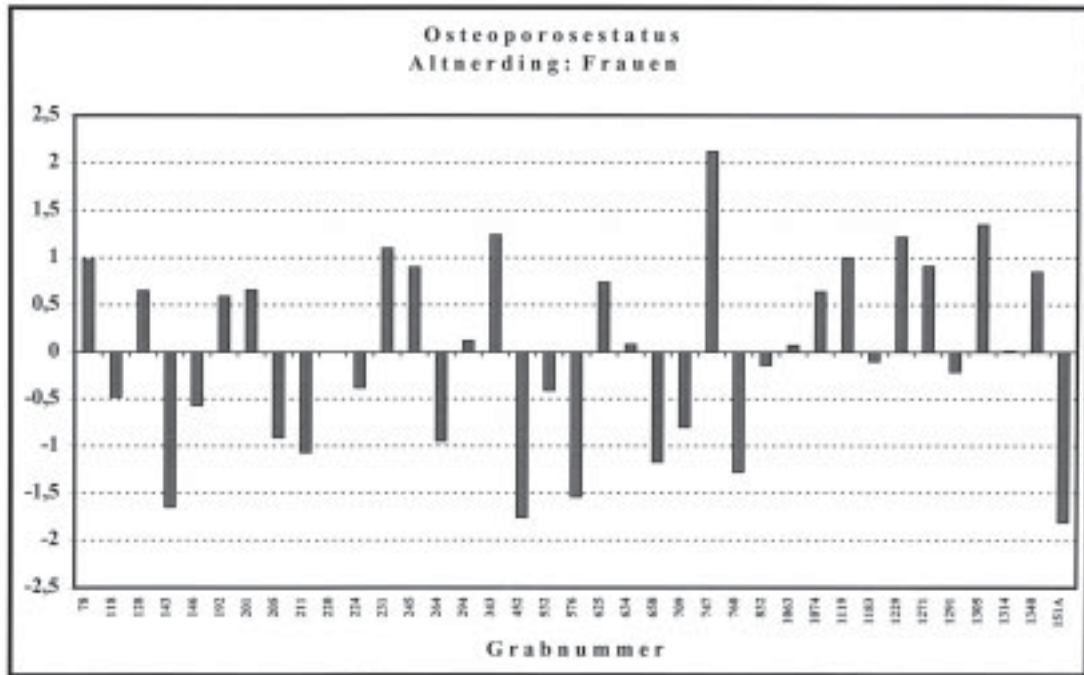


Abb. 18. Osteoporosestatuswerte Altnerdinger Frauen, nach Grabnummern sortiert.

Im negativen Bereich findet man keine Extremwerte, die sich auffällig von der üblichen Schwankungsbreite abheben. Die positiven Werte erreichen mit Grabnummer 747 einen gewissen Gipfel. Diese Frau ist mit 36 Jahren zu einer Zeit verstorben, in der spätestens die peak bone mass erreicht wird.

Auch hier kann das Kollektiv durch die Nulllinie in zwei Gruppen unterteilt werden, deren Individuen sich durch Vorhandensein bzw. Fehlen atrophischer Tendenzen unterscheiden.

4.2.4. Osteoporosestatuswerte Altnerdinger Männer

Bei der Osteoporosestatusberechnung der Altnerdinger Männer werden zwei Individuen durch stark negative Werte auffällig (Abb. 19). Ein 68jähriger Mann mit Grabnummer 725 liegt 3 Standardabweichungen unter dem altersspezifischen Trend. Der Skeletbefund zeigt extreme Osteophytenbildung der Wirbelkörper, vor allem im Lendenwirbelsäulenbereich. Lang- und Beckenknochen sind trotz guten Erhaltungszustandes ungewöhnlich leicht und wirken fragil. Pathologischer Natur ist der Befund von Kompressionsbrüchen zweier Lendenwirbelkörper (L2, L5). Im Bereich des Oberschenkelhalses ist das rechte Femur liegezeitlich bedingt stark beschädigt. Reste seiner offenliegenden Trabekelstruktur lassen Anzeichen von hypertrophen

Reaktionen auf lokale Ermüdungsfrakturen von Knochentrabekeln im Halsbereich erkennen. Eine genaue Abklärung ist wegen des schlechten Erhaltungszustandes jedoch nicht mehr möglich.

Der Röntgenbefund zeigt eine extreme Längsstreifung und starke Framing-Effekte an allen vorhandenen Wirbelkörpern. Die proximale Femurdiaphysencompacta erscheint dünn, das Wardsche Dreieck tritt deutlich hervor.

Individuum Nr. 1090 liegt mehr als 2 Standardabweichungen unter dem altersspezifischen Trend und wurde 41 Jahre alt. Hier lässt der Skelettbefund kaum degenerative Veränderungen erkennen. Anzeichen für Wirbelkompressionen fehlen. Auffällig sind hingegen die Folgen eines massiven Frakturereignisses am linken Unterschenkel. Betroffen waren die distalen Diaphysen von Tibia und Fibula. Beide Frakturen sind etwas schief verheilt. Auf Komplikationen weisen viele Porositäten endzündlicher Genese auf beiden Skeletelementen und starke Osteophytenbildung an der Fibula hin. Besonders in der Frakturzone der Tibia treten zusätzlich kloakenartige Kanalstrukturen mit Durchmessern im Millimeterbereich auf.

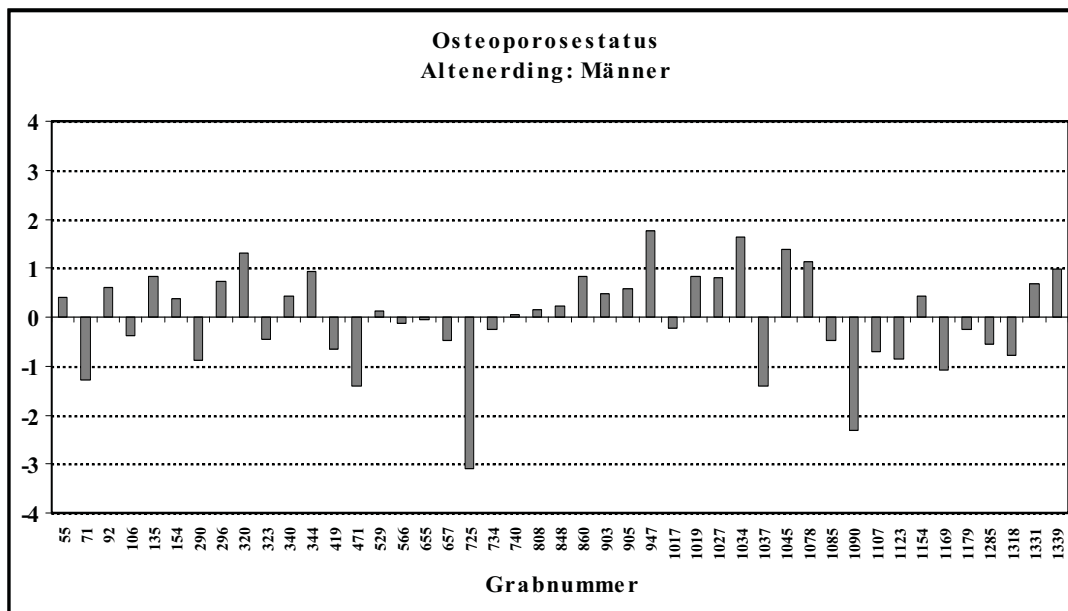


Abb. 19. Osteoporosestatuswerte Altenerdinger Männer, nach Grabnummern sortiert.

Auch hier nehmen die beiden stark negativen Werte der Individuen Nr. 725 und 1090 einen gewissen Einfluss auf die Regression bzw. auf die Lage der Nulllinie. Inwieweit sich eine Neuberechnung unter Ausschluss dieser Extremfälle empfiehlt, ehe man an Hand der Nulllinie zwei Untergruppen bildet, hängt wiederum von weiterführenden Fragestellungen ab.

4.2.5. Vergleich der Osteoporosestatuswerte mit Sozialstratigraphie und Chronologie der Gräberkollektive

Wegen der unter 3.9. erwähnten Einschränkungen der Aussagemöglichkeiten zu Sozialstratigraphie und Chronologie beider Untersuchungskollektive, die vor allem auf die Aktivitäten von Grabräubern zurückzuführen sind, schien nur die kollektive Betrachtung grobunterteilter Individuengruppen sinnvoll. Sie soll klären, ob auffällige Unterschiede bezüglich osteoporotischer Tendenzen zwischen den Gruppen bestehen. Die jeweilige Zuweisung der einzelnen Individuen kann dem Anhang A5 entnommen werden.

Gräberfeld Wenigumstadt

Beim Vergleich einer Gruppe von 13 gesichert wohlhabenden Individuen und 50 Bestattungen mit ärmlichen, fehlenden oder geraubten Beigaben bezüglich ihrer Osteoporosestatusmittelwerte zeigt sich eine signifikante Differenz auf dem 5%-Niveau (vgl. 3.13.). Die ausschließlich wohlhabende Gruppe weist mit $-0,41$ einen deutlich niedrigeren Durchschnittswert auf, als die im Mittel ärmeren Vergleichsindividuen mit $+0,11$. Dabei ist anzunehmen, dass auch der Vergleichsgruppe ein gewisser Anteil wohlhabender, aber später beraubter Bestattungen angehört. Vergleicht man die Gruppe der Wohlhabenden ausschließlich mit 9 Individuen, für die eine ärmliche Grabausstattung, trotz hoher Beraubungsdichte, sicher nachgewiesen werden kann, so zeigt sich dieselbe Tendenz, bei fast identischen Werten. Eine befriedigende statistische Absicherung ist allerdings auf Grund der geringen Individuenzahl hier nicht möglich ($p=0,15$).

Stellt man die 5 völkerwanderungszeitlichen Bestattungen des 5. Jahrhunderts 38 Individuen aus der zweiten Belegungsphase, die ins 7. und 8. Jahrhundert datierbar sind, gegenüber, so resultiert eine signifikante Differenz der Osteoporosestatusmittelwerte. Der erfassbare Wert im 5. Jahrhundert ist mit $-0,39$ deutlich schlechter, als der Mittelwert des 7./8. Jahrhunderts mit $+0,02$. Gräber aus der zweiten Hälfte des 6. Jahrhunderts, unmittelbar nach der Belegungsunterbrechung (vgl. 2.) standen für einen Vergleich nicht zur Verfügung.

Gräberfeld Altenerding

Ein Vergleich von 15 gesichert wohlhabenden Bestattungen mit 67 ärmeren führt zu keinem signifikanten ($p=0,22$) Unterschied bezüglich der Osteoporosestatusmittelwerte beider Gruppen. Tendenziell ergibt sich ein zu den Wenigumstadter Verhältnissen umgekehrtes Bild: Der Mittelwert der wohlhabenden Gruppe liegt mit $+0,16$ etwas höher als der der Vergleichsgruppe mit $-0,04$. Selbst wenn man die Gruppe der 67 Individuen mit ärmerer Grabausstattung gegen 31 Gräber ohne nennenswerte Beigaben ersetzt, ändert sich das Bild nicht wesentlich. Die chronologische Gegenüberstellung der 33 Bestattungen aus dem 5./6. Jahrhundert und denen des 7. Jahrhunderts zeigt, wie im Falle Wenigumstadts, eine signifikante Verbesserung des Osteoporosestatusmittelwertes in der späteren Belegungsphase. Der Beitrag des 5. Jahrhunderts zur ersten Gruppe ist dabei auf 3 Individuen beschränkt.

4.3. Vergleich der Trabekelfläche im Beckenkamm mit medizinischen Referenzdaten

Die Spongiosaprobe aus dem Beckenkamm wurden exakt an der Stelle entnommen, die auch zur histomorphometrischen Abklärung medizinischer Osteoporosefälle mittels Biopsie erschlossen wird. Ein Vergleich der am Becken historischer Skelete gemessenen Trabekelfläche mit medizinischen Daten des 20. Jahrhunderts bietet sich an.

Wie bereits in Kapitel 3.10. dargestellt, müssen dazu die erhöhte Präparatedicke bei archäologischem Skeletmaterial berücksichtigt, die Messwerte durch einen entsprechenden Umrechnungsfaktor korrigiert und die Flächenparameter in die medizinisch gebräuchlichen TBV%-Werte transformiert werden. TBV% (Trabecular Bone Volume) ist ein dreidimensionaler, histomorphometrischer Strukturparameter und gibt an, wieviel Prozent eines räumlichen Spongiosaausschnittes von Knochentrabekeln eingenommen wird.

4.3.1. Ermittlung von Umrechnungsfaktoren

Die Messwerte der Schnittdicketestreihen sind mit der Präparatedicke positiv linear korreliert. Abb. 20 zeigt dies exemplarisch für das Altenerdinger Grab Nr. 1305.

Alle Datensätze der Schnittdicketestreihen sind im Anhang A6 zusammengestellt.

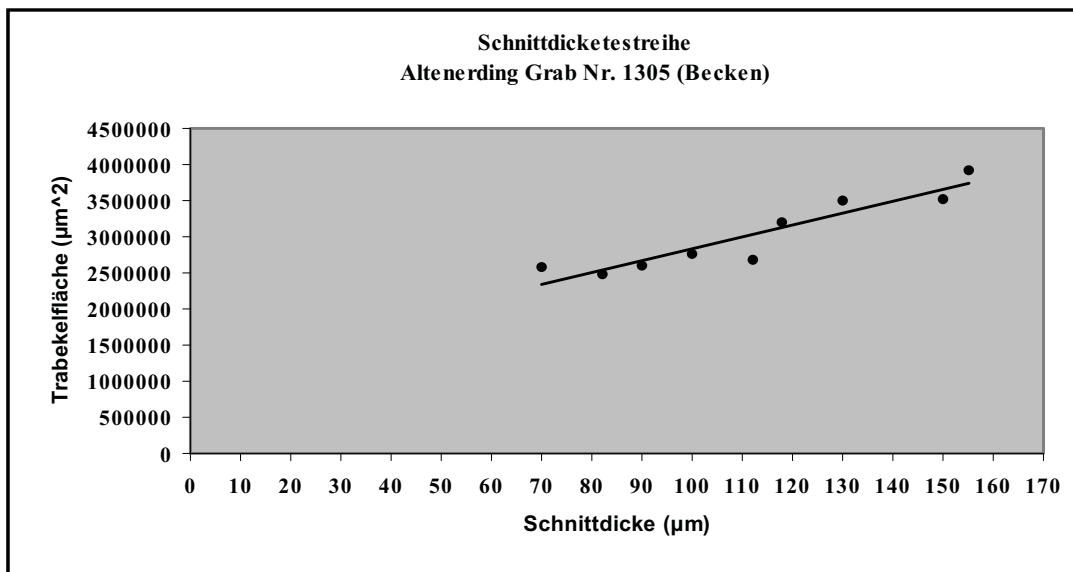


Abb. 20. Zusammenhang zwischen der Schnittdicke (µm) und der Trabekelfläche (µm²) im Beckenkamm pro Standarduntersuchungseinheit bei einem Altenerdinger Individuum, Grab Nr. 1305.

Gemäß 3.10. wurde für jedes Individuum mittels Regressionsanalyse, ausgehend von der Schnittdicke, die Trabekelfläche geschätzt, auf medizinisch gebräuchliche Schnittdicken von 4-10 µm extrapoliert und ein Umrechnungsfaktor k berechnet. Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den Resultaten.

Grab Nr.	n	Regressionsgleichung	R^2	p-Wert der Regression	k für 5 μm
WU 25	8	$y=5620 \cdot x + 1098107$	0,49	0,053	0,68
WU 102	5	$y=3999 \cdot x + 1956158$	0,73	0,064	0,84
AE 740	11	$y=9773 \cdot x + 1613168$	0,81	0,000	0,64
AE 848	11	$y=2761 \cdot x + 1131400$	0,15	0,245	0,81
AE 1305	9	$y=16506 \cdot x + 1181862$	0,87	0,000	0,45

Tabelle 1. Übersicht zu den Regressionen der Schnittdicketestreihen. Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung: n: Anzahl der auswertbaren Schnitte eines Individuums; R^2 : Bestimmtheitsmaß der Regression; k: Ermittelter Umrechnungsfaktor für die exemplarische Annahmen einer Schnittdicke von 5 μm beim medizinischen Material.

Dabei entspricht n der Anzahl der Schnitte, die erfolgreich hergestellt werden konnten. Der Umrechnungsfaktor k gilt für die Annahme, dass man archäologische Präparate, die eine Dicke von 100 μm besitzen, mit den Daten einer medizinischen Studie vergleichen will, welche Schnittdicken von 5 μm verwendet.

Das Bestimmtheitsmaß der Regression zu Grab Nr. 848 ist sehr gering ($R^2=0,15$) und nicht signifikant von Null verschieden. Die Regressionsgleichungen für die Gräber Nr. 25 und 102 verfehlen das 5%-Signifikanzniveau hingegen nur knapp ($p=0,053$ bzw. 0,064), wobei sich hier vor allem die geringe Anzahl der Serienschritte auswirkt. Unproblematisch zeigen sich die Ergebnisse der Schnittdicketestreihen von den Gräbern Nr. 740 und 1305. Bei ihnen nimmt R^2 hohe Werte an und ist gut abgesichert.

Bildet man - aus oben genannten Gründen unter Auslassung der Schnittdicketestreihe von Grab Nr. 848 - für k den Durchschnitt, so erhält man einen Wert von 0,65.

Berechnet man den Umrechnungsfaktor unter der Annahme einer Schnittdicke von 5 μm und einer mittleren Trabekeldicke von 100 μm (Kimmel und Jee 1983) über den theoretischen Fehler, der durch eine nicht-infinitesimale Schnittdicke verursacht wird (vgl. 3.10.), so erhält man einen Wert von 0,63.

Beide Korrekturfaktoren nehmen sehr ähnliche Werte an. Darin zeigt sich, dass die erwähnten Vereinfachungen bzw. Unkorrektheiten (vgl. 3.10.) der zwei unterschiedlichen Verfahren keine massiven Fehler verursachen. Welcher Faktor den tatsächlichen Gegebenheiten am nächsten kommt, kann nicht geklärt werden. Daher wird im Folgenden der Durchschnittswert beider Berechnungsvarianten zur Korrektur der archäologischen Messparameter verwendet.

4.3.2 Vergleich des TBV%-Verhaltens

Die Schnittdicke histomorphometrischer Beckenspongiosapräparate in medizinischen Studien schwankt in den meisten Fällen zwischen 5 und 10 μm . Eine rechnerische Korrektur der Flächenmesswerte wird in der Regel nicht vorgenommen, da der Fehler mit ca. 3-6% (Parfitt 1973) relativ gering ist. Für die folgenden Vergleiche wurde der Korrekturfaktor für die archäologischen Flächenmesswerte jeweils den entsprechenden Schnittdicken der medizinischen Studien angepasst und die korrigierten Flächenparameter gemäß 3.10. zu TBV%-Werten konvertiert.

Es muss beachtet werden, dass die TBV%-Werte des archäologischen Materials tendenziell etwas unterschätzt werden, da die unmineralisierten Osteoidsäume der Trabekel dekompositionsbedingt hier nicht mehr vorhanden sind, in medizinischen Untersuchungen allerdings mitgemessen werden (z.B. Kimmel und Jee 1983). Um welche Größenordnung es sich bei diesem Effekt handelt, kann aus den Ergebnissen einer Studie von Chavassieux et al. (1985) erschlossen werden, in der der durchschnittliche Osteoidvolumenanteil knochengesunder Personen mit 1,2% angegeben wird.

Alle medizinischen Studien, die im Folgenden für Vergleiche herangezogen werden, beziehen sich ausdrücklich nur auf gesunde Individuen, die keine Anzeichen osteoporotischer Erkrankungen erkennen lassen bzw. sie trennen genau zwischen osteoporosekranken und knochengesunden Individuen. Daher werden auch bei den archäologischen Kollektiven jene Individuen, bei denen auf Grund der Osteoporosestatuswerte ein begründeter Verdacht für das Vorliegen osteoporotischer Erkrankungen besteht, abgetrennt und gesondert betrachtet. Betroffen sind zwei Wenigumstadter Frauen (Grab Nr. 86, 131) und zwei Altenerdinger Männer (Grab Nr. 725, 1090). Das männliche Individuum Nr. 222 aus dem Wenigumstadter Kollektiv wurde wegen seiner extremen Beckenwerte (vgl. 5.2.2.) nicht an den Vergleichen beteiligt.

Da die Anzahl der prinzipiell vergleichbaren Studien sehr hoch ist, muss der zufällige, exemplarische Charakter der hier getroffenen Auswahl betont werden. Die folgenden Untersuchungen schienen geeignet, da sie eine relativ hohe Anzahl von Individuen betreffen und weil Ergebnisse in quantitativ verwertbarer Form, d.h. Regressionsgleichungen bzw. konkretes Zahlenmaterial, publiziert wurden.

Studie 1 (Merz und Schenk 1970)

Untersucht wurde Sektionsmaterial von 116 knochengesunden Individuen beiderlei Geschlechts, die durch Unfall, Selbstmord oder ein Verbrechen ums Leben kamen. Die Schnittdicke der Beckenkammproben betrug 4-6 μm . Die Daten des verglichenen archäologischen Materials wurden deshalb auf den Durchschnittswert von 5 μm korrigiert. Die Studie präsentiert TBV%-Mittelwerte für Altersdekaden. Ebenso wurden auch die TBV%-Daten des Wenigumstadter und des Altenerdinger Kollektivs in Dekaden zusammengefasst und Mittelwerte gebildet. Ein Altenerdinger Mann (Grab Nr. 848) erreicht mit 82 Jahren als einziges Individuum die 9. Altersdekade. Zur Vereinfachung wurde er der 8. Dekade zugeordnet.

Abb. 21 stellt das TBV%-Verhalten der archäologischen Kollektive den Ergebnissen der medizinischen Studie gegenüber.

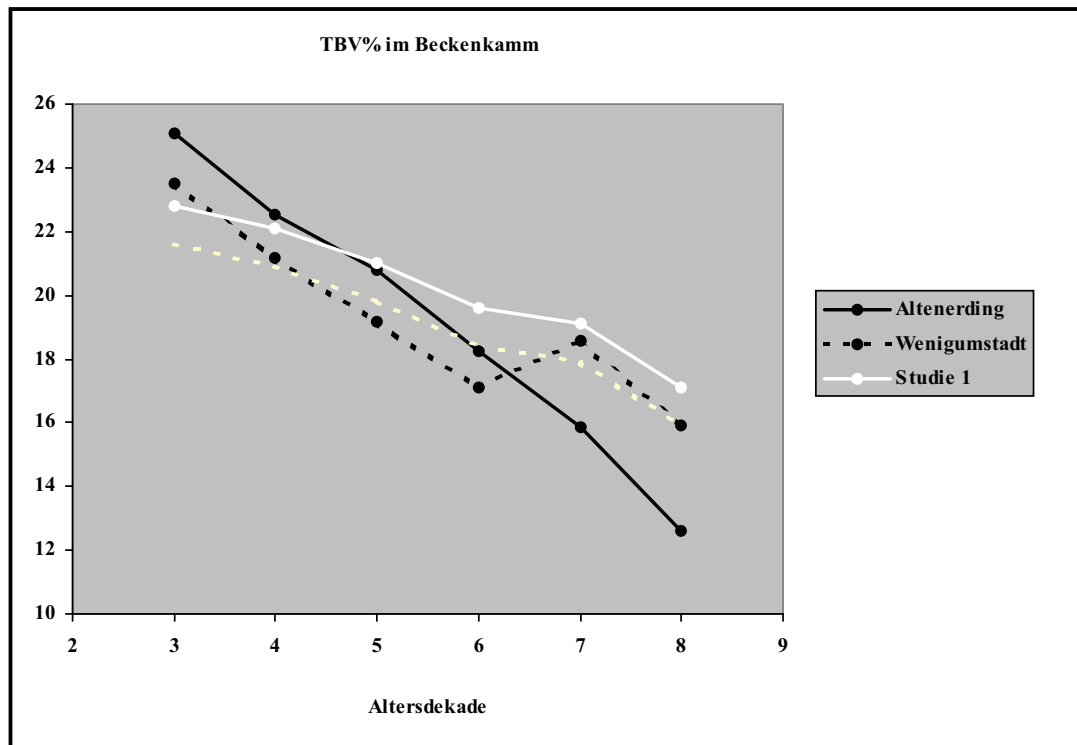


Abb. 21. Vergleich der transformierten Becken-TBV%-Verläufe des Altenerdinger und Wenigumstadter Untersuchungskollektivs mit medizinischen Referenzdaten aus Studie 1. Die gestrichelte weiße Linie deutet den ungefähren Verlauf der medizinischen Werte an, wenn das Osteoidvolumen nicht mitgemessen worden wäre.

Die gestrichelte weiße Linie stellt die um 1,2% (Chavassieux et al. 1985) erniedrigten TBV%-Werte von Studie 1 dar und gibt so einen Anhaltspunkt für den Einfluss des bei archäologischem Material nicht mehr messbaren Osteoidvolumens.

Eine statistische Beurteilung des unterschiedlichen TBV%-Verhaltens ist nicht möglich, weil Rohdaten und Angaben zur exakten Altersverteilung von Studie 1 nicht verfügbar sind. Angesichts der verschiedenen Unsicherheitsfaktoren, wie Einfluss von Osteoidvolumen und Korrekturfaktoren, scheint eine entsprechende Auswertung auch nicht sinnvoll.

Trotzdem lassen sich aus Abb. 21 zwei wesentliche Tendenzen ablesen:

1. Die TBV%-Werte der archäologischen Kollektive starten in Altersdekade 3 gegenüber der medizinischen Studie auf etwas erhöhtem Niveau, erfahren dann aber eine stärkere Reduktion als die Individuen des 20. Jahrhunderts.

2. Während sich der TBV%-Verlauf der Wenigumstadter Individuen noch mehr oder weniger im Bereich von Studie 1 bewegt, fallen die Werte des Altenerdinger Kollektivs trotz bester Ausgangslage so stark, dass sie in höheren Altersklassen den tiefsten Stand der drei Kollektive erreichen.

Studie 2 (Hahn et al. 1992)

Untersucht wurde Sektionsmaterial von 95 Männern und 97 Frauen, die alle durch Unfälle gestorben waren. Die Schnittdicke der Beckenpräparate betrug $6\mu\text{m}$. Publiert sind unter anderem Regressionsgleichungen für das altersabhängige TBV%-Verhalten.

Abb. 22 und Abb. 23 vergleichen die entsprechenden Regressionsgeraden von Männern und Frauen mit denen der archäologischen Kollektive. Die bereits bei Studie 1 beobachteten Tendenzen werden voll bestätigt. Dank der geschlechtsspezifischen Aufspaltung zeigt sich, dass die Unterschiede im Abfall der TBV%-Werte bei den Frauen stärker ausgeprägt sind.

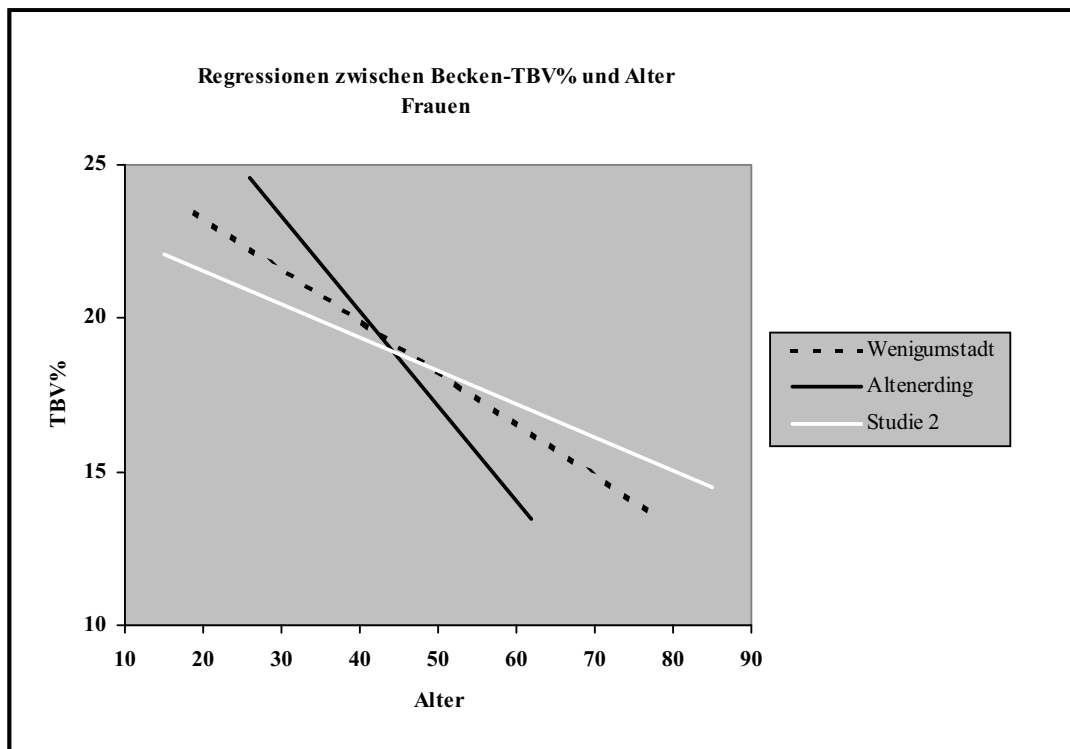


Abb. 22. Regression zwischen TBV% im Beckenkamm und dem Sterbealter weiblicher Individuen beider Untersuchungskollektive und medizinischer Referenzdaten aus Studie 2.

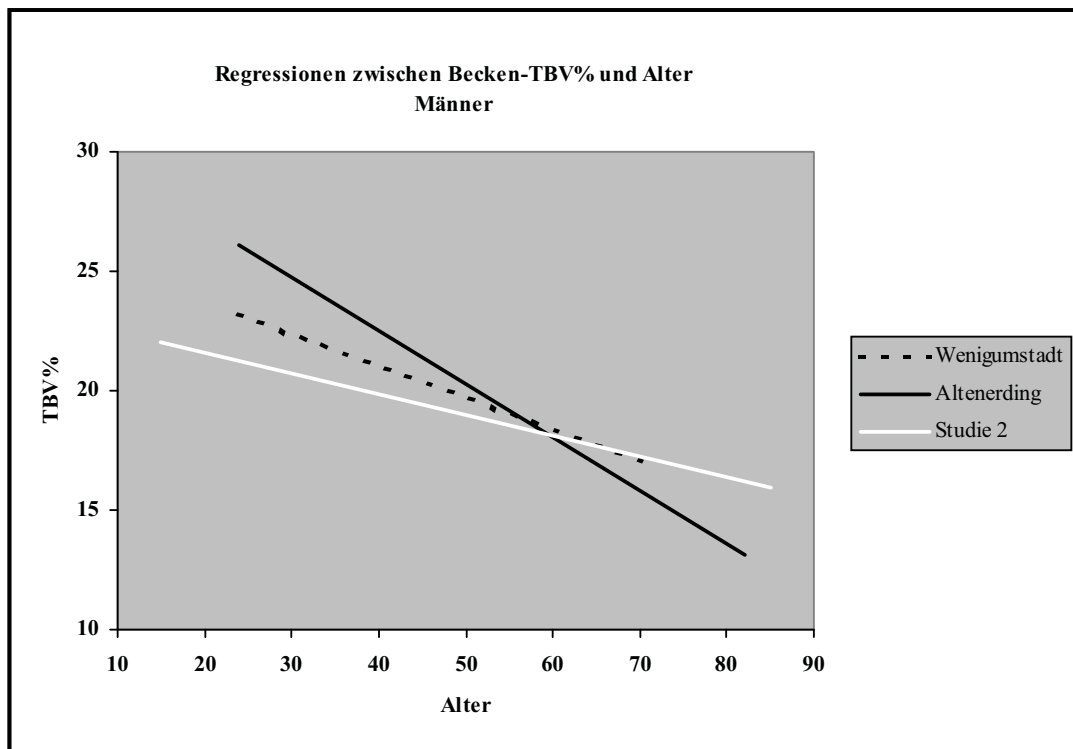


Abb. 23. Regression zwischen TBV% im Beckenkamm und dem Sterbealter männlicher Individuen beider Untersuchungskollektive und medizinischer Referenzdaten aus Studie 2.

Studie 3 (Nordin et al. 1981)

Diese Studie arbeitet mit Sektionsmaterial von gesunden und nachweislich osteoporosekranken Frauen. Die gesunden Individuen wurden nur grob in zwei Altersklassen (noch nicht 49 Jahre alt bzw. mindestens 49 Jahre alt) unterteilt. Beide Klassen sind unterschiedlich stark besetzt ($n=25$ bzw. $n=59$). Nähere Angaben zur Altersverteilung innerhalb der Klassen wurden nicht publiziert. Unter diesen Voraussetzungen erscheint ein Vergleich mit den archäologischen Daten nicht sinnvoll.

Trotzdem liefert Studie 3 einen Anhaltspunkt dafür, in welchen Größenordnungen sich die Becken-TBV%-Werte osteoporosekranker Individuen bewegen, da auch eine Gruppe von 63 schwer osteoporosekranken Frauen untersucht wurde. Bei jeder dieser Frauen konnten bereits mindestens zwei Kompressionsfrakturen von Wirbelkörpern beobachtet werden. Das Alter der verstorbenen Patientinnen liegt zwischen 45 und 81 Jahren (Durchschnitt bei 67,3). Die Schnittdicke der Beckenpräparate beträgt $10\mu\text{m}$. Der mittlere TBV%-Wert der osteoporosekranken Frauen beträgt 10,5%. Tabelle 2 vergleicht ihn mit den Daten der vier archäologischen Individuen, welche auf Grund ihrer niedrigen Osteoporosestatuswerte vom Kollektiv getrennt wurden.

Grab Nr.	Geschlecht	Alter	TBV% im Beckenkamm	TBV% Vergleichswert bei Osteoporosekranken; Studie 3
Altenerding 725	männlich	68	10,2	10,5
Altenerding 1090	männlich	41	12,3	10,5
Wenigumstadt 86	weiblich	54	13,3	10,5
Wenigumstadt 131	weiblich	41	10,9	10,5

Tabelle 2. TBV%-Werte des Beckenkammes von vier Individuen der historischen Kollektive im Vergleich mit TBV%-Durchschnittswerten schwer osteoporosekranker Patientinnen aus Studie 3.

Die Werte der Individuen Altenerding Nr. 725 und Wenigumstadt Nr. 131 fallen größenordnungsmäßig genau in den Bereich der osteoporosekranken Frauen. Die anderen beiden Individuen liegen etwas über dem Mittelwert von Studie 3. Allerdings sind beim direkten Vergleich folgende Punkte zu beachten:

1. Die Altenerdinger Individuen sind männlich, so dass ihre TBV%-Werte im Vergleich mit Frauen überschätzt werden.
2. Mit Ausnahme von Individuum Altenerding Nr. 725 liegt das Sterbealter der archäologischen Skelete deutlich unter dem Altersdurchschnitt (67,3 Jahre) der osteoporosekranken Frauen aus Studie 3, so dass ihre TBV%-Werte gegenüber dem Durchschnittswert aus Studie 3 ebenfalls überschätzt werden.
3. Die TBV%-Werte aus Studie 3 beinhalten auch das Osteoidvolumen, welches bei archäologischem Material nicht mit einbezogen werden kann, so dass in diesem Punkt die archäologischen Messwerte unterschätzt werden (vgl. Abb. 21).

Ein Vergleich der TBV%-Werte dieser vier Individuen mit denen knochengesunder Erwachsener aus Studie 1 und 2 zeigt, dass bei allen eine deutliche Reduktion des trabekulären Knochenvolumens im Beckenkamm gegeben ist.

4.4. Altersabhängiger Verlauf knochenatrophischer Prozesse auf Kollektivebene

Um den Verlauf knochenatrophischer Prozesse bei den zwei Untersuchungskollektiven vergleichen zu können, wurden nach der unter 3.11. beschriebenen Methode Indexwerte gebildet. Wie der Osteoporosestatus beruhen sie jeweils auf der Kombination folgender vier Messparameter, die von unterschiedlichen Skeletelementen stammen: Porosität der Femurcompacta, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Beckenkamm, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper und Rippenmaterialerfüllungsgrad.

Im Gegensatz zu Osteoporosestatuswerten, die immer nur innerhalb eines Untersuchungskollektivs Aussagekraft besitzen, lassen sich die Trends der so berechneten Indizes kollektivweise miteinander vergleichen. Ermöglicht wird dies durch die je-

weils gemeinsame Standardisierung der einzelnen Parameterwerte geschlechtsgleicher Individuen beider Untersuchungskollektive vor der Indexbildung (vgl. 3.11.). Berücksichtigung fanden prinzipiell alle Individuen, bei denen die entsprechenden Messwerte ermittelt werden konnten. Nur das männliche Individuum Nr. 222 aus dem Wenigumstadter Kollektiv wurde auch hier wegen seiner extremen Beckenwerte (vgl. 4.2.2.) nicht an den Vergleichen beteiligt.

Beim Zustandekommen der folgenden Grafiken blieben außerdem vier weitere Individuen (Wenigumstadt Grab Nr. 86, 131; Altenerding Grab Nr. 725, 1090) unberücksichtigt, bei denen auf Grund der Osteoporosestatuswerte sowie der Röntgen- und Skelettbefunde ein begründeter Verdacht für das Vorliegen osteoporotischer Erkrankungen besteht. Inwieweit diese Maßnahme die präsentierten Ergebnisse beeinflusst, wurde durch eine alternative Berechnung unter Einschluss der fraglichen Individuen geklärt.

4.4.1. Vergleich der Indexwerte bei Wenigumstadter und Altenerdinger Frauen

Abb. 24 zeigt den atrophischen Alterstrend der Indexwerte, jeweils in Form einer Regressionsgeraden für die Frauen beider Untersuchungskollektive.

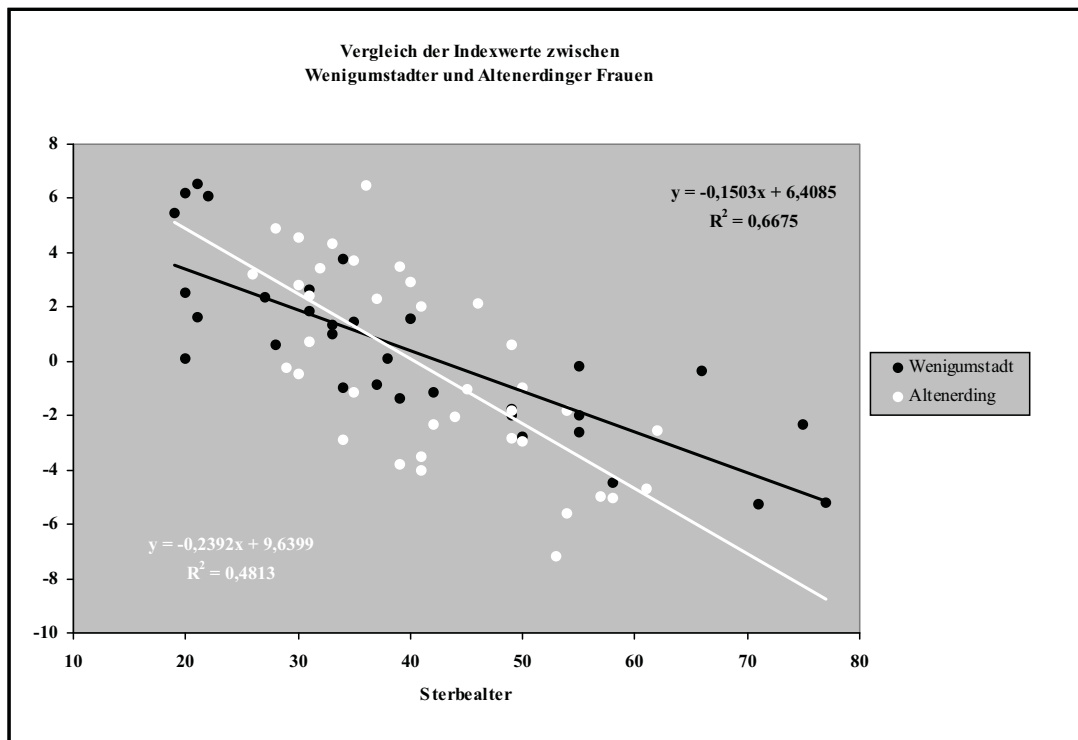


Abb. 24. Alterstrend der Indexwerte bei Wenigumstadter und Altenerdinger Frauen unter Nichtberücksichtigung der Wenigumstadter Gräber Nr. 86 und 131.

Die Verschiedenheit der zwei Regressionsgeraden kann bei der gegebenen Probandenzahl nicht auf dem 5%-Signifikanzniveau belegt werden, wobei das angewandte

Testverfahren (vgl. 3.13.) nicht berücksichtigt, dass den einzelnen Indexwerten jeweils die Informationen mehrerer Messwerte zu Grunde liegen.

Trotzdem lassen sich unterschiedliche Tendenzen erkennen: Die strukturelle Quantität und Qualität des Knochens bei Altnerdinger Frauen startet im frühen Erwachsenenalter auf einem gegenüber den Wenigumstadter Verhältnissen etwas erhöhtem Niveau. Allerdings verschlechtert sie sich im Laufe des Lebens so rapide, dass die Indexwerte der Altnerdinger Frauen im fortgeschrittenen Alter deutlich unter die der vergleichbaren Wenigumstadter Individuen fallen, bei welchen der atrophische Trend schwächer ausgebildet ist. Diese Tendenzen bleiben in geringfügig abgeschwächter Form auch erhalten, wenn man die osteoporoseverdächtigen Frauen (Wenigumstadt Grab Nr. 86, 131) in die Berechnungen miteinschließt.

4.4.2. Vergleich der Indexwerte bei Wenigumstadter und Altnerdinger Männern

Abb. 25 illustriert die Trends der Indexwerte für die männlichen Individuen der beiden Untersuchungskollektive.

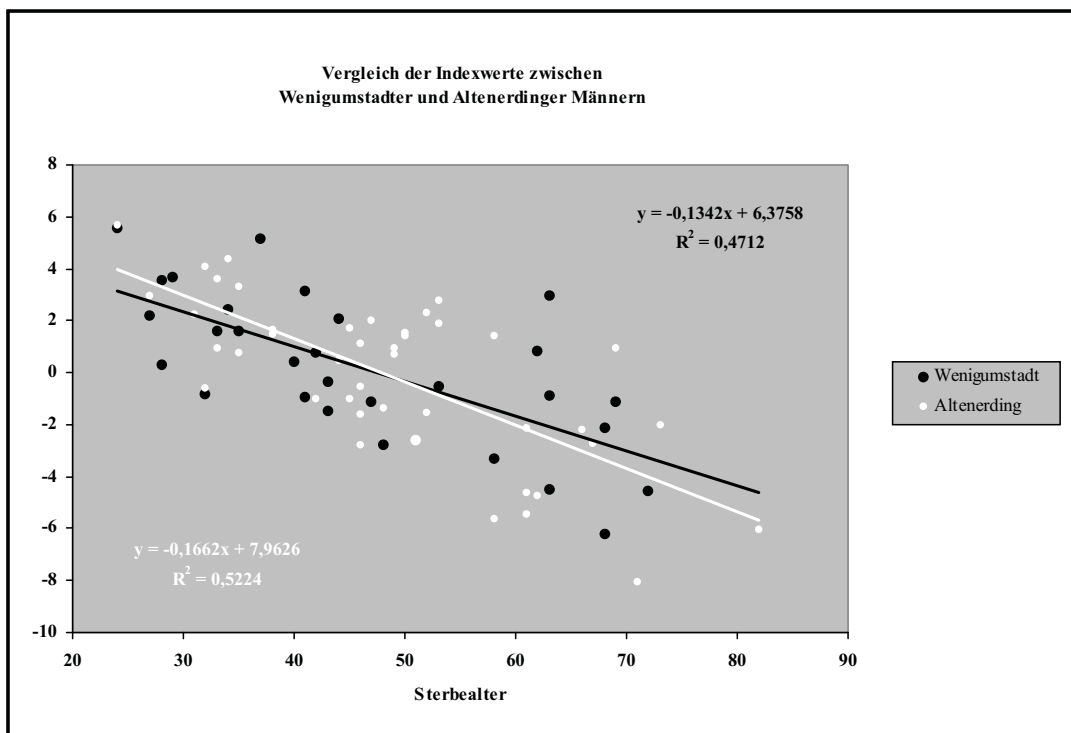


Abb. 25. Alterstrend der Indexwerte bei Wenigumstadter und Altnerdinger Männern unter Nichtberücksichtigung der Altnerdinger Gräber Nr. 725 und 1090.

Auch hier ist eine statistische Absicherung für die Verschiedenheit der beiden Regressionen auf dem 5%-Signifikanzniveau nicht möglich. Dennoch bestätigen sich beim Vergleich der männlichen Indexwerte genau die Tendenzen, die bereits bei den Frauen beobachtet werden konnten: Die Werte des Altnerdinger Kollektivs liegen im frühen Erwachsenenalter etwas über denen der Wenigumstadter Individuen, fallen

aber etwas stärker, so dass sich die Verhältnisse im fortgeschrittenen Alter völlig umkehren. Eine Mitberücksichtigung der osteoporoseverdächtigen Männer (Altenerding Grab Nr. 725, 1090) würde den stärkeren atrophischen Trend bei den Altenerdinger Männern noch deutlicher hervorkehren. Trotzdem sind die Unterschiede des atrophischen Verhaltens insgesamt bei den Männern schwächer ausgeprägt als bei den Frauen.

5. Methodische Diskussion

Durchführung und Auswertung vergleichbarer histomorphometrischer Untersuchungen vierer Skeletelemente an zwei verschiedenen Untersuchungskollektiven verlangen eine einheitliche Vorgehensweise. Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit musste sie in zahlreichen Vorversuchen durch die Auswertung gesammelter Erfahrungen, die Wahl bzw. Entwicklung geeigneter Messparameter und das Erdenken informationsschaffender Auswertungsverfahren erst erarbeitet werden. Der Methodenteil dieser Arbeit (Kap. 3.) beschreibt gewissermaßen die standardisierte Endform der Verfahrensweise, welche schließlich auf beide Untersuchungskollektive angewandt wurde.

Im folgenden Kapitel werden nun Detailspekte der methodischen Vorgehensweise näher erklärt und begründet. Die Offenlegung methodischer Schwierigkeiten ermöglicht die kritische Auseinandersetzung mit angewandten Lösungsstrategien. Mögliche Fehlerquellen, Vor- und Nachteile der Methodik werden diskutiert.

5.1. Sterbealtersbestimmung nach der Zahnwurzelzementmethode

5.1.1. Die Zahnwurzelzementmethode als Verfahren der Wahl

Allen Studien, die sich bisher mit der Untersuchung altersatrophischer Prozesse an archäologischem Skeletmaterial beschäftigt haben, ist eine gewisse methodische Schwäche bezüglich der Altersbestimmung der Individuen gemeinsam (vgl. 1.2.). Es wird fast ausschließlich auf makromorphologische Techniken zur Sterbealtersbestimmung zurückgegriffen, an deren Zuverlässigkeit in den letzten Jahren vermehrt Zweifel angemeldet wurden (z.B. Cipriano-Bechtle 1994, Cipriano-Bechtle et al. 1996, Kemkes-Grottenthaler 1996):

Makromorphologische Methoden können unbestreitbar zuverlässige Ergebnisse liefern, solange deutliche makromorphologische Veränderungen am Skelet mit dem Lebensalter auftreten. Dies ist besonders in den Wachstums- und Entwicklungsphasen der Kindheit, der Jugend und des frühen Erwachsenenalters der Fall. Nach Abschluss der Gebissentwicklung und des Skeletwachstums verlieren altersabhängige Veränderungen stark an Ausprägung. Folge ist, dass die Genauigkeit der Sterbealtersbestimmung in den für Osteoporoseuntersuchungen relevanten höheren Altersklassen sehr stark zurückgeht. Darüber hinaus konnten neuere Methodenvergleiche zeigen, wie stark die Zusammensetzung der Referenzserien makromorphologischer Altersbestimmungsmethoden Einfluss auf Anwendungsergebnisse nimmt, und dass geschlechtsspezifische Unterschiede bei der Merkmalsveränderung mit dem Alter bestehen (Kemkes-Grottenthaler 1996).

Als Folge dieser Bestimmungsunsicherheit wurden die Individuen bisheriger Untersuchungen in der Regel Altersklassen zugeordnete, die eine oder mehrere Dekaden umfassen (z.B. Carlson et al. 1976, Martin und Armelagos 1979, Kneissel et al. 1994), was unter den gegebenen Umständen und angesichts der oft geringen Kollektivgrößen durchaus sinnvoll erscheint.

Würde man allerdings das Osteoporosestatuskonzept oder den Indexrendvergleich auf Untersuchungskollektive mit einer solch groben Altersklasseneinteilung anwenden, so müsste man empfindliche Informationseinbußen hinnehmen. Angesichts der großen Schwierigkeiten, pathologische osteoporotische Geschehnisse gegen die sie permanent überlagernden physiologischen Atrophieprozesse abzugrenzen, scheint dies kaum akzeptabel. Die Einberechnung der genauen individuellen Sterbealtersdaten ist andererseits nur sinnvoll, wenn für alle fraglichen Altersstufen eine kontinuierlich hohe Zuverlässigkeit der Bestimmungsergebnisse gewährleistet werden kann.

Entsprechend dieser Forderung erweist sich die Altersbestimmungsmethode nach der Zahnwurzelzementmethode als das Verfahren der Wahl. In den osteoporoserelevanten Altersbereichen ist sie allen anderen Techniken überlegen. Untersuchungen an altersbekanntem Material erreichten eine durchschnittliche Bestimmungssicherheit von ca. 2-3 Jahren (Grosskopf 1990). Selbst alternative histomorphometrischen Methoden zur Altersbestimmung an Knochencompacta (z.B. Kerley 1965, Alquist und Damsten 1969, Ericksen 1991) erfordern einen für bodengelagertes Material unrealistisch guten Erhaltungszustand, sind noch arbeitsaufwendiger und erreichen diese Genauigkeit nicht (Uytterschaut 1985, 1993, Turban-Just 1993). Eine Abhängigkeit vom Referenzkollektiv besteht für die Zahnwurzelzementmethode nur hinsichtlich der Durchbruchstermine der verwendeten Zähne. Bezüglich des jährlichen Ringbildungsverhaltens sind kollektivspezifische Abweichungen weder bekannt, noch gibt es Gründe, sie zu erwarten.

So ist die Altersbestimmungsmethode mittels der Zuwachsringe im Zahnwurzelzement die zur Zeit beste Technik, um die bei der Analyse altersatrophischer Prozesse an bodengelagertem archäologischem Skeletmaterial erforderliche Genauigkeit für die Sterbealtersschätzung zu realisieren.

5.1.2. Umstellung der Zahnwurzelzementmethode auf Digitaltechnik

Wie bereits erwähnt, wurde die Zahnwurzelzementmethode im Rahmen dieser Arbeit von konventioneller Mikrofotografie auf Digitaltechnik umgestellt. Dadurch konnte auf personal- und kostenintensive Fotoarbeiten in der Dunkelkammer verzichtet werden. Die Umstellung brachte erhebliche Erleichterungen und erhöhte Flexibilität für die Auswertung der histologischen Bilder. Mittels des Gradationskurvenmenüs von Adobe POTOSHOP können bei der Bildbearbeitung die Jahresringe durch selektive Kontrastverstärkung deutlich hervorgehoben werden. Es ist möglich, gleichzeitig die dunklen und hellen Ringbanden zu betonen, ohne den umgebenden Hintergrund zu beeinflussen.

Liegt eine gespeicherte Kopie des unbearbeiteten Rohbildes vor, so kann die Kontrastanpassung immer wieder neu vorgenommen bzw. verändert werden, je nach den lokal variierenden Erfordernissen von Bildabschnitten, die zur Ringzählung herangezogen werden sollen. Vergrößerungen kritischer Areale lassen sich reversibel per Tatstdruck realisieren.

Gegenüber den unveränderlichen Verhältnissen auf konventionellen Fotoabzügen, tragen diese Maßnahmen dazu bei, die Abgrenzbarkeit der einzelnen Ringe zu verbessern. Gleichzeitig werden die Augen des Betrachters durch geeignete Bildanpassung geschont und ein weitgehend ermüdungsarmes Arbeiten ermöglicht.

Entsprechende Erfahrungen resultieren aus der vorliegenden Untersuchung und weiteren Arbeiten anderer Autoren, die in jüngster Zeit auf diese Technik zurückgegriffen haben (z.B. Kagerer in Vorbereitung).

Einziger, offensichtlicher Nachteil der digitalen Technik ist der relativ hohe Preis der Gerätschaften, wenn sie eigens angeschafft werden müssen.

5.1.3. Methodische Kontinuität

Die Sterbealtersermittlung nach der Zahnwurzelzementmethode mit digitaler Technik wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur an den Individuen des Altenerdinger Kollektivs durchgeführt. Für die Wenigumstadter Skeletserie lag bereits eine entsprechende Bestimmung mittels konventioneller Mikrofotografie vor (Cipriano-Bechtle 1994, Cipriano-Bechtle et al. 1996), auf die zurückgegriffen werden konnte. Auf eine Nachbestimmung der Wenigumstadter Individuen analog dem Altenerdinger Kollektiv wurde verzichtet. Grund war einerseits der damit verbundene, sehr erhebliche Zeitaufwand, andererseits die zu erwartenden Probleme durch Präparatalterung der Wenigumstadter Zahnschnitte, welche nur durch erneute Zahnentnahme zu lösen gewesen wären.

Unbestreitbar resultiert daraus eine gewisse methodische Divergenz, die im Idealfall zu vermeiden wäre. Zum einen muss von einer Interobserver-Variabilität ausgegangen werden, zum anderen könnte der Einsatz unterschiedlicher Techniken theoretisch zu Abweichungen bei den Ergebnissen führen.

Allerdings sollte, trotz aller Vorsicht, der praktische Einfluss dieser methodischen Divergenzen auf die erzielten Ergebnisse nicht überbewertet werden.

Besonders die Unterschiede in der Bildtechnik spielen nur eine untergeordnete Rolle. Im Falle optimaler Präparate kann auch die digitale Bildbearbeitung lediglich den Komfort steigern, das Zählergebnis beeinflusst sie nicht.

Bei suboptimalen Präparaten bedeutet die Umstellung auf digitale Technik nicht, dass man mehr Zementringe erkennen kann, sondern, dass sich Ring-Ring-Grenzen besser differenzieren lassen. Die Entscheidung, ob sich hinter diffusen Ringbildungsbereichen eine oder mehrere Ringzonen verbergen, wird erleichtert, ist aber nach beiden Seiten offen. Die Zählgenauigkeit lässt sich dadurch möglicherweise etwas steigern, ein einseitiger, systematischer Einfluss auf das Ergebnis ist nicht zu erwarten.

Bei anderen methodischen Details blieb die Kontinuität streng gewahrt: Für beide Kollektive wurden die Zählungen an Prämolaren ausgeführt und zur Altersberechnung dieselben Zahndurchbruchzeiten verwendet.

Das Problem der Interobserver-Variabilität konnte durch intensive und direkte Abstimmung der genauen Vorgehensweise bei den Zählungen mit Frau Cipriano (Cipriano, persönliche Mitteilungen und Demonstrationen) reduziert werden.

Diese Maßnahmen ermöglichten die Wahrung methodischer Kontinuität bei der Sterbealtersbestimmung beider Untersuchungskollektive in einer, auch für Osteoporoseuntersuchungen ausreichenden, Form.

5.2. Möglichkeiten und Grenzen der Lagekonstanz bei Probenentnahme und Präparateherstellung

Ergebnisse medizinischer Histomorphometriestudien zeigen, dass der lokalen Konstanz der Probenentnahmestellen eine große Bedeutung zukommt (z.B. Pesch et al. 1980, Podenphant und Engel 1987). Erklärbar ist dies durch das Auftreten von Zug- und Druckkräften, die an verschiedenen Stellen eines Skeletelements mit unterschiedlicher Ausrichtung und Stärke ansetzen. Das Knochengewebe passt sich den Belastungsmustern durch lokale Variabilität seiner strukturellen Quantität und Qualität an.

Für histomorphometrische Untersuchungen bedeutet dies, dass man streng genommen nur Messwerte von Knochenproben vergleichen kann, die an exakt korrespondierenden Stellen entnommen wurden. Diese methodische Maximalforderung stellt den Idealfall dar. In der Praxis muss, vor allem bei der Arbeit mit bodengelagertem archäologischem Skeletmaterial, ein akzeptabler, begründbarer Kompromiss gefunden werden, der sich auch am realistischen Erhaltungszustand des Untersuchungsmaterials orientiert.

Eine Technik, die nur bei vollständigem und idealem Erhaltungszustand des Skeletmaterials angewandt werden kann, scheint praxisfern und ist für vergleichende Untersuchungen historischer Friedhofskollektive ungeeignet. So wirkt sich bereits bei der Methodik dieser Arbeit problematisch aus, dass bei jedem Individuum gleichzeitig die Beprobung definierter Stellen an vier Skeletelementen möglich sein muss. Je mehr man solche Forderungen präzisiert oder ihre Anzahl steigert, desto stärker reduziert sich die Größe potenzieller Untersuchungskollektive. Sobald eine der festgelegten Voraussetzungen, durch lokale Beschädigung oder durch Verlust eines bestimmten Skeletelementes, nicht erfüllt werden kann, muss das entsprechende Individuum ausgeschlossen werden. Umgekehrt kann durch Vereinfachung der Anforderungen mehr Material miteinbezogen werden, was quantitative Untersuchungen auf Bevölkerungsebene erleichtert.

Die Ergebnisse verschiedener histomorphometrischer Studien geben Hilfestellung bei der Entscheidung, wo lokale Konstanz histomorphometrischer Proben unbedingt erforderlich ist und wann gewisse Abweichungen keinen gravierenden Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nehmen.

Im Folgenden wird beschrieben und begründet, welche Vereinfachungen im Rahmen dieser Arbeit zugelassen wurden.

5.2.1. Seiteneffekte

Darunter wird der potenzielle Einfluss der Körperseite auf histomorphometrische Messwerte paariger Skeletelemente verstanden.

Ursächlich können Seiteneffekte vor allem aus ungleicher Belastung resultieren. Bei "normaler" Lebensweise, abgesehen von Verletzungsfolgen oder sehr speziellen Tätigkeiten, kann eine ausgeprägte Seitigkeit nur für das obere Extremitätenskelet angenommen werden, da vor allem hier manipulatorische Tätigkeiten eine einseitige Beanspruchung bei gleichzeitiger Funktionserfüllung zulassen. Für Rippen, Becken und Oberschenkel bedingt ein funktioneller Einsatz in aller Regel eine gleichmäßige-

re Belastung. Geeignete Studien, die Seiteneffekte bei diesen Skeletelementen untersuchen, existieren nur für den Beckenkamm. Sie können belegen, dass TBV%-Werte der Beckenkammpongiosa praktisch keinen Seiteneffekten unterliegen (de Vernejoul et al. 1981, Malluche et al. 1982).

Um möglichst sicher zu gehen, wurde in der vorliegenden Arbeit Proben der rechten Körperseite Priorität eingeräumt. War dort dekompositionsbedingt eine Entnahme nicht möglich, so wurde auf die korrespondierende Position der linken Körperhälfte zurückgegriffen. Dadurch konnte in wenigen Fällen die Aufnahme zusätzlicher Individuen in das Untersuchungskollektiv gesichert werden. Angesichts der aufgestellten Überlegungen scheinen diese Abweichung von der Entnahmevorschrift akzeptabel.

5.2.2. Segmenteffekte

Darunter wird die potenzielle Beeinflussung histomorphometrischer Messwerte durch die Auswahl der Untersuchungsposition bei segmental angeordneten Skeletelementen, wie Rippen und Wirbelkörpern, verstanden.

Rippenfragmente sind bei den allermeisten Skelettfunden gut bis mäßig erhalten. Komplette Rippensätze liegen hingegen äußerst selten vor. Die absolute Fixierung der Probenentnahme auf eine genau definierte Rippe ist sehr problematisch. Zusätzlich zur Schwierigkeit der Bestimmungsunsicherheit, besonders bei Fragmenten, würde das zufällige Fehlen oder ein hoher Fragmentierungsgrad der entsprechenden Rippe zum Ausschluss des Individuums aus dem Untersuchungskollektiv führen.

Für segmental organisierte Skeletelemente dürfen zumindest abschnittsweise (z.B. Lendenwirbelsäulenbereich) ähnliche Belastungsmuster angenommen werden, die wiederum eine Kompensation durch vergleichbare strukturelle Quantität und Qualität erfahren. Eine histomorphometrische Studie an Sektionsmaterial von 240 Verstorbenen unterstützt diese Annahme, weil sie an äquivalenten Positionen im 3. bzw. 5. Lendenwirbelkörper der untersuchten Individuen jeweils annähernd gleiche TBV%-Werte ermitteln konnte (Pesch et al. 1980). Auch Untersuchungen von Delling et al. (1989) belegen sehr ähnliche Knochenvolumina für alle Brust- und Lendenwirbel.

Als Kompromiss zwischen Praktikabilität und Genauigkeit wurde in der vorliegenden Arbeit die Probenentnahme im Bereich der 6. bis 11. Rippe zugelassen, dem 4. Lendenwirbelkörper Priorität eingeräumt, in wenigen Fällen aber auch eine Entnahme aus anderen Lendenwirbelkörpern zugelassen.

5.2.3. Positionseffekte

Darunter wird der potenzielle Einfluss der genauen Position der Probenentnahme an einem bestimmten Skeletelement bzw. der Schnittführung bei der Präparateherstellung auf histomorphometrische Messwerte verstanden.

Ursächlich für Positionseffekte sind lokale Unterschiede der Belastungsmuster, die auf ein Skeletelement einwirken. Das Knochengewebe reagiert darauf mit Strukturverdichtung bzw. -reduktion in entsprechenden Bezirken. Vor allem bei großen Skeletelementen, wie Becken und Oberschenkelknochen, sind von Region zu Region erhebliche Belastungsunterschiede zu erwarten. Besonders im Bereich starker Muskelansatzstellen ist der histologische Feinbau des Knochens verändert. Daher wurden entsprechende Areale bei der Präparateherstellung nicht berücksichtigt.

Eine morphometrische Studie an archäologischem Material zeigt, dass altersatrophischer Knochenverlust im Bereich der Femurdiaphyse unterschiedlich stark auftritt (Carlson et al. 1976). Dieser Befund legt nahe, dass die Probenentnahmestelle möglichst konstant bleiben muss. In der vorliegenden Arbeit wurden Femurcompactapuben daher immer aus der ventralen Diaphysenmitte entnommen.

Im Vorfeld dieser Arbeit erfolgten zahlreiche Experimente an barockzeitlichen Streufunden einer Gruftbestattung aus einer Kirche in Helmstedt. Dabei wurden auch Serienschnitte aus dem lateralen Bereich eines Rippenfragmentes auf einer Strecke von ca. 18 mm untersucht, wobei ein nahezu konstanter Materialerfüllungsgrad gemessen wurde. Gestützt auf diesen Einzelbefund und angesichts der geforderten Praktikabilität des Untersuchungsverfahrens wurde auf eine genauere Positionsbestimmung für die Entnahme von Rippenproben verzichtet.

An Lendenwirbelkörpern lässt sich bereits im Röntgenbild oder makroskopisch an geeigneten Querschnitten ein vertikaler Positionseffekt erkennen (Abb. 26).

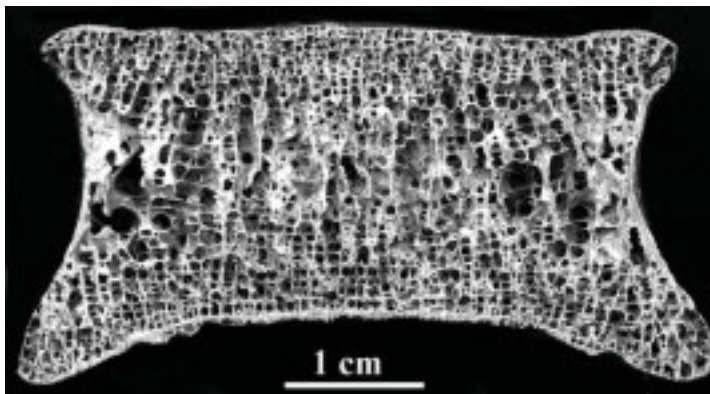


Abb. 26. In der Frontalebene halbierter Lendenwirbelkörper. Barockzeitliche Gruftbestattung. Erkennbar ist eine jeweils höhere Trabekeldichte in der Nähe der cranialen und caudalen Deckplatten gegenüber den zentralen Bereichen. Die größeren lateralen Lücken in der Spongiosa der Zentralschicht sind hingegen Präparationsartefakte.

Eine Studie an Sektionsmaterial (Pesch et al. 1980) unterteilt vertikale Querschnittspräparate von Lendenwirbelkörpern in 5 horizontale Schichten und zeigt, dass entsprechende TBV%-Werte schichtenspezifisch variieren, wobei die Werte von der mittleren Schicht nach außen hin ansteigen. Ein horizontaler Positionseffekt ist im Bereich der Spongiosa nicht zu erkennen.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Probenzylinder nach Möglichkeit zentral, bei dekompositionsbedingten Problemen auch etwas lateral, aus dem Wirbelkörper entnommen (vgl. 3.2.). Keine Kompromisse konnten auf Grund der erwähnten Befunde

bezüglich der vertikalen Lage der Schnittebene gemacht werden. Der Anschnitt des Probenzylinders erfolgte genau mittig, die jeweils zwei untersuchten Schnitte stammen aus der 1. bzw. 2. Schnittebene darunter (vgl. 3.4.). Beide Ebenen folgen technisch durch die Dicke des Sägeblattes bedingt in einem Abstand von 300 μm aufeinander. Wie Analysen des Datenmaterials Altenerdinger Frauen zeigen konnten, resultiert daraus noch kein erkennbarer Fehler. Ermittelt man die Messdaten für jede Schnittebene getrennt, so zeigen sich erwartungsgemäß gewisse Variabilitäten, aber kein systematischer Trend, wie er bei generellen Strukturunterschieden in beiden Schichten zu erwarten wäre.

Die Spongiosa der Probenzylinder aus dem Beckenkamm erscheint makroskopisch völlig homogen. Um absolut sicher zu gehen, wurde aber auch hier auf eine konstante, mittige Lage der Schnittebenen geachtet. Der Probenzylinder wurde, schon wegen geplanter Vergleiche mit medizinischen Referenzdaten, immer in der Standardbiopsieposition (vgl. 3.2.) entnommen. Ein Abweichen von dieser festen Position scheint nicht akzeptabel, da Positionseffekte im Bereich der Darmbeinschaukel nachgewiesen sind (de Vernejoul et al. 1981, Malluche et al. 1982).

5.3. Einfluss der Schnittdicke auf die messbare Trabekelfläche spongiöser Präparate

Bei der histomorphometrischen Analyse histologischer Präparate der Knochenspongiosa übt die Schnittdicke einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Ergebnisse vieler Messparameter aus. Ursächlich für dieses Phänomen ist der sog. Holmes-Projektionseffekt (Elias et al. 1971, Parfitt 1983), welcher die Querschnittsdimensionen von schrägstehenden lichtundurchlässigen Trabekelplatten in nicht-infinitesimal dünnen histologischen Präparaten bei Betrachtung im Durchlicht größer erscheinen lässt, als es der Realität entspricht. Abb. 27 illustriert diesen Effekt schematisch:

Eine silbergefärbte, undurchsichtige Trabekelplatte ist schräg zur Schnittebene orientiert. Bei der hypothetischen Herstellung eines Präparates mit infinitesimaler Schnittdicke in der Schnittebene A ließe sich im Durchlicht eine Trabekelbreite a beobachten.

Muss aus technischen Gründen die Dicke der Schnitte um d erhöht werden, so verdeckt die lichtundurchlässige Trabekelplatte das Durchlicht auf einer Breite von b . Für die Differenz zwischen a und b ist bei gegebener Trabekelkonstellation die Schnittdicke verantwortlich. Im Falle einer histomorphometrischen Analyse der Präparate sind die Parameter Trabekelfläche und Trabekelumfang sowie alle daraus

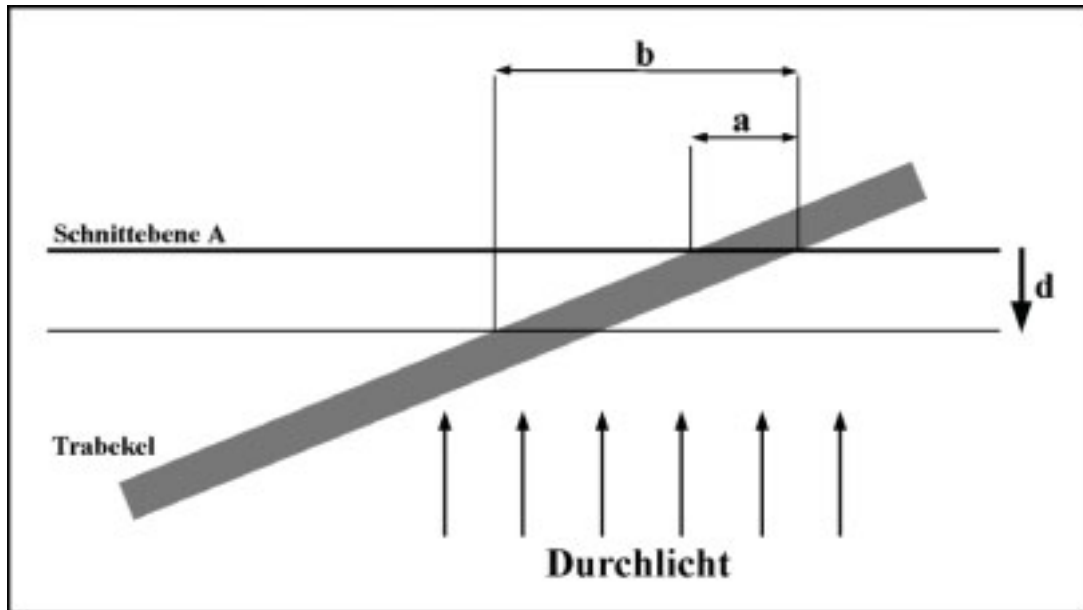


Abb. 27. Holmes-Projektionseffekt: Wegen seiner Lichtundurchlässigkeit erscheint die Anschnittbreite eines Knochentrabekels bei einer Präparatdicke von d im durchlichtmikroskopischen Bild als b . Der Realität entspricht aber eine geringere Breite a , die nur im Falle der hypothetischen Verwendung infinitesimal dünner Präparate messbar wäre.

rechnerisch abgeleiteten Größen betroffen. Der Effekt einer gegenseitigen Verdeckung von dicht übereinander liegenden Strukturen ist auf Grund der strukturellen Natur der Spongiosa kaum existent und daher zu vernachlässigen.

Compactaquerschnitte sind von den beschriebenen Phänomenen praktisch nicht betroffen, da sich die erhobenen histomorphometrischen Parameter fast ausschließlich auf Strukturen beziehen, die senkrecht zur Schnittebene der Präparate orientiert sind.

Wie bereits unter 3.10. beschrieben, läßt sich der durch die Schnittdicke bedingte Parameterfehler rechnerisch abschätzen. Voraussetzung dafür ist die Annahme einer vollständigen Isotropie der Knochenbälkchen, die in der Realität für spongiöses Knochenmaterial nur als näherungsweise erfüllt gilt (Whitehouse 1974, Schwarz und Recker 1981). Nimmt man eine Schnittdicke von $100\text{ }\mu\text{m}$ an, so liegt der geschätzte Parameterfehler größenordnungsmäßig bei etwa 60%. Trotz der beachtlichen Größe dieses Wertes ist seine tatsächliche Relevanz für die Ergebnisse histomorphometrischen Untersuchungen relativ gering. Bei konstanten Versuchsbedingungen ist der Fehler systematisch, d.h. alle Messwerte sind gleichermaßen betroffen und lassen sich gut miteinander vergleichen.

Aus der Existenz des Holmes-Effektes wurden folgende Konsequenzen für die Durchführung der histomorphometrischen Untersuchungen gezogen:

1. Alle histologischen Präparate der Beckenkamm- bzw. Lendenwirbelkörper-spongiosa wurden mit einer konstanten Schnittdicke von $100\text{ }\mu\text{m}$ hergestellt. Da-

durch bleibt der Fehler systematisch, und die individuellen Parameterwerte können verglichen werden.

Im Vorfeld dieser Arbeit wurde an unterschiedlich gut erhaltenem Skeletmaterial aus Streufunden mit verschiedenen Schnittdicken experimentiert. In vielen Fällen waren bei Spongiosapräparaten auch Schnittdicken von 70-80 μm möglich. Größenordnungen wie in Studien an medizinischem Material ließen sich durch dekompositionsbedingten Elastizitätsverlust allerdings nie erreichen. Um eine zuverlässige Präparateherstellung, auch bei weniger gut erhaltenem Material, gewährleisten zu können, musste die Schnittdicke der Spongiosapräparate allerdings im Bereich von 100 μm liegen. Wählt man eine geringere Schnittdicke, so läuft man Gefahr, bei schlechtem Erhaltungszustand Präparate zu verlieren, d.h. entsprechende Individuen können nicht mehr berücksichtigt werden, das Untersuchungskollektiv verkleinert sich.

2. Vor einem Vergleich der an archäologischem Material gewonnenen Messwerte mit medizinischen Referenzdaten wurden erstere mittels eines Umrechnungsfaktors an die in medizinischen Studien gebräuchlichen Schnittdicken angepasst. Diese schwanken je nach Studie zwischen 4 μm und 10 μm und bedingen selbst Parameterfehler im Bereich von 2,5% bis 6,5% (vgl. 3.10. und 4.3.2.).

3. Auf eine Konvertierung der im Zweidimensionalen erhobenen Flächenparametern zu dreidimensionalen TBV%- bzw. BV/TV%-Werten nach dem Delesse-Prinzip (vgl. 3.10.) wurde verzichtet.

Da spongiöser Knochen in der Realität keine zweidimensionale, sondern eine dreidimensionale Struktur besitzt, ist die Angabe von TBV% in der histomorphometrischen Praxis akzeptierter Standard. Angesichts der im Vergleich zu archäologischem Material geringen Fehler, mit denen Flächenparameter medizinischer Studien belastet sind, scheint dies durchaus sinnvoll. Eine 3D-Konvertierung der archäologischen Flächenparameter, ohne Korrektur der durch Holmes-Effekte verursachten Fehler, würde hingegen TBV%-Werte ergeben, die massiv von den realen Verhältnissen abweichen. Durch eine entsprechende Umrechnung ließe sich also weder die Anschaulichkeit noch die Qualität der Ergebnisse verbessern.

Angesichts dieser Tatsachen wurde entschieden, im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit den tatsächlich gemessenen Flächenwerten pro Standarduntersuchungseinheit zu arbeiten.

5.4. Methodische Konsequenzen häufiger Dekompositionsphänomene

Während der Liegezeit im Boden sind Skelete physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen ausgesetzt (z.B. Piepenbrink 1986, Bell 1990, Turban-Just 1997). Diese können neben Veränderungen auf der molekularen Ebene auch vielfältige Auswirkungen im histologischen bzw. makroskopischen Bereich am Skeletelement verursachen. Die Konsequenzen reichen vom Totalverlust eines Skeletelementes über Strukturauslöschungen im histologischen Bild bis hin zu Um- und Abbauprozessen im molekularen Bereich. Mit einer Beeinträchtigung histomorphometrischer Analysen durch die Folgen von Bodenlagerung und Dekomposition muss bei allen Friedhofskollektiven gerechnet werden. Soll eine Methodik möglichst universell einsetzbar sein, so ist dieser Realität Rechnung zu tragen, indem man zu erwartende Störungen einkalkuliert und Lösungsstrategien bereithält.

Im Folgenden wird beschrieben, welche dekompositionsbedingten Störungen nach den Erfahrungen der vorliegenden Arbeit vor allem zu erwarten sind und welche methodischen Konsequenzen draus gezogen wurden.

5.4.1. Sedimenteinspülungen und Versinterungen

Bei der Beprobung beider Untersuchungskollektive fand man besonders in den Markräumen spongiöser Skeletelemente starke Einspülungen von Bodensedimenten. Sie resultieren als Folge der Bodenlagerung aus dem Abfluss von Oberflächenwasser und der zeitweiligen Überflutung der Grabgrube durch einen steigenden Grundwasserhorizont. Entsprechende Prozesse können spätestens 10-15 Jahre nach dem Bestattungszeitpunkt einsetzen, sobald die Leiche skelettiert ist (Neugebauer 1991). Die Sedimenteinspülung kann durch Foramina nutricia, vor allem aber durch liegezeitlich bedingte Frakturen der Skeletelemente erfolgen.

Die Beschaffenheit des Bodens spielt dabei offenbar eine wesentliche Rolle. So war das Wenigumstadter Kollektiv viel stärker (ca. 70% der Individuen) betroffen als das Altenerdiger Untersuchungsmaterial (ca. 50%).

Auf die histomorphometrische Analyse ungefärbter Femurcompacta haben die Sedimentablagerungen praktisch keine Auswirkungen. Im Bereich des Markraumes beeinflussen sie den Untersuchungsbereich nicht. Sedimentreste in Haversschen Kanälen oder Resorptionshöhlen heben sich so deutlich vom Knochengewebe ab, dass sie bei der Bildbearbeitung nicht fehlinterpretiert werden können.

Problematischer sind Sedimentablagerungen allerdings für die silbergefärbten Präparate der Beckenkamm- und Lendenwirbelkörperspongiosa und der Rippen. Analog zu mineralisiertem Knochengewebe erscheinen auch sie durch die Silberfärbung schwarz (vgl. 3.4.). Großflächig ausgedehnte Sedimentauflagerungen überdecken Trabekelstrukturen so stark, dass eine histomorphometrische Auswertung nicht mehr möglich ist.

Eine weitgehende Lösung dieses Problems konnte durch das in Kapitel 3.3. beschriebene Reinigungsverfahren erzielt werden. Kleinere Sedimentreste, die sich auf diese Weise nicht entfernen ließen, waren von Trabekelstrukturen durch ihre körnige

Struktur deutlich unterscheidbar und wurden bei der digitalen Bildbearbeitung entfernt.

Die mechanische Reinigungsprozedur versagte nur bei Sedimentauflagerungen, die an Trabekelstrukturen festgesintert waren (Abb. 28).

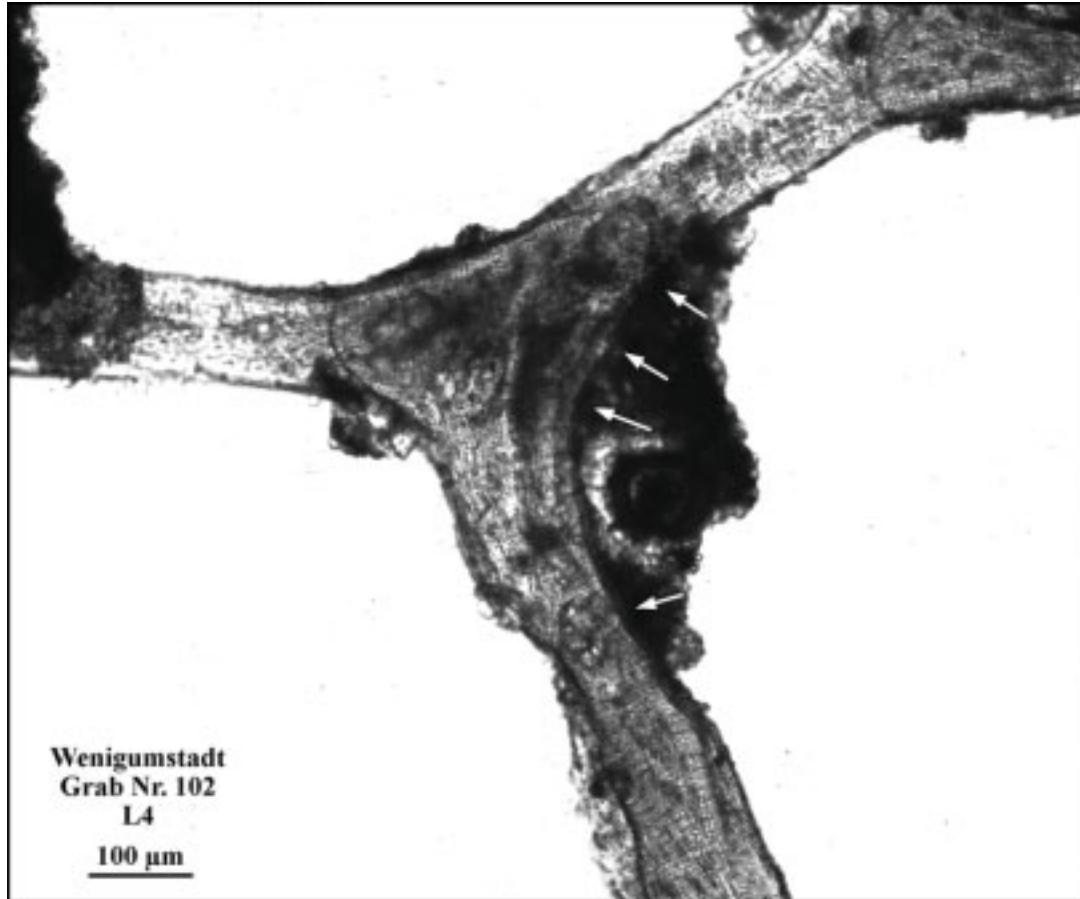


Abb. 28. Gräberfeld Wenigumstadt: Z.T. versinterte Sedimentablagerungen an der Lendenwirbelkörperspongiosa eines 21jährigen Mannes. Der ursprüngliche Verlauf der Knochentrabekel (Pfeile) ist allerdings weiterhin erkennbar, so dass die Sedimentauflagerungen während der Bildbearbeitung entfernt werden können.

Derartige Phänomene traten in einigen Fällen, ausschließlich beim Wenigumstadter Kollektiv, auf. Bei den Altenerdinger Skeleten fehlen sie. Als ursächlich darf wohl das Liegemilieu angesehen werden. Ähnliche Versinterungen konnten beim Wenigumstadter Skeletmaterial bereits makroskopisch in postmortalen Verletzungsspuren der Knochenoberfläche, die im Zusammenhang mit Grabraub zu sehen sind, festgestellt werden (Beilner 1994, Beilner und Grupe 1996).

Solange die versinterten Sedimentreste in den Markräumen der Spongiosa lokal begrenzt oder relativ klein sind, lassen auch sie sich während der digitalen Bildbearbeitung zuverlässig erkennen und manuell entfernen. Sind größere Areale betroffen, ist eine histomorphometrische Analyse nicht mehr möglich. Von einer solchen Situation waren beim Wenigumstadter Untersuchungskollektiv drei Individuen betroffen (Grab Nr. 3, 212, 231).

5.4.2. Dekompositionsbedingte Auslöschung der osteonalen Compactastruktur

Eine große Anzahl histologischer Präparate der Rippen und Oberschenkelcompacta beider Untersuchungskollektive war stark durch Dekompositionsprozesse beeinträchtigt. Auf vielen Schnittpräparaten traten, lokal begrenzt oder flächendeckend, sog. Bohrkanäle auf. Sie entstehen durch die Tätigkeit von Mikroorganismen (Bakterien oder Pilze), die mittels saurer und enzymatischer Metabolite in den Knochen vordringen (z.B. Pipenbrink 1986, Bell 1990). Die quergeschnittenen, runden Bohrkanäle überziehen dann als dunkelgefärbte, granuläre Strukturen das histologische Bild. Oft erfolgt dabei die vollständige Auslöschung sämtlicher osteonaler Strukturen. D.h. Haverssche Lamellen und Kittlinien sind nicht mehr zu erkennen. Lediglich Kanalstrukturen bleiben weiterhin sichtbar (Abb. 29). Ähnliche Beobachtungen wurden bereits im Rahmen einer histomorphometrischen Studie an einer ausgewählten Gruppe Altenerdiger Männer gemacht (Turban-Just 1993).

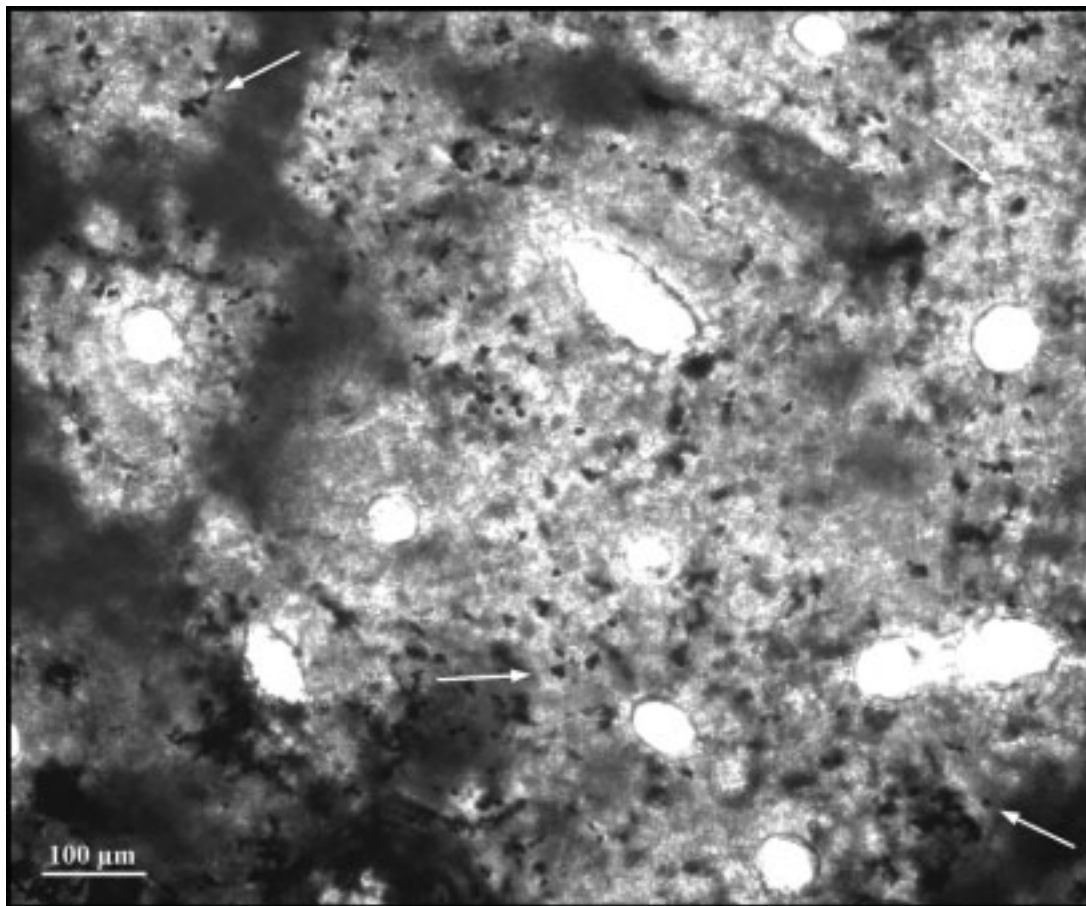


Abb. 29. Gräberfeld Altenerding, Grab Nr. 1179. Mikroskopischer Querschnitt der Femurcompacta eines 31jährigen Mannes. Die osteonale Struktur ist durch Dekompositionseffekte stark beeinträchtigt. Kittlinien und Haverssche Lamellen sind völlig ausgelöscht. Das ganze Präparat ist übersät von quergeschnittenen mit dunklem Material erfüllten Bohrkanälen (Pfeile). Lediglich die Querschnittsfläche Haversscher Kanäle kann noch zuverlässig bestimmt werden.

Die Messung vieler histomorphometrischer Parameter verlangt die Betrachtung eines Compactaareals mit gewisser Größe, in welchem alle osteonalen Strukturen vermessen werden. Im Falle lokaler oder flächendeckender Auslöschung der Strukturgrenzen ist die Erhebung entsprechender Parameter unmöglich. Dieses Problem trat beim Wenigumstadter Untersuchungskollektiv in ca. 80% aller Fälle bei den Rippen- und in ca. 65% aller Fälle bei den Femurcompactaprobe auf. Die Alternierender Individuen sind mit ca. 45% dekompositionsbedingtem Ausfall bei der Femurcompacta deutlich besser erhalten. Eine entsprechende Erhebung bezüglich der Rippencompacta wurde hier nicht mehr durchgeführt.

Prinzipiell wäre es möglich, Umbauraten des Knochengewebes post mortem an Compactaprobe zu bestimmen (Wu et al. 1970, Stout u. Teitelbaum 1976). Angesichts der Häufigkeit von dekompositionsbedingter Strukturauslöschung in beiden Kollektiven hätte man entsprechende Untersuchungen nur an wenigen Einzelindividuen erfolgreich durchführen können. Gleichzeitig herrscht Uneinigkeit, inwieweit Knochenumbauraten überhaupt geeignet sind, osteoporotische Prozesse zu charakterisieren (z.B. Nordin et al. 1981, Whyte et al. 1982, Boivin und Meunier 1993). Die beobachtete Existenz von verschiedenen Turnover-Typen (Arlot et al. 1990, NIH 1984) und der Nachweis unauffälliger Umbauraten im Fall progredienter Osteoporose (Turban-Just 1993, Turban-Just und Grupe 1995) stellen ihren Nutzen für Osteoporoseuntersuchungen in Frage. Vor dem Hintergrund der geringen Erfolgsaussichten, vor allem aber wegen der dekompositionsbedingten praktischen Undurchführbarkeit, wurde auf eine Ermittlung von Knochenumbauraten verzichtet.

Die Ergebnisse anderer Studien (Burr et al. 1990, Morosow 1996) ließen eine Überprüfung des Zusammenhanges zwischen statischen histomorphometrischen Parametern der Compacta und osteoporotischen Prozessen interessant erscheinen. So wurde zu Beginn der Arbeit versucht, ein alternatives Verfahren zu entwickeln, das, auch bei starker Beeinträchtigung durch Dekomposition, zumindest eine selektive Auswertung der osteonalen Compactastruktur zulässt: Da eine flächendeckende Compactaauswertung, selbst kleinerer Untersuchungsareale, nur in seltenen Fällen möglich war, wurden bei ungefärbten Wenigumstadter Rippenpräparaten jeweils einzelne erhaltene Osteone herausgegriffen und ausgewertet. Ihre Anzahl lag je nach Erhaltungsgrad der Compacta zwischen 9 und 33 pro Individuum. An ihnen konnten jeweils Umfangs- und Flächenparameter von Haversschen Lamellen und Kanälen bestimmt werden. Daraus ließen sich abgeleitete Parameter, wie Abweichung der Osteone von der idealen Kreisform und der Osteonerfüllungsgrad (Burr et al 1990), berechnen. Letzterer gibt an, wieviel Prozent der Osteonfläche durchschnittlich von Knochenlamellen eingenommen wird. Da es weder durch umfangreiche Experimente mit Färbeverfahren noch auf programmiertechnischem Wege gelang, eine automatische Erfassung von Osteongrenzen im Rahmen der digitalen Bildverarbeitung zu realisieren, mussten sämtliche Strukturgrenzen von Hand nachgefahren werden.

Dieses Auswertungsverfahren stellte von Anfang an nur eine Notlösung dar. Der Arbeitsaufwand ist unvermeidbar hoch. Die Auswahl der Osteone erfolgt streng genommen nicht zufällig. Ihre größtmögliche Anzahl ist dekompositionsbedingt meist viel zu gering für gesicherte quantitative Auswertungen.

Die Ergebnisse zeigten eine große interindividuelle Variabilität. Zusammenhänge zwischen Parametern und dem Sterbealter der Individuen wurden nicht deutlich. Ein direkter Vergleich mit den erwähnten Studien (Burr et al. 1990, Morosow 1996) ist unzulässig, da sie an Femurcompacta durchgeführt wurden. Ob wenig aussagekräftig-

ge Ergebnisse auf eine schlechte Eignung der Rippencompacta für derartige Untersuchungen oder auf die methodischen Unzulänglichkeiten zurückgeführt werden müssen, kann strenggenommen nicht geklärt werden. Doch scheint letzteres plausibler.

Bei einer Analyse der Femurcompacta wäre mit ähnlich unlösbaren Problemen zu rechnen gewesen. So wurde als methodische Konsequenz der häufigen Dekompositionsartefakte und des Scheiterns eines selektiven Auswertungsverfahrens auf eine Feinanalyse osteonaler Compactastrukturen ganz verzichtet.

Bei der experimentellen Suche nach gangbaren Alternativen gelang es schließlich, die unter 3.7. beschriebenen Parameter Materialerfüllungsgrad der Rippen und Porosität der Femurcompacta erfolgreich zu ermitteln. Wie die Parameterverläufe zeigen, besitzen ihre Messwerte ein gewisses Indikatorpotential für atrophische Prozesse (vgl. 4.1.). Außerdem können sie, selbst an stark durch Dekompositionsprozesse beeinträchtigtem Material, erhoben werden. Letzteres ist wiederum besonders wichtig, will man eine kombinierte Auswertung von Messparametern verschiedener Skeletelemente auf Kollektivebene durchführen. Nur so kann eine aussagekräftige Kollektivgröße, auch bei nur durchschnittlich gut erhaltenem Material, sichergestellt werden.

5.4.3. Allgemeine Konsequenzen für Untersuchungsverfahren an bodengelagertem Skeletmaterial

Das Ausmaß der beschriebenen Dekompositionsphänomene konnte aus dem makroskopischen Erhaltungsgrad nicht erschlossen werden und offenbarte sich erst nach der invasiven Probenentnahme.

Auf Grund der Erfahrungen mit dem Wenigumstadter und dem Altenerdinger Untersuchungskollektiv muss für bodengelagertes Skeletmaterial Folgendes festgehalten werden: Weder Sedimenteintragerungen noch Compactadekomposition lassen sich durch das makroskopische Erscheinungsbild des ungeöffneten Skeletelementes abschätzen. Insbesondere die Zerstörung der osteonalen Compactastruktur durch Bohrkanäle steht in keinem Zusammenhang mit dem äußeren Erhaltungszustand eines Skeletes. So fanden sich Bohrkanäle überraschender Weise sowohl bei morphologisch perfekt erhaltenen, als auch bei durch Oberflächenverwitterung stark angegriffenen Skeletelementen.

Besonders schwerwiegend könnten sich verdeckte Dekompositionsphänomene auswirken, wenn versucht wird, radiologische Verfahren aus dem medizinischen Bereich (z.B. DXA) zur BMD-Bestimmung auf bodengelagertes, archäologisches Skeletmaterial anzuwenden. Unbestritten sind der im Vergleich zur Histomorphometrie relativ geringe Arbeitsaufwand und die Umgehung invasiver Eingriffe ein herausragender Vorteil dieser Methode. Bleiben dadurch allerdings Sedimenteintragerungen, Versinterungen, Bohrkanäle und andere Dekompositionsphänomene unentdeckt, so gehen sie integrativ in die BMD-Messung mit ein, und es muss mit einer erheblichen, unsystematischen Fehlerbelastung der Ergebnisse gerechnet werden. Eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit medizinischen Referenzdaten oder archäologischen Skeletserien anderer geographischer Herkunft ist nicht ohne weiteres gegeben (Kneissel 1993, Brickley und Howell 1999).

Angesichts der makroskopischen Unkenntlichkeit der genannten Dekompositionsprozesse wäre auch zu überlegen, ob nicht eine histologische Abklärung der Eignung

eines Skeletelements zur Probenentnahme für Spurenelementanalysen, Protein- und DNA-Extraktionen sinnvoll erscheint. Spuren starker mikrobieller Tätigkeit auf histologischer Ebene legen auch eine Beeinträchtigung des Materials auf molekularem Niveau nahe (z.B. Grupe und Piepenbrink 1988).

5.5. Digitale Bildverarbeitung

In diesem Kapitel werden methodische Details der digitalen Bildverarbeitung noch eingehender erläutert, im Methodenteil festgeschriebene Vorgehensweisen begründet und deren Möglichkeiten und Grenzen diskutiert.

5.5.1. Technische Details der digitalen Erfassung histologischer Präparate

Die in Kap 3.5. beschriebene Verbindung der Digitalkamera mit der Fotoeinrichtung des Forschungsmikroskops ließ sich auf Grund gleichartiger Bajonettadapter realisieren, obwohl eine technische Kombination beider Geräte eigentlich nicht vorgesehen ist. Da die so erhaltenen Ergebnisse denen anderer verfügbarer Alternativen (z.B. analoge Videokameras) qualitativ weit überlegen waren, kam das Verfahren zum Einsatz. Im Einzelnen liegen die Vorteile vor allem bei einer hohen Auflösung der Primärbilder und der Verfügbarkeit eines relativ großen Bildausschnittes.

Da Digitalkamera und Fotoeinrichtung für einen gemeinsamen Einsatz nicht konzipiert waren, traten gewisse Schwierigkeiten bei der Belichtungssteuerung auf. Sie resultierten aus der direkten Montage der Kamera ohne Verwendung eines Objektivs. Die Fotoeinrichtung des Mikroskopes diente dabei nur als Adapter. Ihr Belichtungssteuerungssystem konnte nicht mit der Kamera zusammenarbeiten. Die Belichtungsautomatik der Digitalkamera erhält normalerweise vom Objektivprozessor wichtige Referenzinformationen zur Belichtungssteuerung. Da kein Objektiv vorhanden war, musste die Programmautomatik der Kamera durch manuelle Belichtungskorrektur kalibriert werden. Dazu wurden fotografische Testreihen mit verschiedenen Spongiosapräparaten bei unterschiedlichen Belichtungskorrekturen durchgeführt. Ziel war es, eine Einstellung zu finden, bei welcher die Digitalbilder eine möglichst geringe Nachbearbeitung vor der automatischen histomorphometrischen Analyse erforderten. Ein Korrekturwert von +1,7 Belichtungseinheiten erwies sich als gute universelle Einstellung, nicht nur für die Bilderfassung der spongiösen Präparate, sondern auch für die digitale Fotografie der Zahn- und Femurcompactaschnitte. Eine rein manuelle Belichtungssteuerung über die Vorwahl der Belichtungszeit schien, angesichts stark variabler Bildhelligkeiten durch unterschiedliche Trabekeldichten oder Dekompositionseinflüsse, als ungeeignet. Die Gefahr von Fehlbelichtungen hätte bei dieser Alternative, wegen der enormen Bilderzahl, einen zu hohen Zeitaufwand bedeutet.

Durch das Aufsetzen der Digitalkamera auf die Fotoeinrichtung, an Stelle der originalen Filmkassette, ändert sich gewissermaßen der Tubusfaktor der Anordnung in unbekannter Weise, weil nicht sicher gestellt werden kann, dass der Bildchip in der gleichen Ebene wie sonst der Kleinbildfilm zu liegen kommt. Exakte Werte für die Größe des Bildausschnittes und die Endvergrößerung waren nicht mehr direkt bere-

chenbar, sondern mussten mit Hilfe eines Mikrometerobjektträgermaßstabes (10 µm-Teilung, Fa. LOMO, St. Petersburg, Russia) ermittelt werden. Beim Einsatz der in Kapitel 3.5. beschriebenen Anordnung mit einem 4x-Objektiv entspricht ein Digitalfoto einer realen Bildfläche von 7,35 µm² auf dem histologischen Präparat.

Um die zur Berechnung des Knochenmaterialerfüllungsgrades von Rippen notwendigen Parameter (vgl. 3.7.) bestimmen zu können, ist es notwendig, die ganze Querschnittsfläche einer Rippe (ca. 1 cm²) zu digitalisieren. Da der Bildausschnitt bei der Durchlichtmikrofotografie für dieses Anliegen in jedem Fall zu klein und eine Zerlegung des Rippenquerschnittes in einzelne Teilbilder viel zu aufwendig ist, musste eine völlig andere Methode gefunden werden.

Wie in Kapitel 3.5. erläutert, wurden die silbergefärbten Rippenpräparate mittels eines Flachbettscanners mit Transparenzaufsatz direkt eingescannt. Da das verwendete Gerät (Umax SUPERVISTA S12) über ein hohes optisches Auflösungsvermögen (600 x 1200 dpi) verfügt, führte die ungewöhnliche Methode zu erstaunlich guten Resultaten. Mit dieser Technik ist es möglich, die gesamte Präparatefläche am Stück zu erfassen und zu histomorphometrieren. Prinzipiell wäre dieses Verfahren möglicherweise auch für andere morphometrische Untersuchungen an Skeletelementen einsetzbar. Theoretisch können Strukturen mit Querschnittsflächen bis DIN-A4 auf diese Weise digitalisiert werden.

Die Orientierung der histologischen Präparate während der Erfassung mit der Objektträgerseite nach unten erfolgt aus Gründen der Messkontinuität. Auf diese Weise liegen die Präparate immer gleichmäßig auf der Glasplatte des Scanners auf. Reste des Eindeckmittels auf der Deckglasseite führen nicht zu einer diskontinuierlichen Lage der Horizontalebene der Präparate beim Scanvorgang. Das Durchlicht durchstrahlt die Schnitte genau senkrecht. Abweichungen von diesem Verfahren können zu leichten Bildstörungen an den Rändern der Konturen führen, welche Gefahr laufen, durch anschließende Filterprozesse erodiert zu werden.

5.5.2. Elimination von Artefakten durch Filterungsprozesse

Vor der eigentlichen histomorphometrischen Bildanalyse müssen durch Präparation und Dekomposition verursachte Artefakte aus den Digitalbildern eliminiert werden. In der Praxis kann dies über die Wahl der Messfeldposition, durch nachträgliches, manuelles Entfernen von groben Bildstörungen und den Einsatz von automatischen Filterungsprozessen erfolgen (Hahn et al. 1992, Kneissel 1993). Meist wird eine Kombination aller drei Varianten eingesetzt. Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang, ob und wie diese Maßnahmen histomorphometrische Messwerte beeinflussen.

Unter der Voraussetzung, dass grobe Bildstörungen, z.B. Sedimentpartikel, richtig interpretiert werden, sind durch ihre Entfernung mittels Messfeldpositionsvariation und manueller Entfernung kaum Fehler zu erwarten. Anders verhält es sich mit Filterprozessen, die sowohl an typischen Artefakten, als auch an Knochenstrukturen ansetzen. Trotzdem ist die Bildfilterung ein unentbehrliches Hilfsmittel, um kleine und kleinste Präparations- und Dekompositionartefakte zu beseitigen, die zwar einzelnen kaum erkennbar sind, in ihrer Summe jedoch großen Einfluss auf die Messergebnisse nehmen können. So erzeugt beispielsweise eine durch oberflächliche Risse

zackenförmig erodierte Trabekelkontur histomorphometrische Perimeterwerte, welche die Realität im Extremfall um ein Vielfaches übersteigen können. Ein sicheres Erkennen und manuelles Entfernen der kleinen Strukturen ist sehr schwierig und extrem arbeitsintensiv. Noch stärker von derartigen Störungen beeinflusst sind TBPf-Werte, welche sich durch fälschlicherweise bei der Bildanalyse als Trabekelstücke interpretierte Verschmutzungen drastisch erhöhen. Jeder Schmutzpartikel wird dabei als nichtverknüpftes Trabekelstückchen gewertet. Geeignete Filterprozesse können flächendeckend derartige Störung eliminieren. Ein gewisser Einfluss der Bildfilterung auf histomorphometrische Messwerte ist dabei allerdings unvermeidlich.

Der im Rahmen dieser Arbeit unter Adobe PHOTOSHOP bei Rippen und Spongiosapräparaten angewandte Filter Staub & Kratzer hat folgende Funktion: Durch den Filter wird das Umfeld der einzelnen Bildpunkte nach abweichenden Pixeln gescant und der zentrale Punkt seiner Umgebung angepaßt. Dies führt zu einer gewissen Weichzeichnung des Bildes, von der größere, zusammenhängende Konturen weniger stark betroffen sind als kleine, isolierte Verunreinigungen. Der einstellbare Filterparameter "Radius" legt fest, in welchem Umfeld eines Bildpunktes nach Abweichungen gesucht werden soll. Der Parameter "Threshold" gibt an, ab welchem Unterschied zwischen den Bildpunkten reagiert wird. Nachdem sowohl die Knochenstrukturen als auch die Artefakte der analysierten Bilder im Wesentlichen aus schwarzen Bildpunkten bestehen, wurde er auf null gesetzt.

Die unter 3.7. für Spongiosapräparate beschriebene Einstellungen eines Radiuswertes von 10 hat bei der gewählten Bildauflösung von 300 dpi erkennbare Auswirkungen. Prinzipiell vermag sie in kleinen Dimensionen Risse zu füllen, Zacken zu glätten, Ecken abzurunden und Schmutzpartikel zu entfernen. Ob, und wenn ja, wie stark durch diese Prozesse histomorphometrische Messwerte verfälscht werden, wurde an Hand umfangreicher Testreihen mit spongiösen Präparaten im Vorfeld dieser Arbeit untersucht. Wie erwartet zeigten unbearbeitete Bilder die höchsten Werte bezüglich Trabekelfläche, Trabekelumfang und TBPf. Ursächlich hierfür ist die Mitbestimmung von Trabekelkonturerosionen, Sedimentpartikeln und anderer Verschmutzungen. Ein Verzicht auf Nachbearbeitung der Bilder mag bei medizinischem Sektionsmaterial unter Idealbedingungen möglich sein, bei bodengelagertem archäologischem Skeletmaterial führt er aus den genannten Gründen zu einer artefiziellen Erhöhung der Messparameter.

Gegenüber einer sehr genauen, rein manuellen Bearbeitung der Bilder unter Ausnutzung der Vergrößerungsmöglichkeiten ergaben sich bei einer Filterung mit den angegebenen Parametereinstellungen, für die Trabekelfläche nur Abweichungen von etwa 1%. Dieser Wert zeigt, dass sich mögliche Verfälschungen durch den Filterprozess in geringen Größenordnungen abspielen. Der Filtereinsatz scheint somit gerechtfertigt, zumal ein dadurch verursachter Fehler wegen konstanter Parametereinstellung zumindest weitgehend systematischen Charakter hat.

Eine Untersuchung der Filtereinflüsse an Kalibrierkörpern, d.h. an Präparaten mit bekannten Messparametern, scheiterte aus technischen Gründen. Die Kalibrierkörper müssen sich wie histologische Präparate verhalten. Geradlinige Konturen werden vom gewählten Filterungsprozess kaum tangiert, gekrümmte Formen waren schwer herzustellen, geschweige denn ihre Ausmaße genau zu bestimmen. Entsprechende Versuche wurden erfolglos abgebrochen.

5.5.3. Programmiertechnische Details der histomorphometrischen Bildanalyse

Die eigentliche histomorphometrische Analyse erfolgte, wie unter 3.7. bereits erwähnt, mit dem wissenschaftlichen Bildanalyseprogramm NIH IMAGE (Version 1.61). Es wurde an den U.S. National Institutes of Health entwickelt und wird dankenswerterweise für wissenschaftliche Zwecke kostenlos im Internet (available at <http://rsb.info.nih.gov/nih-image/> [1997 May 12]) zur Verfügung gestellt. Eine umfangreiche, pascalähnliche Macroprogrammiersprache gestattet es den Benutzern, die umfassenden Fähigkeiten des Programms auch für sehr spezielle Fragestellungen einzusetzen und komplexe Analyseabläufe zu programmieren. Trotz dieser bemerkenswerten Flexibilität des Programmes darf nicht übersehen werden, dass es ursprünglich für die Bildanalyse von Gelen konzipiert war. Somit lassen sich bei völlig andersartiger Problemstellung gewisse programmiertechnische Umwege nicht vermeiden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Grundtypen von Macroprogrammen entwickelt. Ihre Aufgabe ist es, jeweils die histomorphometrische Bildanalyse der Rippen-, Femur und Spongiosapräparate durchzuführen. Die Programmabläufe der drei Typen gleichen sich. Einmal gestartet, wird ein ganzer Datensatz bearbeiteter Bilder automatisch analysiert. Ein entsprechender Datensatz enthält üblicherweise alle Einzelbilder geschlechtsgleicher Individuen eines Untersuchungskollektivs für eine bestimmte Skeletregion.

In der Praxis wird zu Beginn das Macroprogramm in das Bildanalyseprogramm geladen. Mit Hilfe des Macros "Export Vorbereiten" wird eine Datendatei im Verzeichnis der Bilddaten angelegt, welche die gemessenen Parameter aufnimmt und anschließend in Microsoft EXCEL geöffnet werden kann. Nach Aufruf des eigentlichen Analysemacros muss das erste Einzelbild des Datensatzes in einem Menüfenster manuell ausgewählt werden. Dem Programm wird so das korrekte Verzeichnis der Bilddaten mitgeteilt. Von da an läuft die Analyse des Datensatzes automatisch ab.

Da die Macroprogramme ein zentrales technisches Detail der Arbeit darstellen, soll im Folgenden exemplarisch ein entsprechendes Programmlisting präsentiert und anschließend kommentiert werden. Bei dem ausgewählten Beispiel handelt es sich um den Macrotyp zur Analyse spongiöser Knochenpräparate; genaugenommen um die Version zur Auswertung des Datensatzes der Lendenwirbelkörperspongiosa Altenerdinger Frauen. Von den beiden anderen Programmtypen, zur Analyse von Rippen- und Femurpräparaten, ist je eine Version als Beispiel im Anhang A3 abgedruckt. Auf deren detaillierte Besprechung wird allerdings verzichtet, zumal sie auf ähnliche Strukturen und Prinzipien zurückgreifen.

Macroprogrammlisting:

Macro 'Trabekelanalyse'; {*** Thomas Beilner 16.4.1998 ***} {für AE-W-Frauen}

```
{+++++}
{+Dieses Macro berechnet Trabekelzahl, Flächensumme und Umfangssumme von+}
{+Trabekeln als Durchschnitt bezogen auf einen mikroskopischen Bildausschnitt. +}
{+TBPf wird aus den Summen der Werte bearbeiteter Einzelbilder errechnet +}
{+ und am Schluss als Durchschnittswert aller Bilder ausgedrückt. Nur so ist der +}
{+ notwendige Bezug auf eine einheitliche Untersuchungsfläche gewährleistet! +}
{+ Wegen Exportproblemen wird TBPf mit 1000.000 multipliziert. +}
{+ Mehrere Bilder einer Serie vom gleichen Skeletelement können automatisch +}
{+analysiert werden. Es ist festgelegt, dass jeweils die gleiche Anzahl von Bildern+}
{+ zweier verschiedener Schnittebenen verarbeitet werden muss. +}
{+ Ein fester Threshold von 140 wird zur Bildanalyse verwendet. +}
{+ Vorbereitung: Graustufenbilder 12x7,98 cm, 300 dpi; Dust & Scratches 10/0 +}
{+ Titelformat: 'Titel'x'Schnittebene 1 od. 2'-'Anzahl Serienbilder'-'Bildnummer' +}
{+ z.B. 145x2-4-1: Grab 145, Schnittebene 2, Serie mit 4 Bildern, Bild Nr.1 +}
{+++++}
```

Var {Definition der eingesetzten Variablen}

```
M:boolean;
i,Particles,f,h,o,q,Pid1,A,P,k,l,m,t,e,x,T: integer;
Area, Peri,IPeri,Trabekel,A1,A2,P1,P2,TBPF: real;
Messnummer,NT,GA,G1,G2,Titel,KK,EE,ZZ,U,SS,BS:string;
```

Begin

DisposeAll;

{Grabnummernverzeichnis}

```
G1:='78x1-4-1+118x1-4-1+128x1-4-1+143x1-4-1+146x1-4-1+192x1-4-1+201x1-4-1+
```

```
205x1-4-1+211x1-4-1+220x1-4-1+224x1-4-1+231x1-4-1+245x1-4-1+264x1-4-1+
294x1-4-1+343x1-4-1+452x1-4-1+532x1-4-1+576x1-4-1+625x1-4-1+';
```

```
G2:='634x1-4-1+658x1-4-1+709x1-4-1+747x1-4-1+760x1-4-1+832x1-4-1+1063x1-4-1+
```

```
1074x1-4-1+1119x1-4-1+1183x1-4-1+1229x1-4-1+1271x1-4-1+1291x1-4-1+
1305x1-4-1+1314x1-4-1+1340x1-4-1+151Ax1-4-1++++++';
```

```
GA:=G1;
```

For f:=1 to 37 Do begin {Einstellung für 37 Bilderserien}

```
{+++Bildtitelentschlüsselung+++++}
```

```
h:=pos('+',GA);
```

```
o:=length(GA);
```

```
NT:=GA;
```

```
Delete(NT,h,o-h+1);
```

```
q:=length(NT);
```

```
Delete(GA,1,q+1);
```

```
IF f= 20 Then GA:=G2;
```

```
Open(NT);{Laden des ersten Bildes einer Grabnummer}
```

```

Titel:=WindowTitle;Messnummer:=Titel;x:=99;
l:=length(Messnummer); l:=l-5; {schneidet die 6 Bildparameter vom ersten
Bildtitel ab}
Delete(Messnummer,l,6); {liefert die reine Grabnummer}
l:=length(Titel);t:=l-1;Delete(Titel,t,2); {kappt die Einzelbildzahl}
t:=l-3;Delete(Titel,1,t); { entfernt Grabnummer + Schnittzahl}
e:=StringToNum(Titel); {liefert die Anzahl der Einzelbilder}
SS:='x';BS:='-';
{+++++}
For k:=1 to 2 Do begin {Es werden die Einzelbilder von 2 Schnittebenen
analysiert}
  For m:=1 to e Do begin
    while x<99 Do begin {d.h. es handelt sich nicht um das erste Bild
                        (x=99)}
      KK:=concat(k);l:=length(KK);Delete(KK,l,l-1);
      {errechnete Zählziffer wird
      in einen String umgewandelt, dessen Länge genau auf die Zählziffer
      beschnitten werden muss, da die Stringumwandlung Leerzeichen
      einfügt}
      EE:=concat(e);l:=length(EE);Delete(EE,l,l-1);
      ZZ:=concat(m);l:=length(ZZ);Delete(ZZ,l,l-1);
      U:=concat(Messnummer,SS,KK,BS,EE,BS,ZZ); {liefert Ladetitel}
      Open(U);
      x:=99;
    end;
    x:=1;
    SetPalette('Grayscale');
    SetThreshold(140);
    MakeBinary;
    {+++++}
    {+++ Messung der realen Parameter am Originalbild +++++}
    {+++++}
    {Sicherung einer Kopie 'InnerPeri' zur Messung innerer Umfänge
    ringförmiger
    Strukturen}
    Pid1:=PidNumber;
    Duplicate('InnerPeri');
    {+++ Messung innerer Umfänge ringförmiger Trabekel +++++}
    IPeri:=0;
    Invert;
    SetOptions('Perimeter');
    SetScale(0.426,'µm'); {Skalierung für 4x Mikroskopvergrößerung + 2 x
    Photookular}
    SetParticleSize(100,999999);
    AnalyzeParticles('labelresetignore');
    Particles:=rCount;
    For i:=1 to Particles Do begin
      IPeri:=IPeri+rLength[i];

```

```

end;
Dispose;
{Sicherung einer Kopie 'Dilation' für nachfolgende Dilatationsmessung}
Duplicate('Dilation');
{+++ Messung der normalen Parameter ++++++}
SelectPic(Pid1); {Rückkehr zum Originalbild}
SetOptions('AreaPerimeter');
SetScale(0.426,'µm'); {Skalierung für 4x Mikroskopvergrößerung +
2 x Photookular}
SetParticleSize(100,999999);
AnalyzeParticles('labelreset');
Particles:=rCount;
Trabekel:=Trabekel+Particles;
For i:=1 to Particles Do begin
    Area:=Area+rArea[i];A1:=A1+rArea[i];
    Peri:=Peri+rLength[i];P1:=P1+rLength[i];
end;
Peri:=Peri+IPeri; {innerer Umfang wird zum Gesamtumfang hinzu
gezählt}
P1:=P1+IPeri; {Wertübergabe für TBPf-Berechnung}
Dispose;
{+++++}
{+Parametermessung nach Erweiterung des Originalbildes um 1 Pixel+}
{+++++}
SelectWindow('Dilation');
SetBinaryCount(1); {sorgt gegenüber der Normaleinstellung (4) für eine
kontinuierliche Umrandung}
Dilate; {alle Strukturen werden mit einer 1 Pixel breiten Linie erweitert}
{Sicherung einer Kopie 'InnerPeri' zur Messung innerer Umfänge
ringförmiger Strukturen}
Pid1:=PidNumber;
Duplicate('InnerPeri');
{+++ Messung der normalen Parameter ++++++}
SelectPic(Pid1); {Rückkehr zum Bild 'Dilation'}
SetOptions('AreaPerimeter');
SetScale(0.426,'µm'); {Skalierung für 4x Mikroskopvergrößerung +
2 x Photookular}
SetParticleSize(100,999999);
AnalyzeParticles('label');
For i:=Particles+1 to Particles*2 Do begin {Berechnung der Dilation
Parameter}
    A2:=A2+rArea[i];
    P2:=P2+rLength[i];
end;
Dispose;
{+++ Messung innerer Umfänge ringförmiger Trabekel ++++++}
SelectWindow('InnerPeri');
IPeri:=0;

```

```

    Invert;
    SetOptions('Perimeter');
    SetScale(0.426,'µm'); {Skalierung für 4x Mikroskopvergrößerung +
    2 x Photookular}
    SetParticleSize(100,9999999);
    AnalyzeParticles('labelresetignore');
    Particles:=rCount;
    For i:=1 to Particles Do begin
        IPeri:=IPeri+rLength[i];
    end;
    P2:=P2+IPeri; {innerer Umfang wird hinzu gezählt}
    Dispose;
    TBPf:=TBPf+(P1-P2)/(A1-A2);
    P1:=0;P2:=0;A1:=0;A2:=0; {Rücksetzen der Parameter für das
    nächste Bild}
end; {m}
end; {k}
{+++++Messdatenaufbereitung und Export+++++}
e:=e*2; {Anzahl der analysierten Einzelbilder einer Grabnummer}
{+Parameterdurchschnittsberechnung für alle Einzelbilder einer Grabnummer+}
Trabekel:=Trabekel/e;
Area:=Area/e;Peri:=Peri/e;A1:=A1/e;A2:=A2/e;P1:=P1/e;P2:=P2/e;
TBPf:=TBPf/e; TBPf:=TBPf*1000000;
A:=round(Area);P:=round(Peri);T:=round(TBPf);
{+++Export der Messdaten eines Individuums in die Datei' Trabekeldaten +++}
Open('Trabekeldaten');
Write(Messnummer,',','e,');
Write(Trabekel:4:3,',');
SetPrecision(0);
Write(A,',','P,');
SetPrecision(0);
Writeln(T);
Save;
Dispose;
Area:=0;Peri:=0;TBPf:=0;Trabekel:=0;
end; {f}
End; {Programmende}

```

Macro 'Export vorbereiten';

Begin

NewTextWindow('Trabekeldaten',500,100);

Writeln('Grabnummer',' ','Bilder',' ','Trabekel',' ','Area',' ','Peri',' ','TBPf');

Save;

Dispose;

End; {Programmende}

Eine Erläuterung des Programmes, Befehl für Befehl, scheint nicht unbedingt zweckmäßig. Aber es soll versucht werden, einen Überblick zum Programmablauf zu geben und Schlüsselstellen zu erklären bzw. zu begründen:

Im Listing stellen Zeichen innerhalb geschweiften Klammern prinzipiell nur Kommentare dar. Sie werden bei der Ausführung des Programmes nicht beachtet und dienen lediglich zur Strukturierung und Steigerung der Übersichtlichkeit.

Nach der obligatorischen Definition der eingesetzten Variablentypen beginnt das eigentliche Programm mit der Übergabe des jeweils ersten Bildtitels aller untersuchten Individuen in Stringvariablen (Programmabschnitt: Grabnummernverzeichnis). Soll ein anderes Kollektiv analysiert werden, müssen die veränderten Bildtitel in diesem Bereich eingetragen werden.

Das Programm setzt sich mit einer Schleife (Variable f) fort. Alle Operationen innerhalb dieser Schleife werden für jedes Individuum einmal vollzogen; d.h. in diesem konkreten Fall 37 Durchläufe für die 37 weiblichen Individuen des Altenerdinger Untersuchungskollektivs.

Innerhalb der Schleife wird das erste Einzelbild eines bestimmten Individuums geladen. Sein Titel wird zerlegt und analysiert (Programmabschnitt: Bildtitelentschlüsselung). Das Programm ermittelt so die Grabnummer (Variable Messnummer), zu der die Bilddaten gehören und erkennt wieviele Einzelbilder pro Schnittebene bei diesem Individuum insgesamt analysiert werden müssen (Variable e). Es beginnt eine Schleife (Variable k), die entsprechend der Einzelbilder aus zwei verschiedenen Schnittebenen, zweimal durchlaufen wird. In ihr liegt eine weitere Schleife (Variable m) die entsprechend der Anzahl an Bildern pro Schnittebene wiederholt werden muss. Ist das erste Bild eines Individuums bereits analysiert worden, so wird innerhalb der folgenden While-Schleife der logische Titel des zur Bearbeitung anstehenden Bildes zusammengesetzt und die entsprechende Datei automatisch geöffnet.

Vor dem Beginn der eigentlichen Bildauswertung muss das geladene Graustufenbild in ein echtes Binärbild, das nur aus schwarzen und weißen Bildpunkten besteht, transformiert werden. Dazu wird ein Grenzwert gesetzt (SetThreshold (140)). D.h. alle Bildpunkte mit einem Graustufenwert unter 140 werden auf 0 (entspricht bei NIH-IMAGE weiß) gesetzt, die übrigen auf 255 (schwarz). Angesichts der Nachbearbeitung der Originalbilder ist die Verwendung eines festen Grenzwertes sinnvoll. In seinem unmittelbaren Trennbereich liegen, wenn überhaupt, nur sehr wenige Bildpunkte, die vor allem aus Konturunschärfen resultieren. Der Wert von 140 wurde empirisch als die ideale Einstellung ermittelt. Abweichungen hiervon wären aber in weiten Grenzen tolerierbar. Trotzdem wurde auf eine automatische, jeweils bildspezifische Ermittlung des Grenzwertes an Hand von Histogrammen verzichtet. Grund dafür sind Extremfälle, bei denen der Grenzwert Dimensionen erreichen kann, die in den Bereich echter Bildinformationen fallen können. Ausgelöst werden solche Konstellationen durch ungewöhnlich hohe bzw. niedrige Trabekeldichten auf Einzelbildern.

Im Programmablauf erfolgt nun die Messung der Trabekelumfänge, der Trabekelflächen und der Trabekelanzahl am aktuellen Einzelbild (Programmabschnitt: Messung der realen Parameter am Originalbild). Die ermittelten Daten werden additiv in die Variablen Peri, Area und Trabekel übergeben, bis alle Einzelbilder eines Indivi-

duums analysiert sind. Winzige eigenständige Strukturen, z.B. von der Nachbearbeitung nicht eliminierte Schmutzpartikel, die eine Größe von weniger als 100 Pixeln unterschreiten, werden nicht als Trabekelstücke gewertet und bleiben unberücksichtigt.

Da NIH IMAGE nicht in der Lage ist, die inneren Umfänge ringförmiger Strukturen bzw. kreisförmig geschlossener Trabekel zu ermitteln, müssen diese an einer weiteren Kopie des Originalbildes zusätzlich ermittelt und mit dem Ergebniss verrechnet werden. Die inneren Umfänge transformiert man durch Inversion des Bildes zu äußeren. Diese lassen sich unter Nichtberücksichtigung aller Inversionsstrukturen, welche die Bildgrenzen berühren, messen. Da ein Test auf das tatsächliche Vorhandensein ringförmiger Strukturen einen ähnlichen Rechenaufwand bedeuten würde, wird der beschriebene Programmschritt präventiv auf jedes Einzelbild angewandt.

Um TBPf-Werte nach Hahn et al. (1992) gemäß Kapitel 3.7. berechnen zu können, müssen die Trabekelkonturen des Originalbildes mit einer 1-Pixel-breiten Linie erweitert und erneut Flächen und Umfänge bestimmt werden (Programmabschnitt: Messung der Parameter nach Erweiterung des Originalbildes um 1 Pixel). Am Ende dieses Programmabschnittes wird der TBPf-Wert des Einzelbildes berechnet und additiv in die Variable TBPf übergeben, bis alle Einzelbilder eines Individuums analysiert sind.

An dieser Stelle endet die Schleife der Variablen m, nachdem alle Einzelbilder einer Schnittebene analysiert sind. Die Schleife der Variablen k ist beendet, wenn alle Bilder beider Schnittebenen für ein Individuum ausgewertet sind.

Im letzten Programmabschnitt (Programmabschnitt: Messdatenaufbereitung und Export) wird aus den Summen der Messdaten eines Individuums jeweils der Parameterdurchschnittswert pro Einzelbild bzw. Standarduntersuchungseinheit errechnet. Die TBPf-Werte werden aus technischen Gründen mit 10^6 multipliziert.

Die zuvor angelegte Datendatei wird geöffnet, und es erfolgt die Übergabe von Grabnummer und Parameterwerten des entsprechenden Individuums. Die ergänzte Datei wird gespeichert.

Die Schleife der Variablen f startet den nächsten Durchlauf, bis die Bilddaten aller Individuen ausgewertet sind und das Programmende erreicht ist.

Dem Macro 'Trabekelanalyse' folgt im Listing noch das kleine Programm 'Export vorbereiten'. Wie bereits beschrieben, dient es dazu, noch vor Beginn der eigentlichen Analyse eine EXCEL-lesbare Datendatei mit tabellarischer Struktur zu generieren.

5.6. Berechnungsmodus der Indexwerte

5.6.1. Begründung der Parameterwahl

Die Kombination mehrerer histomorphometrischer Parameter von vier verschiedenen Skeletregionen zu Indexwerten ist ein zentrales Element der Auswertungsmethodik dieser Arbeit. Dabei werden jeweils die folgenden vier Messparameter eines Individuums zur Indexbildung herangezogen: Porosität der Femurcompacta, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Beckenkamm, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper und Rippenmaterialerfüllungsgrad. Prinzipiell könnte aber auch eine völlig andere Parameterkombination verwendet werden. Im Folgenden wird gezeigt, welche Überlegungen dem eingeschlagenen Weg zu Grunde liegen.

Erklärtes Ziel dieser Untersuchung ist es, die hohe individuelle Variabilität histomorphometrischer Messergebnisse durch die gleichzeitige Betrachtung verschiedener Skeletregionen zu nivellieren. Daraus erwächst die Vorgabe, möglichst alle vier untersuchten Skeletregionen an den Berechnungen zu beteiligen.

Voraussetzung für die sinnvolle Berücksichtigung eines Parameters ist seine möglichst stetige Veränderung mit dem Lebensalter. Sie zeigt, ob der Parameter prinzipiell geeignet ist, atrophische Prozesse am Skelet, seien sie nun physiologischer oder pathologischer Natur, darzustellen. Wenn Parameter einen entsprechenden Zusammenhang mit dem Lebensalter erkennen ließen, so verlief dieser innerhalb der untersuchten Altersspanne zumindest näherungsweise linear (vgl. 4.1.). Versuche, die Parameterverläufe durch nicht-lineare Modelle zu beschreiben, wurden aufgegeben. Entweder führten sie zu Kurvenverläufen, die in keinem sachlichen Zusammenhang mit der biologischen Grundlage der Messparameter mehr standen, oder sie konnten gegenüber dem linearen Modell keine wesentliche Verbesserung erbringen. Um die Güte der Kurvenanpassungen vergleichend zu beurteilen, wurde jeweils die Summe der Abweichungsquadrate verwendet.

Geht man von einer linearen Beziehung zwischen Lebensalter und Parameterwert aus, so beschreibt der Korrelationskoeffizient, wie deutlich dieser Zusammenhang ausgeprägt ist.

Vor diesem Hintergrund scheint es sinnvoll, von jedem Skeletelement den Parameter mit der stärksten Korrelation zum Lebensalter für die Indexberechnung zu berücksichtigen. Eine statistisch signifikante Sicherung des Zusammenhanges ist dabei wünschenswert. Unter Ausschluss des Problemfalles Grabnummer 222 bei den Wenigumstadter Männern (vgl. 4.2.2.), erfüllen die vier ausgewählten Parameter in beiden Untersuchungskollektiven diese Forderungen.

Prinzipiell wäre es möglich, noch weitere Parameter zur Berechnung des Osteoporosestatus heranzuziehen. Potenziell geeignet wären hierzu vor allem die Parameter Trabekelumfang und TBPf von Beckenkamm und Lendenwirbelkörper. Ob dadurch tatsächlich eine höhere Zuverlässigkeit der Osteoporosestatuswerte erreicht werden kann, ist allerdings fraglich. Einerseits stellt die Aufnahme weiterer Parameter prinzipiell ein größeres Informationsquantum bereit. Andererseits sind die hinzugewonnenen Informationen, bei Verwendung von deutlich schwächer mit dem Lebensalter

korrelierten Parametern, aber nicht ganz so zuverlässig wie die der gewählten vier Parameter. Hinzu kommt noch, dass die zusätzlichen Messwerte ausnahmslos mit dem bereits zur Verwendung vorgesehenen Parameter ihrer Skeletregion stark korreliert sind ($r=0,59-0,89$; $p=0,000$), was die Möglichkeit auf einen erweiterten Informationsgewinn einschränkt.

Dies gilt auch für alle TBPf-Werte. Ihre Mitverwendung bei der Osteoporosestatusberechnung war ursprünglich vorgesehen, da sie den einzigen Parameter darstellen, der in Form des Spongiosavernetzungsgrades die strukturelle Qualität des Knochens direkt berücksichtigt. Parameterverläufe und die deutliche Korrelation der TBPf-Werte mit der jeweiligen Trabekelfläche zeigen entgegen den Erwartungen, dass im Falle der untersuchten Kollektive ein struktureller Qualitätsverlust immer an einen Verlust an Knochenmasse bzw. Knochendichte gekoppelt ist. Dies gilt gleichermaßen für Männer und Frauen, bei letzteren auch für die postmenopausale Phase (vgl. 4.1.1 und 4.1.2.).

Aus diesen Überlegungen resultierte die Entscheidung, sich auf die vier verwendeten Parameter zu beschränken. Die Beibehaltung dieses Konzeptes während der Untersuchung beider Kollektive war obligatorisch für den geplanten Vergleich der gesammelten Daten.

Trotzdem mag ein abweichendes Auswahlkonzept für die an der Indexberechnung beteiligten Parameter unter anderen Voraussetzungen durchaus sinnvoll sein. Dann ist allerdings darauf zu achten, dass der Einfluß der verschiedenen Skeletelemente nicht durch unterschiedliche Anzahl der sie betreffenden miteinbezogenen Parameter willkürlich gewichtet wird.

5.6.2. Diskussion zur Gewichtungsmöglichkeit von Indexkomponenten

Sowohl zur Berechnung des Osteoporosestatus als auch beim Vergleich der Indexrends auf Kollektivebene werden die Indexkomponenten einfach aufsummiert. D.h. man trifft die Annahme, dass sich atrophische Prozesse in den Parametern der vier Skeletelemente gleich gut manifestieren. Dies entspricht sicher nicht exakt der Realität.

Um dieser Tatsache gerecht zu werden, könnte man die Parameterwerte durch Multiplikation mit ihrem Korrelationskoeffizienten zum Lebensalter gewichten, ehe man sie zu Indexwerten verrechnet.

Zu einem Zeitpunkt, an dem nur die Messdaten des Wenigumstadter Kollektivs vorlagen, wurde dieser Weg beschritten. Betrachtet man zur Quantifizierung des Osteoporosestatus nur die Individuenebene eines Kollektivs, so hat diese Vorgehensweise auch weiterhin eine gewisse Berechtigung. Allerdings muss die Zuverlässigkeit dieser Gewichtung kritisch hinterfragt werden. Die berechneten empirischen Korrelationskoeffizienten sind selbst nur vom Zufall beeinflusste Schätzwerte. Berechnet man für sie signifikante Konfidenzintervalle, so gibt es deutliche Überlappungsbereiche, welche die berechneten Werte der Koeffizienten mit einschließen.

Die Messdaten des Altenerdinger Materials bestätigten erwartungsgemäß gewisse Unterschiede bezüglich der Korrelationskoeffizienten gleicher Parameter in beiden

Untersuchungskollektiven. Will man den Trend der Indexwerte zweier Bevölkerungen auf Kollektivebene vergleichen, so stößt man an die Grenzen der Gewichtungsmethode: Gewichtet man alle Daten mit den Korrelationskoeffizienten eines Referenzkollektivs, so erscheint dies willkürlich. Verwendet man jeweils Durchschnittswerte der beiden Kollektive, gleichen sich die Gewichtungsfaktoren so stark an, dass die praktische Relevanz ihres Einflusses bezweifelt werden muss.

Angeichts dieser Schwierigkeiten wurde letztlich auf eine Gewichtung der Indexkomponenten, sowohl bei der Berechnung des Osteoporosestatus auf Individuenebene als auch beim Vergleich der Indextrends auf Kollektivebene, verzichtet. Abb. 30 illustriert exemplarisch, wie gering sich eine Gewichtung der Indexkomponenten auf die Berechnung des Osteoporosestatus auswirkt.

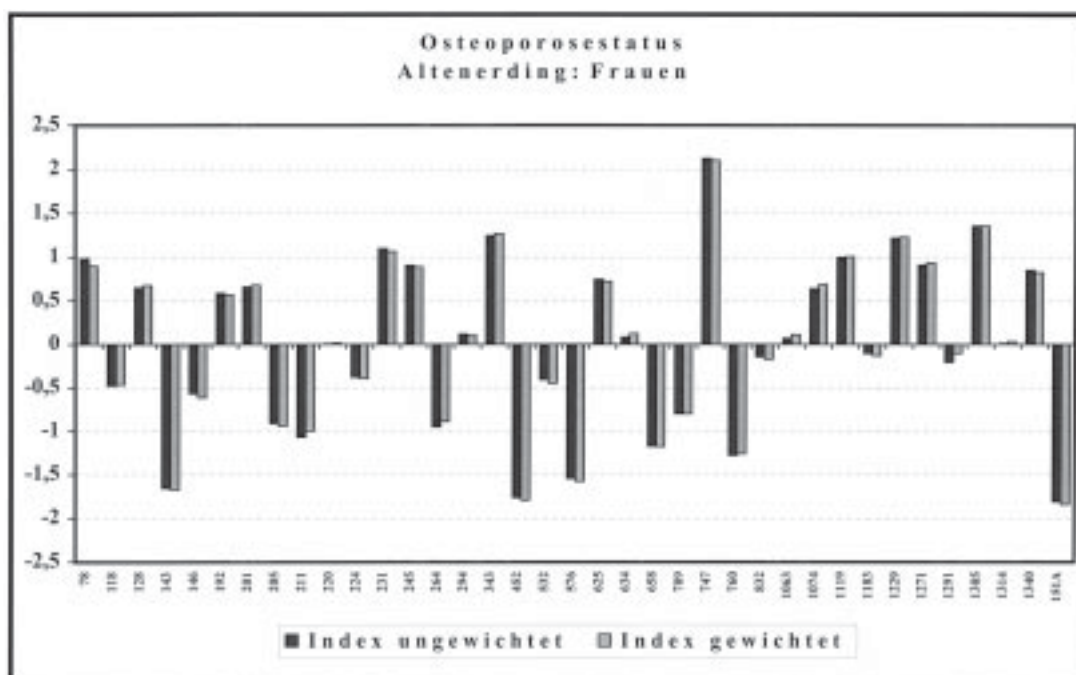


Abb. 30. Osteoporosestatusberechnung für Altenerdinger Frauen auf Grundlage gewichteter und ungewichteter Indexkomponenten.

5.7. Das Osteoporosestatuskonzept

5.7.1. Begründung des Prinzips

Der Osteoporosestatus vergleicht den histomorphometrischen Indexwert eines Individuums mit dem alters- und geschlechtsspezifischen Trend im Untersuchungskollektiv. Diese Strategie ist der Ermittlung des T-score bei im medizinisch-klinischen Bereich durchgeführten BMD-Messungen mittels absorptiometrischen Verfahren (vgl. 1.1.1. und 1.1.5.) vergleichbar. Allerdings wird beim Osteoporosestatuskonzept der die Altersnorm repräsentierende Bezugspunkt nicht als Durchschnittswert vielfacher Messungen an Personen gleichen Alters ermittelt, sondern mit einer Regressionsanalyse geschätzt. Für archäologische Anwendungsfelder stellt dies eine notwendige Adaptation an die Realität der Materialverhältnisse dar. Eine den radiologischen BMD-Referenzmessungen des medizinischen Bereiches vergleichbare Probandenzahl steht in Form historischer Skeletserien nicht zur Verfügung. Auch wäre ihre histomorphometrische Auswertung vom Arbeitsaufwand her kaum zu bewältigen. Durch das Schätzen des Trendverlaufs ist es hingegen möglich, Osteoporosestatusberechnungen auch bei kleinen archäologischen Untersuchungskollektiven vorzunehmen.

Das Osteoporosestatuskonzept orientiert sich somit an den Rahmenbedingungen von Untersuchungen an bodengelagertem archäologischem Skeletmaterial und ist dabei auf mögliche anthropologische Fragestellungen abgestimmt. Es dient nicht als diagnostisches Werkzeug zum Aufspüren von Individuen mit klinisch manifester Osteoporose in historischen Skeletserien, sondern als Hilfsmittel für die Ursachenforschung der Osteoporose auf Bevölkerungsebene. Mit ihm ist es möglich, die Individuen eines Untersuchungskollektivs quantitativ nach dem Grad ihrer Prädisposition für knochenatrophische bzw. osteoporotische Prozesse einzuteilen. Die relative Zuordnung der einzelnen Individuen erfolgt dabei auf der Grundlage ihrer individuellen Abweichung vom alters- und geschlechtsspezifischen Trend der strukturellen Quantität und Qualität bestimmter Skeletelemente auf histologischer Ebene im Untersuchungskollektiv.

Insofern birgt auch die Tatsache, dass das Osteoporosestatuskonzept an ein und dem selben Kollektiv entwickelt und angewandt wurde nicht die Gefahr eines Zirkelschlusses. Anders als beispielsweise bei histomorphometrischen Verfahren zur Sterbealtersdiagnose, die nach ihrer Entwicklung durch Überprüfung an altersbekanntem Sektionsmaterial auf eine allgemeine Übertragbarkeit getestet werden müssen (vgl. Herrmann et al. 1990), sind Osteoporosestatusberechnungen von vornherein an ein bestimmtes Kollektiv gebunden, von dessen Indextrendverlauf sie abhängen. Die relative Abweichung eines Individuums von diesem Trend stellt eine rein rechnerische Größe und keine Wertung im Sinne einer Krankheitsdiagnose, welche verifiziert werden müsste, dar.

Im medizinischen Bereich gibt es keinen dem Osteoporosestatus vergleichbaren Kennwert. Um das Konzept dennoch zu überprüfen, ließe sich allenfalls testen, ob BMD-Werte, die kurz vor dem Tode von Patienten gemessen wurden, ähnliche Abweichungen vom alters- und geschlechtsspezifischen Trend zeigen, wie postmortal

durchgeführte Erhebungen des Osteoporosestatus. Ein entsprechendes Testkollektiv mit quantitativ auswertbarer Individuenzahl, für das die erforderlichen BMD-Messungen vorliegen, bei dem eine postmortale Probenentnahme möglich ist und welches eine Altersverteilung, ähnlich einer Friedhofspopulation besitzt, ist in der Praxis allerdings nicht beizubringen. Des Weiteren scheint die Überprüfung eines Kennwertes der, wie der Osteoporosestatus, auf mehreren Informationen beruht durch einen Parameter, der nur an einer Skeletregion gemessen werden kann, wenig sinnvoll.

5.7.2. Einschränkungen, Leistungen und Handhabung der Methodik

Wie bereits angedeutet, betrifft eine wichtige Einschränkung des Osteoporosestatuskonzeptes seine Übertragbarkeit. Da aus den genannten Gründen der Referenztrend aus den Indexwerten des Untersuchungskollektivs berechnet werden muss, bleiben die Osteoporosestatuswerte relativ und auch nach ihrer Standardisierung an das Kollektiv gebunden. D.h. zwei alters- und geschlechtsgleiche Individuen aus verschiedenen Skeletserien mit identischen Osteoporosestatuswerten müssen nicht unbedingt die gleiche Osteoporoseprädisposition besitzen. Will man Vergleiche auf Bevölkerungsebene durchführen, so empfiehlt sich das unter Kap. 3.11. beschriebene Verfahren.

Des Weiteren kann der Osteoporosestatus immer nur die Verschlechterung der Knochenstruktur gegenüber der Altersnorm feststellen. Eine ursächliche Differentialdiagnose ist nicht möglich. So machen sich seltenere Erkrankungen, wie die mit einer Mineralisationsstörung der Osteoidmatrix verbundene Osteomalazie nach dem liegezeitlich bedingten Abbau organischer Substanzen, ebenfalls nur durch einen Knochenmasseverlust bemerkbar. Ohne zusätzliche Informationen aus Skelet- und Röntgenbefund ist eine differentialdiagnostische Unterscheidung dieser Krankheit von Osteoporose weder über den Osteoporosestatus noch mit anderen Methoden möglich (Aufderheide und Rodríguez-Martín 1998).

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der Anwendung linearer Regressionsmodelle. Unter den Bedingungen des Wenigumstadter und des Altnerdinger Untersuchungskollektivs ist ihre Anwendbarkeit gerechtfertigt. Sollten wider Erwarten bei anderen Kollektiven deutliche, von der Linearität abweichende Parameterverläufe auftreten, müsste man entweder versuchen, die Daten zu transformieren oder zu nicht-linearen Modellen wechseln. Nach den am Wenigumstadter Kollektiv gemachten Erfahrungen scheint es ratsam, auf die Untersuchung jüngerer Individuen mit dem Osteoporosestatuskonzept zu verzichten. In der Altersklasse frühadult muss mit einer etwas erhöhten Variabilität der Parameterwerte und so mit einem Abweichen vom Trend der höheren Altersklassen gerechnet werden. Ein Erklärungsansatz für dieses Phänomen könnte sein, dass in diesem Zeitabschnitt einige Individuen ihre peak bone mass schon annähernd erreicht haben, andere sie hingegen noch aufbauen. Wie Erfahrungen mit dem Altnerdinger Kollektiv gezeigt haben, umgeht man diese Schwierigkeiten am besten, indem man sich vorzugsweise auf Individuen mit einem Mindeststerbealter von etwa 25-30 Jahren beschränkt. Eine möglichst stetige Altersverteilung insbesondere kleiner Untersuchungskollektive unterstützt eine realistische Trendberechnung.

Bei der Berechnung des Osteoporosestatus wurden die Abstände der individuellen Indexwerte vom geschätzten Trend im Untersuchungskollektiv standardisiert (vgl. 3.8.). Diese Maßnahme soll dazu beitragen, dass man sich die Ergebnisse interindividueller Vergleiche der Osteoporosestatuswerte etwas leichter vorstellen kann. Ob dieses Ziel erreicht wird, unterliegt freilich der subjektiven Einschätzung des Anwenders. Die Alternative wäre eine direkte Verwendung der Residuen. Die im Rahmen dieser Arbeit angewandte Standardisierung erfolgte nicht in statistisch korrekter Form. Die individuellen Abstände vom Indexrend werden wie Ergebnisse einer Zufallsstichprobe behandelt, ungeachtet, dass es sich in Wirklichkeit um Residuen einer Regressionsanalyse handelt. Das unter Kap. 3.8. beschriebene Berechnungsverfahren der Standardabweichung lässt den erhöhten Freiheitsgrad der Residuen außer Acht und berücksichtigt nicht, dass für Residuen strenggenommen keine exakte Unabhängigkeit besteht (Precht und Kraft 1993). Andererseits soll der Osteoporosestatus einen leicht berechenbaren Kennwert für anthropologische Untersuchungen darstellen und kein korrekt standardisiertes Residuum. Die getroffenen Vereinfachungen scheinen unter dem Gesichtspunkt der praxisnahen Anwendbarkeit gerechtfertigt, zumal sich die Bedeutung der statistischen Unkorrektheiten mit steigender Individuenzahl mehr und mehr verliert.

Die Bestimmung des Osteoporosestatus eröffnet die Möglichkeit, Individuen mit hoher und niedriger Osteoporoseprädisposition gruppenweise oder einzeln miteinander zu vergleichen. Durch den Einsatz der unterschiedlichsten Methoden (z.B. Analyse von Spurenelementen, stabilen Kohlenstoff- und Stickstoffisotopen sowie Aktivitätsmustern) kann geklärt werden, ob die Differenzen bei den Osteoporosestatuswerten einen Zusammenhang mit unterschiedlichen Lebensgewohnheiten erkennen lassen. Entsprechende Ergebnisse könnten wertvolle Beiträge zur Risikofaktorenanalyse der Osteoporose leisten.

Je nach Fragestellung wird es sinnvoll sein, die Trennschärfe zwischen osteoporosegefährdeten und nicht gefährdeten Individuen zu erhöhen. Dies kann geschehen, indem man Individuen mit positiven Osteoporosestatuswerten von solchen mit negativen durch eine mehr oder weniger indifferente Zone trennt, deren Individuen nicht berücksichtigt werden. Wählt man beispielsweise eine Standardabweichung als Trennzonenbreite, so enthalten beide Gruppen nur Individuen deren Osteoporosestatuswerte kleiner als -0,5 bzw. größer als + 0,5 sind.

Finden sich im Untersuchungskollektiv Individuen mit extrem niedrigen Osteoporosestatuswerten, die sich bereits unter Zuhilfenahme des Skelet- und Röntgenbefundes als sekundäre Osteoporoseformen identifizieren lassen, so kann ihr Ausschluss von den Berechnungen sinnvoll sein. Dabei handelt es sich um eher seltene Fälle, deren osteoporotische Erkrankung ursächlich auf ein konkretes Leiden zurückgeführt werden kann. Entsprechender Verdacht besteht z.B. für die Individuen Wenigumstadt Nr. 131 und Altenerding Nr. 1090 (vgl. 6.3.1.). Durch ihre niedrigen Osteoporosestatuswerte beeinflussen sie, gerade bei kleinen Kollektiven, die Lage des Indexrends, ohne dass ein direkter Einfluss von Lifestylefaktoren im Sinne des Risikofaktorenkonzeptes gesichert ist. Die Tatsache, dass gerade solche Individuen, mit bereits am Skelettbefund nachweisbaren Zeichen einer manifesten osteoporotischen Krank-

heit, auch durch ungewöhnlich niedrige Osteoporosestatuswerte auffallen, bestätigt das Konzept.

Ein weiterer Vorzug des Osteoporosestatuskonzeptes ist die Möglichkeit, osteoporotische Prädispositionen auch bei jung verstorbenen Individuen zu erkennen. Man könnte in einem Kollektiv beispielsweise eine 35jährige Frau finden, die deutlich unterhalb der Altersnorm aller 35jährigen weiblichen Individuen liegt. Ihr Osteoporosestatuswert wäre dadurch auffällig negativ. Verglichen mit einer 70jährigen, die ähnlich stark unter die Altersnorm der 70jährigen Frauen fällt, wäre ihr Knochenstatus aber wesentlich besser. Ein deutliches Frakturrisiko muss bei der jungen Frau noch nicht bestehen. Untersucht mit einer Methode, die sich eher an der Idee des Z-score-Konzeptes orientiert, würde sich die 35jährige Frau nicht besonders auffällig verhalten und bliebe unentdeckt.

Trotzdem ergibt sich hieraus kein echter Widerspruch, da die junge Frau mit 35 Jahren gestorben ist. Im Falle ihres Überlebens hätte sich ihr Knochenstatus wie üblich, allerdings ausgehend von einem zu niedrigen Niveau, weiter verschlechtert, so dass in höherem Alter ebenfalls die Altersnorm deutlich unterschritten worden wäre und Frakturen als typische Konsequenz einer dann klinisch manifesten Osteoporose gedroht hätten. Man kann also den Beginn eines osteoporotischen Geschehens nachweisen, obwohl das betroffene Individuum ein Auftreten klinischer Symptome nicht mehr erlebt hat.

Durch die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer histomorphometrischer Parameter von vier verschiedenen Skeletelementen bei der Osteoporosestatusberechnung lässt sich die Zuverlässigkeit der Methode erhöhen. Bezieht man sich bei Vergleichen mit der Altersnorm nur auf BMD-Werte oder histomorphometrische Parameter einer einzigen Untersuchungsstelle, so schlagen sich Messfehler, lokale und individuelle Variabilitäten voll im Ergebnis nieder. Durch die Kombination der Aussagekraft mehrerer Messungen in Form der Indexwerte erreicht man eine Nivellierung dieser Zufallsschwankungen. Ein konkretes Beispiele aus dem Altenerdinger Untersuchungskollektiv soll diese Zusammenhänge verdeutlichen:

Für das männliche Individuum Grab Nr. 1107 wurden auffällig niedrige Werte für die Trabekelfläche im Becken ermittelt. Sie erreichen nur etwa 50% des altersspezifischen Trends des Kollektivs. Die Porosität seiner Femurcompacta ist leicht erhöht. Sein Rippenmaterialerfüllungsgrad liegt unwesentlich unterhalb der Erwartungswerte. Die Trabekelfläche des Lendenwirbelkörpers übersteigt die Altersnorm hingegen deutlich.

Würde man hier nur einzelne Parameter betrachten, so müsste man auf Grund der Beckenwerte ausgeprägte osteoporotische Prozesse annehmen. Die Messungen am Lendenwirbelkörper sprächen hingegen für ein eher knochengesundes Individuum, während sich die übrigen zwei Parameter wenig auffällig verhalten. Berechnet man den Osteoporosestatus, so ergibt sich ein Wert von -0,7. Daraus lassen sich zwar gewisse osteoporotische Tendenzen ablesen, doch wurde der Einfluss des extrem niedrigen Beckenwertes auf Grund von nonkonformen Aussagen der restlichen Parameter etwas relativiert. Angesichts möglicher Messungenauigkeiten, der hohen Variabilität histomorphometrischer Parameterwerte und weil der Skeletbefund trotz eines Sterbealters von 62 Jahren noch keinerlei Anzeichen osteoporotischer Veränderun-

gen erkennen lässt, scheint die Einschätzung durch die Osteoporosestatusberechnung realistischer als die ausschließliche Betrachtung der Beckenwerte.

6. Inhaltliche Diskussion

Die Verbreitung osteoporotischer Erkrankungen in historischen Bevölkerungen gerät zunehmend in das Interessensfeld anthropologischer Forschung. Dabei stehen weniger paläopathologische Kasuistiken als epidemiologische, ätiologische und sozialgeschichtliche Fragestellungen im Vordergrund.

Das Einbeziehen von archäologischem Skeletmaterial in die Grundlagenforschung der Osteoporose liefert seit kurzem Erkenntnisse zur zeitlichen Tiefe der Epidemiologie dieser hochaktuellen "Volkskrankheit".

Erst in den letzten Jahren konnten Untersuchungen mit exakteren Methoden zur Sterbealtersbestimmung Vermutungen bestätigen, wonach historische Bevölkerungen eine deutlich höhere Lebenserwartung besaßen, als bisher angenommen wurde (z.B. Cipriano-Bechtle et al. 1996). Dies legt die verbreitete Existenz von Risikogruppen älterer Menschen in früheren Populationen nahe, deren Mitglieder potentiell von den Konsequenzen einer klinisch-manifesten Osteoporose betroffen waren. Besonders von sozialgeschichtlichem Interesse sind in diesem Zusammenhang sozialgruppenspezifische Risikoverteilungen, sowie Akzeptanz und Kompensation der Erkrankungen durch die Gesellschaft.

Wie bereits in Kapitel 1.2. ausgeführt, birgt archäologisches Skeletmaterial ein hohes Informationspotential, das für die Ursachenforschung der Osteoporose erschlossen werden kann. Auch wenn sich derzeit insbesondere genetische Noxen noch kaum an bodengelagertem Skeletmaterial erschließen lassen, so ist dennoch das Vorhandensein einer ganzen Reihe von physiologischen, umweltbedingten und ernährungsspezifischen Osteoporoserisikofaktoren für Individuen historischer Bevölkerungen rekonstruierbar. Vor allem Aussagen zu Schwangerschaften, Stillzeiten, physiologischer und pathologischer Belastung, sowie zum quantitativen Anteil bestimmter Komponenten an der Ernährung sind möglich.

Zentrale Aufgabe dieser Arbeit war die Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zum Aufspüren und Vergleichen osteoporotischer Prädispositionen in bodengelagerten Skeletkollektiven. In diesem Rahmen erfolgte seine Anwendung auf die frühmittelalterlichen Skeletserien von Wenigumstadt und Altenerding. Es existiert bereits Datenmaterial früherer Studien, welches partielle Informationen zu den Lebensbedingungen beider Bevölkerungen liefert, aber unter völlig anderen Aspekten erhoben wurde. So deuten Spurenelementanalysen von Grupe (1990) und Siegert (1993) einen erhöhten Fleischkonsum der Altenerdinger Bevölkerung an, Arbeiten von Gügel (1998) und Dittmann (1999) können mittels Microwearuntersuchungen bzw. der Analyse stabiler Stickstoffisotope an Kinderskeleten Anzeichen für einen hohen Anteil vegetabiler Nahrungskomponenten in Wenigumstadt finden. Aktivitätsmusteranalysen von Berger (1994) und Helmuth et al. (1996) zeigen vor allem an Hand degenerativer Skeleterkrankungen eine starke physiologische Belastung beider Bevölkerungen, welche in Wenigumstadt besonders extreme Formen annimmt.

Inwieweit sich histomorphometrische Parameter, Osteoporosestatuswerte und Indexrends mit diesen Beobachtungen und den Ergebnisse medizinischer Studien in Einklang bringen lassen, sollen die folgenden Kapitel klären. Allerdings muss den angestellten Überlegungen ein hypothetischer Charakter zugebilligt werden, ehe sie durch gezielte zusätzliche Untersuchungen, die über den thematischen Rahmen der

vorliegenden Arbeit weit hinausreichen, bestätigt oder widerlegt werden. Die im Folgenden vorgestellten Interpretationsversuche sollen nicht zuletzt einen Überblick geben, wie die entwickelten Verfahren genutzt werden können, um verschiedene Fragestellungen, unter Zuhilfnahme weiterer Methoden der Anthropologie und Archäometrie, zu bearbeiten.

6.1. Vergleich der archäologischen Messdaten mit Ergebnissen medizinischer Untersuchungen

Im Großen und Ganzen stimmen die im Rahmen dieser Arbeit an archäologischem Skeletmaterial erhobenen histomorphometrischen Ergebnisse mit Daten medizinischer Untersuchungen überein, was die potentielle Anwendbarkeit der Methodik unterstützt. In einigen Punkten treten allerdings auch interessante Abweichungen inhaltlicher Natur auf, die in dem folgenden Kapitel diskutiert und interpretiert werden sollen.

6.1.1. Altersabhängige Verläufe histomorphometrischer Parameter

Prinzipiell zeigen die gemessenen Werte aller histomorphometrischen Parameter, die im Zusammenhang mit der strukturellen Qualität bzw. der Dichte des Knochengewebes stehen, vom frühen Erwachsenenalter an einen mehr oder weniger deutlich ausgeprägten Verschlechterungstrend mit steigendem Lebensalter. Die individuelle Variabilität ist bei allen Parametern verschieden, liegt aber allgemein auf relativ hohem Niveau. Einzelne Individuen weichen auffällig stark vom Trend der übrigen Messwerte ab.

Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen zahlreicher Studien an medizinischem und archäologischem Material. Sie belegen, dass altersatrophische und, je nach Auslegung der Definition (vgl. 1.1.1.), osteoporotische Prozesse kein neuzeitliches Phänomen sind, sondern auch in Bevölkerungen des frühen Mittelalters existent waren.

Die beobachteten Parameterverläufe zeigen in beiden Untersuchungskollektiven einen mehr oder weniger linearen Zusammenhang mit dem Lebensalter. Dies gilt sowohl für Männer als auch für Frauen. Auf Grund pathogenetischer Überlegungen und von Ergebnissen histomorphometrischer Studien an medizinischem Material, wird bei Frauen während und nach dem Menopausealter ein beschleunigter Knochenmassenverlust erwartet (Meunier und Courpron 1973, Minne et al. 1986, Ringe 1995). Als ursächlich wird das Absinken des Östrogenspiegels angesehen. Ein entsprechender, steilerer Abfall struktureller Messparameter, gleichsam ein Knick in der Parameterverlaufskurve, konnte bei der Untersuchung der beiden historischen Kollektive allerdings nicht festgestellt werden. Selbst die aus vier Parameterwerten kombinierten Indexwerte zeigen bei den Frauen von Altenerding und Wenigumstadt keinen diesbezüglich auffälligen Kurvenverlauf.

Heutige Fälle postmenopausaler Osteoporose manifestieren sich etwa nach der 5. Lebensdekade zuerst achsenskeletbetont, während die Compacta unverändert bleiben soll (Minne et al. 1986, Delling und Vogel 1992, Ringe 1995). Am archäologischen Material dieser Arbeit zeigt sich weder dieser besonders starke Verlust spongiösen Knochenmaterials am Achsenskelet, noch werden Rippen- oder Femurcompacta im fraglichen Zeitabschnitt von Abbauprozessen verschont.

Eine mögliche Erklärung für diese Diskrepanzen könnte in einer gewissen Überbewertung des Östrogenspiegelabfalls nach der Menopause gesehen werden. Für einen viel erheblicheren Einfluss sozioökonomischer Faktoren spricht, dass die Unterschiede von Frakturaten bei Menschen verschiedener Staaten größer sind, als zwischen Männern und Frauen in den entsprechenden Ländern (Kanis und Pitt 1992).

Andererseits sprechen auch überzeugende Argumente für das tatsächliche Vorhandensein unterschiedlicher Muster knochenatrophischer bzw. osteoporotischer Prozesse bei historischen und modernen Bevölkerungen: So können auch Agarwal und Grynepas (1996) bei der vergleichenden Auswertung wichtiger paläopathologischer Studien zum Thema Knochenabbau keine dem heutigen Verständnis postmenopausaler Osteoporose entsprechenden Abbaumuster finden. Des Weiteren verweisen sie auf die große Seltenheit, mit der osteoporosetypische Frakturen an archäologischem Material auftreten.

Dies trifft auch für das Altenerdinger Untersuchungskollektiv zu. Es finden sich weder Radiusfrakturen noch vollständige Oberschenkelhalsbrüche, obwohl gerade sie wegen zu erwartender Komplikationen und hoher Mortalitätsraten auf dem Gräberfeld zu finden sein müssten.

Spongiosaveränderungen des Femurhalses, die als Resultat lokaler Ermüdungsfrakturen auf Trabekелеbene gedeutet werden können, sind nur bei einem einzigen männlichen Individuum (Grab Nr. 725) anzutreffen, das auch auf Grund seines extrem niedrigen Osteoporosestatus, als schwerst osteoporosekrank betrachtet werden muss (vgl. 6.3.1.). In zwei Fällen (Grab Nr. 1314, 1339) findet man so auffällig deformierte Wirbelkörper, dass man Kompressionsbrüche vermuten kann. Angesichts der Verbreitung schwerer degenerativer Skeleterkrankungen beim Altenerdinger Material, die Helmuth et al. (1996) als Zeichen starker körperlicher Belastungen deutet, müssen sie aber nicht notwendigerweise aus osteoporotischen Prozessen resultieren.

Beim gesamten Material des Wenigumstadter Gräberfeldes konnten nur eine gut verheilte Oberschenkelhalsfraktur (Grab Nr. 248) und zwei Radiusfrakturen (Grab Nr. 115, 211), von denen eine als Parierfraktur zu deuten ist, gefunden werden (Bergner 1994). Wirbelkompressionsbrüche treten nicht auf.

Die geringe Frequenz osteoporosetypischer Frakturen bei historischen Bevölkerungen alleine mit einer geringeren Lebenserwartung in früherer Zeit erklären zu wollen, scheint zu einfach. Wie die Sterbealtersbestimmungen an der frühmittelalterlichen Skeletserie von Wenigumstadt mit der Zahnwurzelzementmethode zeigen konnten, wurde ein hohes Lebensalter in historischen Populationen viel öfter erreicht, als bisher angenommen (Cipriano-Bechtle 1994, Cipriano-Bechtle et al. 1996). Auch Turban-Just (1993) stellt bei der Anwendung dieser Methode auf Altenerdinger Individuen fest, dass gerade Individuen höherer Altersklassen mit morphologischen Methoden tendenziell zu jung geschätzt werden. Eigene Erfahrungen bezüglich der Altersbestimmung des Altenerdinger Untersuchungskollektivs können diese Einschätzung bestätigen.

6.1.2. Trabekuläres Knochenvolumen im Beckenkamm

Ein direkter Vergleich des trabekulären Knochenvolumens im Beckenkamm archäologischer Skelete mit medizinischen Referenzdaten bietet sich an, weil die untersuchten Lokalitäten praktisch identisch sind. Ein Umrechnungsfaktor berücksichtigt methodische Unterschiede (vgl. 4.3.1). Der Vergleich mit zwei medizinischen Studien zeigt folgende Tendenz: Das trabekuläre Knochenvolumen der beiden frühmittelalterlichen Kollektive startet gegenüber heutigen Probanden auf höherem Niveau, um dann um so steiler abzufallen. Besonders deutlich ist dieser Trend für das Altenerdinger Kollektiv ausgeprägt. Auch das Wenigumstadter Material zeigt diese Tendenz, liegt dabei aber näher am Verlauf der medizinischen Daten. Frauen sind stärker betroffen als Männer (vgl. 4.3.2).

Völlig unproblematisch ist ein derartiger Vergleich jedoch nicht: Betrachtet wird nur ein histomorphometrischer Parameter, dessen individuelle Variabilität uneingeschränkt zum Tragen kommt. Unter diesem Aspekt ist auch der nicht sachlogisch interpretierbare Knick des Kurvenverlaufs im Bereich der 7. Altersdekade beim Wenigumstadter Material (Vergleich mit Studie 1, Merz und Schenk 1970) zu sehen, der wohl als Stichprobenartefakt gewertet werden muss. Unterschiedliche Konzeptionen der Studien, vor allem verschiedene Altersverteilungen und die Miterfassung des Osteoidvolumens bei medizinischen Untersuchungen schränken die Vergleichbarkeit etwas ein. Andererseits sind die Ergebnisse beider Gegenüberstellungen beinahe deckungsgleich, was für deren Relevanz spricht.

Die bessere Ausgangslage der historischen Kollektive beruht mit Sicherheit nicht auf Dekompositionsartefakten, da erfahrungsgemäß Knochenmassen während der Bodenlagerung eher reduziert als vermehrt wird.

Sie ist im Sinne des Erreichens einer höheren peak bone mass zu interpretieren. Als wahrscheinlichste Ursache für ihre Entstehung darf die Wirksamkeit einer gegenüber heute vermehrten physischen Aktivität während der ontogenetischen Wachstumsphase angenommen werden. In diesem Lebensabschnitt mit einer positiven Knochenumbau Bilanz kann stärkere Belastung des sich entwickelnden Skelettsystems einen maximalen Einfluss auf die gebildete Knochenmasse nehmen. Viele Studien lassen allgemeine Zusammenhänge zwischen körperlicher Aktivität und verbessertem Knochenstatus erkennen (z.B. Joakimsen et al. 1997, Jonsson et al. 1992). Mosekilde et al. (1994) gelang es sogar, einen entsprechenden Einfluss auf die peak bone mass im Tierversuch zu reproduzieren. Aktivitätsmusteranalysen an der Wenigumstadter (Bergner 1994) und der Altenerdinger (Helmuth et al. 1996) Skeletserie belegen anhand der Verbreitung degenerativer Skeleterkrankungen, Traumata und Pathologien, eine hohe körperliche Belastung beider frühmittelalterlicher Bevölkerungen. Obwohl sich gerade degenerative Veränderungen überwiegend erst ab dem Erwachsenenalter am Skelet manifestieren, muss angenommen werden, dass sie während eines längeren Prozesses erworben wurden und dass juvenile bzw. frühadulte Individuen innerhalb frühmittelalterlicher Gesellschaften ebenfalls regelmäßig schwerer körperlicher Arbeit ausgesetzt waren.

Einen etwas steileren Abfall der Knochenmasse bei merowingerzeitlichen Skeleten aus Bockenheim, im Vergleich zu rezentem Material, konnte auch Hammerl (1996) für 37 weibliche Individuen im Rahmen radiologischer osteodensitometrischer Un-

tersuchungen beobachten. Sie interpretiert diesen Unterschied als Konsequenz der Verwendung von Ovulationshemmern, die bei Frauen heutiger Bevölkerungen zu einer hormonell unterstützten Anhebung der Knochenmineraldichte führen könnten. Tatsächlich zeigt die Gegenüberstellung der Wenigumstadter bzw. Altenerdinger Messergebnisse und Studie 2 (Hahn et al. 1992), dass der steilere Abfall der Beckenwerte bei Frauen deutlich stärker ausgeprägt ist als bei Männern. Dennoch ist er auch bei letzteren klar erkennbar. Diese Tatsache und die dramatische Geschwindigkeit, mit der Altenerdinger Individuen ihre im frühen Erwachsenenalter so günstige Ausgangslage bezüglich des trabekulären Knochenvolumens abbauen, legt eine maßgebliche ursächliche Beteiligung anderer Faktoren nahe.

Als ein wichtiger Osteoporoserisikofaktor gilt phosphatreiche Ernährung die, abgesehen von phosphathaltigen Getränken (Cola-Getränke) unserer Zeit, vor allem aus einem erhöhten Fleischkonsum resultiert (Minne et al. 1986, Schulz und Manns 1992, Ringe 1995). Der genaue Wirkmechanismus dieses Risikofaktors ist bislang unbekannt (Schulz und Manns 1992). Ganz allgemein dürfte er jedoch, vor allem in einer Phase negativer Knochenumbaubilanz, über eine reduzierte Kalziumverfügbarkeit, unter maßgeblicher Beteiligung einer verminderten intestinalen Resorption, zu einem erhöhtem Knochenabbau beitragen.

Spurenelementanalysen an Altenerdinger Skeleten konnten auffällig niedrige Sr/Ca-Quotienten belegen (Grupe 1990, Siegert 1993), die von beiden Autoren als Hinweise auf eine ausgesprochen protein- und fleischreiche Kost gedeutet wurden. Mittlerweile hat sich allerdings der unterschiedliche Mineralgehalt der Nahrungskomponenten als eine wesentliche, bislang unterschätzte Einflussgröße auf das Sr/Ca-Verhältnis des Knochens herausgestellt (Burton und Wright 1995, Grupe 1998). Diese Erkenntnis steht nicht im Widerspruch zur Interpretation des niedrigen Sr/Ca-Quotienten als Konsequenz einer fleischreichen Ernährungsweise. Allerdings wären auch andere Erklärungen denkbar. So weisen Burton und Wright (1995) darauf hin, dass sich z.B. eine getreidereiche Nahrung, mit großem Sr/Ca-Verhältnis, auf Grund ihres geringen Mineralgehalts nicht so wesentlich auf das Sr/Ca-Verhältnis des Knochens niederschlägt, wie man bei ausschließlichen Getreidekonsum erwarten würde. Bereits ein kleinerer Anteil strontiumarmer aber mineralreicher (z.B. Fleisch) Nahrung kann die Spurenelementsignatur einer getreidereichen Kost überdecken und fälschlicherweise als hoher Fleischkonsum interpretiert werden.

Allerdings ist zu bedenken, dass der Körper bei überwiegend mineralarmer, getreidehaltiger Ernährung die Resorption von Kalzium und damit in abgeschwächter Form auch von Strontium steigern kann. Somit könnte sich die entsprechende Spurenelementsignatur dennoch, zumindest teilweise, im Knochen niederschlagen. Schwierigkeiten darf angesichts der am Altenerdinger Material gemessenen Sr/Ca-Quotienten ein gewisser Fleischkonsum postuliert werden. Ob er tatsächlich ein besonders hohes Ausmaß erreichte, oder ob nur andere mineralarme Nahrungskomponenten verdeckt wurden, ist alleine am Sr/Ca-Verhältnis im Knochen nicht mehr zu entscheiden. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit unterstützen eher die Annahme eines erhöhten Fleischanteils in der Nahrung der Altenerdinger Bevölkerung im Vergleich zu Wenigumstadt.

6.2. Vergleich der Indexrends beim Wenigumstadter und Altenerdinger Kollektiv

Die histomorphometrischen Indexwerte berücksichtigen gleichzeitig die Informationen vierer Messparameter von unterschiedlichen Skeletelementen und steigern so die Zuverlässigkeit ihrer Aussagekraft gegenüber der Betrachtung einzelner Parameter. Ein Vergleich ihrer Trendverläufe auf Bevölkerungsebene erfordert methodische Konvergenz der Parametermessungen und ihre kollektivübergreifende Standardisierung (vgl. 3.11.). Vergleichbare medizinische Referenzdaten stehen nicht zur Verfügung.

Es bestätigen sich die Beobachtungen, die bereits bei der Analyse des trabekulären Knochenvolumens im Beckenkamm gemacht wurden: Gegenüber der Wenigumstadter Bevölkerung scheint die Ausgangslage bezüglich des Knochenstatus, ausgedrückt durch die Indexwerte, beim Altenerdinger Kollektiv etwas verbessert. Sie verschlechtert sich aber so drastisch, dass in höheren Altersklassen die Indexwerte des Wenigumstadter Kollektivs von denen des Altenerdinger deutlich unterschritten werden. Ähnlich wie beim Vergleich der Beckenwerte mit medizinischen Daten sind entsprechende Tendenzen im weiblichen Geschlecht etwas stärker ausgeprägt.

Obwohl die Regressionsanalysen der Indexwerte, nicht zuletzt wegen der geringen Probandenzahl, keine signifikanten Unterschiede zeigen, können die festgestellten Beobachtungen nicht als Zufall gewertet werden, da sowohl einzelne als auch die vier im Index zusammengefassten Parameter übereinstimmend die festgestellten Trendverläufe zeigen. Diese Tatsache bleibt durch den angewandten statistischen Test unberücksichtigt.

Nach 6.1.2. könnte zum steilen Abfall der Altenerdinger Indexwerte ein erhöhter Fleisch- bzw. Phosphatkonsum beigetragen haben. Warum atrophische Tendenzen bei der Wenigumstadter Bevölkerung geringer ausgeprägt sind, kann, ohne weitere gezielte Untersuchungen zur Ernährungsrekonstruktion auf der Basis von Spurenelementanalyse und stabilen Stickstoffisotopen, nur hypothetisch beantwortet werden.

Ein Hinweis, dass hier ebenfalls Ernährungsgewohnheiten für den verlangsamten Knochenabbau mitverantwortlich sein könnten, liefert Gügel (1998), indem sie auf Grund von Microwearuntersuchungen an Wenigumstadter Zähnen feststellt, dass der Konsum von grob geschrotetem Getreide in Wenigumstadt einen großen Beitrag zur Ernährung geleistet hat. Aus diesem Ergebnis und den Anzeichen für extrem schwere körperliche Arbeit, bei gleichzeitiger Abwesenheit typischer Kriegsverletzungen, nach den Untersuchungen von Bergner (1994), schließt Dittmann (1999) auf ackerbauliche Produkte als primäre Ernährungsgrundlage der Wenigumstadter Bevölkerung. Auch lassen ihre Ergebnisse bezüglich einer Stickstoffisotopenanalyse einen geringen Fleischanteil in der Nahrung erkennen.

Diese Einschätzung scheint absolut plausibel, zumal die Wenigumstadt umgebende Landschaft für Ackerbau geradezu prädestiniert ist. Günstige klimatische Bedingungen und fruchtbare Lössüberdeckungen führen im sog. Bachgau seit dem Neolithikum zu einer intensiv genutzten und dicht besiedelten Kulturlandschaft (Stauch, in Vorbereitung). Mit Beginn der dörflichen Siedlungsweise war eine unter ökologisch-energetischen Gesichtspunkten kostengünstige Fleischversorgung nur gegeben, wenn

große Flächen von Weide und Wald für extensive Viehwirtschaft zur Verfügung standen (Grupe 1990). Eine solche Situation kann eher für Altenerding postuliert werden, wo neben den fruchtbaren Böden im weiten Sempttal (Sage 1974, 1984), westlich gelegene Ausläufer des Erdinger Mooses große, für den Ackerbau im Frühmittelalter weniger geeignete Flächen bildeten. Ist der Boden wertvoll und die Landschaft weniger weiträumig, wie im Bachgau, so stellt der Anbau von Feldfrüchten aufgrund der Verkürzung der Nahrungskette auf jeden Fall den kostengünstigeren Weg zur Kalorierzeugung dar (Grupe 1990). Für eine stärkere Belastung der Wenigumstadter Bevölkerung durch ackerbauliche Tätigkeiten spricht auch die deutlich größere Häufigkeit, mit der Bergner (1994) degenerative Erkrankungen der Gelenke und der Wirbelsäule, im Vergleich mit entsprechenden Befunden am Altenerdinger Material (Helmuth et al. 1996), feststellen konnte.

Die Annahme eines erhöhten Fleischkonsums scheint für die Menschen von Wenigumstadt eher unwahrscheinlich. Dafür bieten hier Geographie und klimatische Bedingungen ideale Voraussetzungen für eine Ernährung mit stärkerem Gewicht vegetarischer Komponenten.

Erst kürzlich konnte im Tierversuch gezeigt werden, dass der Konsum verschiedener Gemüsesorten zu einer Erhöhung der Knochenmasse durch Hemmung von Resorptionsprozessen führt (Mühlbauer und Li 1999). Solche knochenprotektive Wirkungen und der mögliche Wegfall eines Osteoporoserisikofaktors durch erhöhten Fleischkonsum können zu einem geringeren Knochenabbau bei der Wenigumstadter Bevölkerung im Vergleich zum Altenerdinger Untersuchungskollektiv beigetragen haben.

Das hier aufgestellte Szenario bleibt allerdings so lange hypothetisch, bis es weiterführende Untersuchungen zur Ernährungsrekonstruktion, vor allem an der Wenigumstadter Skeletserie, verifizieren oder widerlegen.

6.3. Interpretation der Osteoporosestatuswerte

Der Osteoporosestatus stellt einen Kennwert der Osteoporoseprädisposition auf der Individuenebene eines Untersuchungskollektivs dar (vgl. 5.7.). Er dient weniger zur Diagnose klinisch manifester Osteoporose bzw. zur Festlegung des Frakturrisikos, sondern zur Bewertung, wie stark und in welcher Richtung Individuen der verschiedensten Altersklassen vom altersspezifischen Sollwert des histomorphometrischen Index abweichen. Negative Werte signalisieren einen mehr oder weniger starken Einfluss pathologischer bzw. osteoporotischer Veränderungen, welche zum physiologischen altersspezifischen Knochenabbau beitragen.

Der Osteoporosestatus differenziert durch sein Vorzeichen kollektivintern zwischen Individuen die eher osteoporotische Tendenzen zeigen (negative Werte) und solchen, die einen mehr oder weniger überdurchschnittlichen Knochenstatus aufweisen (positive Werte).

6.3.1. Individuen mit auffälligen Osteoporosestatuswerten

Auffällig niedrige Osteoporosestatuswerte, besonders bei Individuen fortgeschrittenen Alters, deuten auf klinisch manifeste osteoporotische Erkrankungen und ein stark gestiegenes Frakturrisiko hin. Skelet- und Röntgenbefund müssen zu einer differentialdiagnostischen Abklärung der Situation herangezogen werden.

Folgende Einzelfälle fielen im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen durch besonders niedrige Osteoporosestatuswerte auf: Wenigumstadt Grab Nr. 86 und 131, Altenerding Grab Nr. 725 und 1090. Ihre Knochenstruktur ist gegenüber der jeweiligen Altersnorm deutlich verschlechtert und unterschreitet sie in allen Fällen um mehr als zwei Standardabweichungen. Entsprechend einer Definitionsauslegung, die das Vorliegen einer Osteoporoseerkrankung nicht zwingend an eingetretene Frakturereignisse bindet (vgl. 1.1.), haben bei ihnen osteoporotische Prozesse zu einem das physiologische Maß weit übersteigenden Knochenabbau beigetragen. Eine Gegenüberstellung ihrer Werte für das trabekuläre Knochenvolumen im Becken (vgl. 4.3.2.) und medizinischer Referenzdaten von schwer osteoporosekranken Frauen mit bereits eingetretenen Frakturereignissen zeigt, dass diese vier Individuen, bei allen Vergleichsschwierigkeiten, größenordnungsmäßig in den Bereich der rezenten Osteoporosepatientinnen fallen.

Abgesehen von diesen vier Einzelfällen zeigen auch andere Individuen der Untersuchungskollektive niedrige Osteoporosestatuswerte. Ob man sie als osteoporosekrank diagnostiziert oder lediglich ihre mehr oder weniger unphysiologisch reduzierte Knochenmasse als Osteopenie bezeichnet, ist eine Frage von Grenzwertdiskussionen. Da das Osteoporosestatuskonzept primär anderen Fragestellungen dient, werden im Folgenden lediglich die vier Extremfälle exemplarisch vorgestellt.

Wenigumstadt Grab Nr. 86

Der Skeletbefund einer 54jährig verstorbenen Frau zeigt ein auffällig geringes Gewicht der großen Röhrenknochen bei gleichzeitig gutem Erhaltungszustand. Allein dies ist kein Beweis für das Vorliegen einer Osteoporose, weil Dekompositionseffekte zu ähnlichen Erscheinungen führen können. Eine Reduzierung der Knochenmasse ist allerdings bereits im Röntgenbefund der Femurdiaphyse zu erkennen, was frühestens nach einem Materialverlust von 30-40% möglich wird (Kalender 1992).

Der niedrige Osteoporosestatus und der radiologische Befund sprechen deutlich für das Vorliegen einer Osteoporose. Unter Berücksichtigung des Sterbealters von 54 Jahren scheint die Vermutung, dass es sich bei dieser Frau um den typischen Fall einer postmenopausalen Osteoporose handelt, gut begründet.

Wenigumstadt Grab Nr. 131

Der Röntgenbefund dieser 41 Jahre alten Frau zeigt deutliche Leitsymptome einer hochgradigen Osteoporose: Längsstreifung der Wirbelkörperspongiosa durch bevorzugte Reduktion horizontaler und gleichzeitige Verstärkung verbliebener vertikaler Trabekel (hypertrophe Atrophie); bilderrahmenartiges Hervortreten der Wirbelkörpercorticalis (framing) mit zunehmender Trabekelrarefizierung (Schild und Heller

1992); Längsstreifung der Femurcompacta durch stark erweiterte Kanalstrukturen (Hopf und Reichel 1992).

Der Skeletbefund weist allerdings deutliche Biegedeformationen an großen Röhrenknochen auf, wovon vor allem die Femora betroffen sind. Eine entsprechende Beobachtung ist charakteristisch für schwere Fälle von Osteomalazie (Aufderheide und Rodríguez-Martín 1998). Im Rahmen dieser Erkrankungen kommt es zu einer Störung der Mineralisation organischer Osteoidmatrix während des Knochenumbaus. Neugebildete Knochensubstanz besitzt kaum mechanische Festigkeit. In schweren Fällen resultieren als Folge einer Knochenerweichung Deformationen. An archäologischem Skeletmaterial hinterlässt die Osteomalazie nach dem dekompositionsbedingten Abbau der Osteoidmatrix während der Liegezeit im Boden radiologische und histomorphometrische Leitsymptome einer Osteoporose. Parfitt (1973) weist auf die Probleme hin, die sich selbst bei der histomorphometrischen Differentialdiagnose der Osteomalazie an medizinischem Material ergeben, wo die hypertrophen Osteoidsäume noch erkennbar wären. Schwächer ausgeprägte Krankheitsfälle, ohne typische Knochendeformationen, sind an paläopathologischem Material nicht von einer Osteoporose zu unterscheiden (Aufderheide und Rodríguez-Martín 1998).

Im Gegensatz zu den primären Osteoporoseformen lässt sich die Osteomalazie in der Regel auf eine definierbare Ursache zurückführen. Klinisch von Bedeutung sind vor allem Vitamin-D-Mangel, D-Hormonstoffwechselstörungen und renale tubuläre Funktionsstörungen (Kruse und Kuhlencordt 1984). Ein Vitamin-D-Mangel durch fehlende UV-Exposition kann für die Wenigumstadter Bevölkerung, angesichts der agrarisch ausgerichteten Lebensweise, ausgeschlossen werden, zumal keine weiteren Individuen des Untersuchungskollektivs betroffen sind. Selbst wenn man für die betroffene Frau eine spezielle Tätigkeit mit geringer Sonnenexposition postulieren wollte, so hätte der Verzehr getreidereicher Kost einen entsprechenden Mangel kompensiert (Cook et al. 1988). Als gängige Ursache der Erkrankung - möchte man seltenere hereditäre und spezielle Formen ausschließen - kommen vor allem gastrointestinale Malabsorption, Phosphatdiabetes und D-Hormonstoffwechselstörungen durch chronische Niereninsuffizienz in Frage. Aus solchen intestinalen und renalen Störungen resultieren sehr häufig Mischformen von Osteomalazie und Osteoporose (Matzen und Fleißner 1980, Kruse Kuhlencordt 1984, Ringe 1995).

Ob es sich bei der Erkrankung der Wenigumstadter Frau um eine solche Mischform oder reine Osteomalazie handelt, kann an bodengelagertem Skeletmaterial nicht mehr geklärt werden. Alle Befunde deuten aber darauf hin, dass es sich hier nicht um eine primäre Osteoporoseform handelt, sondern dass eine definierbare Krankheitsursache vorgelegen haben muss.

Altnerding Grab Nr. 725

Zusammen mit den typischen Osteoporoseleitsymptomen des Röntgenbildes (vgl. 4.2.4.), unterstützt der Skeletbefund dieses 68jährigen Mannes zweifelsfrei die Interpretation der niedrigen Osteoporosestatuswerte im Sinne des Vorliegens einer klinisch manifesten Osteoporose. Wichtig sind vor allem die charakteristischen, bereits als Folge dieser Krankheit eingetretenen Wirbelkompressionsfrakturen. Zusammen mit den ermüdungsbedingten Mikrofrakturen der Oberschenkelhalsspongiosa und angesichts des fortgeschrittenen Sterbealters, sprechen sie für eine Interpretation dieses Falles als senile Osteoporose. Kennzeichen dieser Krankheitsform sind ein spätes Manifestationsalter, etwa ab dem 70. Lebensjahr, und das gehäufte Auftreten

von Oberschenkelhalsfrakturen in Folge mechanischer Insuffizienz der Knochenstruktur (Schulz und Manns 1992, Ringe 1995).

Altenerding Grab Nr. 1090

Dieser 41jährige Mann fällt vor allem durch seinen sehr niedrigen Osteoporosestatuswert auf. Skelet- und Röntgenbefund lassen noch keine deutlich ausgeprägten Anzeichen einer Osteoporose erkennen. Dafür hat eine dislozierte Doppelfraktur (vgl. 4.2.4.) des linken Unterschenkels mit Sicherheit zu Komplikationen geführt. Zeugnis davon geben die typischen Anzeichen einer massiven Periostitis, die als häufige Konsequenz komplizierter Brüche an archäologischem Skeletmaterial beobachtet werden kann (Aufderheide und Rodríguez-Martín 1998). Inwieweit sich Infektionen auch in die Markhöhle erstrecken und damit eine Osteomyelitis hinzutritt, konnte nicht geklärt werden. Damit verbundene Schmerzen und Störungen des Heilungsprozesses hatten für das betroffene Individuum mit Sicherheit eine längere Bettlägrigkeit zur Folge. Wegen der deutlichen Erhaltung der Porositäten und Kanalstrukturen ist sehr fraglich, ob die entzündlichen Prozesse zum Stillstand kamen und die Person vor ihrem Tode ihre Mobilität zurückerlangte.

Angesichts dieser Überlegungen und des mittleren Alters muss der auffällig niedrige Osteoporosestatuswert im Sinne einer sog. Immobilisationsosteoporose interpretiert werden.

6.3.2. Sozialstratigraphie und Osteoporosestatus

Die Ergebnisse eines Vergleichs der Osteoporosestatusmittelwerte von gesichert wohlhabenden Individuen mit Bestattungen, für die eine überwiegend ärmere Beigabensituation angenommen werden muss, zeigt Differenzen, die einer Interpretation bedürfen. Ihre Deutung muss allerdings eher als Hypothese, denn als Faktum verstanden werden. Beeinträchtigung durch Grabraub und die Frage, ob die Beigabenausstattung tatsächlich immer den sozialen Stand eines Toten in der Gesellschaft zu Lebzeiten reflektieren, demonstrieren, mit welchen Unsicherheitsfaktoren unter anderen zu rechnen ist.

Gräberfeld Wenigumstadt

Die Gruppe der gesichert wohlhabenden Individuen hebt sich vom Vergleichskollektiv durch einen signifikant niedrigeren Osteoporosestatuswert ab. Das bedeutet, ein überdurchschnittlicher Sozialstatus ist in Wenigumstadt mit einer erhöhten Prädisposition für osteoporotische Prozesse verbunden. Unter der Annahme, dass dieses Ergebnis auf sozialgruppenspezifischen Unterschieden in der Lebensweise beruht, ist folgende Interpretation plausibel: Schließt man sich der Argumentation für einen hohen Anteil an vegetarischen Agrarprodukten am Nahrungsangebot der Wenigumstadter Bevölkerung an (vgl. 6.2.), so darf vermutet werden, dass ein erhöhter Fleischkonsum vor allem sozial besser gestellten Familien möglich war. Gleichzeitig kann man einen geringeren physischen Einsatz der wohlhabenderen Gesellschaftsschichten an der täglichen Existenzsicherung in Form ackerbaulicher Tätigkeiten annehmen. Ein gesteigerter Phosphatanteil der Nahrung als Folge erhöhten Fleisch-

konsums und eine verminderte physische Aktivität sind Risikofaktoren osteoporotischer Erkrankungen (Minne et al. 1986, Schulz und Manns 1992, Ringe 1995). Ihre etwas stärkere Ausprägung bei wohlhabenderen Schichten als Folge einer sozialgruppenspezifischen Lebensweise, könnte hier bereits zu einer statistisch erhöhten Osteoporoseprädisposition beigetragen haben, die sich in Form der Mittelwertsdifferenzen beim Osteoporosestatus niederschlägt.

Weitere sozialgruppenspezifische Untersuchungen von Spurenelementen und stabilen Stickstoffisotopen am Wenigumstadter Material müssen klären, ob die aufgestellten Vermutungen verifiziert werden können.

Gräberfeld Altenerding

Auch beim Altenerdinger Gräberfeld treten Mittelwertdifferenzen des Osteoporosestatus bei überdurchschnittlich wohlhabenden Individuen und einer beigabenärmeren Vergleichsgruppe auf. Der Unterschied ist allerdings relativ gering und statistisch nicht ausreichend abgesichert. Verglichen mit der Wenigumstadter Situation deutet sich eher ein umgekehrtes Bild an. Tendenziell zeigen die wohlhabenderen Bestattungen etwas höhere Osteoporosestatuswerte als die restliche Bevölkerung.

Unabhängig davon, welche tatsächlichen Ernährungsgewohnheiten den niedrigen, von Grupe (1990) und Siegert (1993) gemessenen Sr/Ca-Quotienten zu Grunde gelegt werden müssen, offenbaren auch diese Messgrößen keine deutliche sozialgruppenspezifische Abstufung für das Altenerdinger Material. In einem sozialstratigraphischen Vergleich findet Grupe (1990) allenfalls graduelle Unterschiede, Siegert (1993) spricht von einer insgesamt einheitlichen Situation. Vor diesem Hintergrund soll der geringe Unterschied im Osteoporosestatusmittelwert bei wohlhabenden Altenerdingern und der Vergleichsgruppe nicht überinterpretiert werden. Zusammengenommen deuten die Befunde viel eher an, dass es möglicherweise nur geringe sozialgruppenspezifische Unterschiede in der Lebensweise, zumindest bezüglich potenzieller Osteoporoserisikofaktoren, bei der Altenerdinger Bevölkerung gegeben hat.

Möchte man die beiden Individuen Wenigumstadt Nr. 131 und Altenerding Nr. 1090, gemäß Kapitel 6.3.2. als sekundäre Osteoporosefälle interpretieren, so muss angenommen werden, dass Risikofaktoren allenfalls zu ihren niedrigen Osteoporosestatuswerten beigetragen haben, aber nicht die Hauptursache waren. In diesem Fall scheint ihr Ausschluss von sozialgruppenspezifischen Vergleichsuntersuchungen, die auf eine Risikofaktorenermittlung abzielen, sinnvoll. Eine Überprüfung dieser Auswertungsvariante zeigt allerdings, dass daraus keine relevanten Änderungen der beschriebenen Tendenzen resultieren.

6.3.3. Gräberchronologie und Osteoporosestatus

Ein Vergleich von Gruppen mit unterschiedlicher Bestattungschronologie konnte für beide Gräberfelder eine signifikante Verbesserung der Osteoporosestatusmittelwerte, jeweils vom Beginn ihrer Belegungsphase bis zu ihrem Ende, nachweisen. Einschränkungen der Aussagemöglichkeiten ergeben sich auch hier vor allem durch die Aktivitäten von Grabräubern, die eine zuverlässige Datierung der Gräber erschweren oder verhindern, so dass bei Weitem nicht alle Gräber, für die sich ein Osteoporosestatuswert berechnen ließ, berücksichtigt werden konnten.

Gräberfeld Wenigumstadt

In der Chronologie des Wenigumstadter Gräberfeldes kommt es durch die Belegungsunterbrechung (vgl. 2.), in der ersten Hälfte des 6. Jahrhunderts, zu einer "natürlichen" Gruppenbildung. Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen zeigen, dass sich die Osteoporosestatuswerte der Bestattungen des 7. und 8. Jahrhunderts im Mittel signifikant gegenüber denen der völkerwanderungszeitlichen Belegungsphase ab der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts verbessert haben. Leider konnten dekompositionsbedingt keine Individuen der zweiten Hälfte des 6. Jahrhunderts, unmittelbar nach der Belegungsunterbrechung, histomorphometrisch ausgewertet werden.

Die niedrigen Osteoporosestatuswerte der "Gründerphase" in der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts könnten ein Indiz für widrigere Lebensumstände gegenüber der Merowingerzeit darstellen. Die Bevölkerung der Siedlungsgemeinschaft befand sich noch in einer Aufbauphase. Verglichen mit späteren Zeiten war sie zahlenmäßig relativ schwach (Stauch, in Vorbereitung). Roosevelt (1984) schätzt Knochenabbauphänomene als nützliche Marker für physiologischen Stress ein. Bedingt wird er bei agrarisch ausgerichteten Bevölkerungen durch ein rückgekoppeltes Wechselspiel zwischen Mangelernährung und erhöhter Krankheitsanfälligkeit. Das soll jedoch nicht heißen, die völkerwanderungszeitlichen Siedlungsgemeinschaft sei von chronischen Hungersnöten und Epidemien geplagt worden. Allerdings wäre denkbar, dass es im Zuge der Etablierung und Ausweitung ackerbaulicher Tätigkeiten immer wieder zu Rückschlägen und Engpässen kam. Von solchen Ereignissen mögen die Mitglieder der kleinen, relativ jungen Siedlungsgemeinschaft stärker getroffen worden sein als die der größeren, seit vielen Generationen bestehenden frühmittelalterlichen Gesellschaft von Wenigumstadt im 7. und 8. Jahrhundert. Gerade in diesem Zusammenhang hätte eine Untersuchung der "Neusiedler" aus der zweiten Hälfte des 6. Jahrhunderts die Frage beantworten können, ob auch sie ähnliche Phänomene zeigen, wie die "Gründergeneration" des ausgehenden 5. Jahrhunderts.

Gräberfeld Altenerding

Für Altenerding ergibt sich ein ähnliches Bild, wenn auch hier von einer kontinuierlichen Belegung des Gräberfeldes und der unterbrechungsfreien Existenz der zugehörigen Siedlung ausgegangen werden kann. Da mittels der verfügbaren Angaben zur Gräberchronologie (Helmuth et al. 1996) nur drei Gräber des Untersuchungskollektivs dem 5. Jahrhundert zugeordnet werden konnten, wurden diese zusammen mit Bestattungen des 6. Jahrhunderts dem 7. Jahrhundert gegenübergestellt. Interpretiert man auch hier die signifikante Verbesserung des Osteoporosestatus in der späteren Belegungsphase als Folge allgemein verbesserter Lebensbedingungen, so steht diese Deutung im Einklang mit paläopathologischen Befunden. So konnte Helmuth (Helmuth et al. 1996) im fraglichen Zeitraum einen Rückgang degenerativer Erkrankungen der Gelenke und der Wirbelsäule sowie eine Abnahme der Frakturhäufigkeit feststellen. Auch hier mag die längerfristige Etablierung einer Siedlungsgemeinschaft durch tradierte Erfahrungen und gefestigte Strukturen zu einer Verbesserung der Existenzsicherung beigetragen haben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen und berechneten Daten sinnvoll mit Ergebnissen früherer Studien an der Wenigumstadter und Altenerdinger Skeletserie ergänzen. Gezielte weiterführende Untersuchungen mit anthropologischen und archäometrischen Methoden können zukünftig klären, inwieweit sich Zusammenhänge zwischen individuellen Osteoporosestatuswerten beider Untersuchungskollektive und rekonstruierten Lifestylefaktoren ableiten lassen.

Die entwickelten Verfahrensweisen können einen Beitrag dazu leisten, das große Informationspotential archäologischer Skelettserien hinsichtlich osteoporotischer Erkrankungen für anthropologische, geschichtswissenschaftliche und medizinische Fragestellungen zu erschließen. Dabei sind Aussagen auf Individuen- und Bevölkerungsebene möglich. Die Epidemiologie dieser aktuellen "Volkskrankheit" kann dadurch auch in ihrer zeitlichen Tiefe erfasst werden.

7. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung geeigneter Vorgehensweisen zum Aufspüren und Vergleichen osteoporotischer Prädispositionen auf Individuen- und Kollektivebene frühmittelalterlicher Skeletserien, mit histomorphometrischen Techniken. Ein Untersuchungskollektiv, bestehend aus 67 erwachsenen Individuen des Reihengräberfeldes von Wenigumstadt diente zur Entwicklung einer standardisierten Verfahrensweise, die schließlich auf 82 Skelete des frühmittelalterlichen Gräberfeldes von Altenerding angewendet werden konnte.

Der Einsatz einer Altersbestimmungsmethode, die auf jahresperiodisch angelegte Zuwachsringe im Zahnwurzelzement zurückgreift, ermöglichte erstmalig Untersuchungen zu osteoporotischen Prozessen an archäologischen Skeleten mit gut bekanntem Sterbealter und damit das zuverlässige Erfassen knochenatrophischer Alterstrends.

Histomorphometrisch untersucht wurden Knochenproben aus Lendenwirbelkörper, Beckenkamm, Rippen und der Oberschenkelknochendiaphyse. Durch Anwendung spezieller Entnahmetechniken konnte trotz der invasiven Probengewinnung, die morphologische Struktur der beprobten Skeletelemente weitgehend erhalten werden. Um eine Vergleichbarkeit der histomorphometrischen Messdaten zu sichern wurde bezüglich Probenentnahme, Reinigung, Färbung, Herstellung und Auswertung der histologischen Präparate, eine für die Bearbeitung aller Skelete standardisierte Verfahrensweise entwickelt. Dabei musste besonders dem durch Bodenlagerung und Dekompositionsprozesse beeinträchtigten Erhaltungszustand des Materials Rechnung getragen werden.

Digitale Mikrofotografie und der Einsatz von Scantechniken zur Präparateerfassung, ermöglichten eine computerunterstützte Auswertung. Durch den Einsatz spezieller Macroprogramme unter dem Bildanalyseprogramm NIH-IMAGE konnte die histomorphometrische Analyse der histologischen Präparate weitgehend automatisiert werden.

Mit zwei unterschiedlichen Verfahren wurden geeignete Umrechnungsfaktoren ermittelt, die einen direkten Vergleich von am Beckenkamm archäologischer Skelete gemessener Parameter mit medizinischen Referenzdaten ermöglichte.

Zentrale Idee dieser Arbeit war die Kombination der Informationen mehrerer histomorphometrischer Messparameter verschiedener Skeletelemente eines Individuums zu einem Indexwert. Auf diese Weise ließ sich die hohe individuelle Variabilität der Parameter nivellieren. Gemäß den Erfahrungen mit beiden Untersuchungskollektiven erschienen folgende vier Parameter besonders für die Indexbildung geeignet: Porosität der Femurcompacta, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Beckenkamm, Trabekelfläche pro Untersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper und Rippenmaterialerfüllungsgrad. Sie besitzen im relevanten Altersabschnitt eine deutliche und statistisch gesicherte Korrelation mit dem Lebensalter und zeichnen sich durch eine gewisse Robustizität gegenüber liegezeitlich bedingten Dekompositions-

phänomenen aus. Somit wird gewährleistet, dass knochenatrophische Prozesse, physiologischer oder pathologischer Natur, erfasst werden können und das Verfahren auf möglichst viele Individuen potenzieller Untersuchungskollektive mit durchschnittlichem Erhaltungszustand anwendbar ist.

Dank einer speziellen Standardisierung der an der Indexbildung beteiligten Parameter ist es möglich, die Indexwerte verschiedener Untersuchungskollektive direkt miteinander zu vergleichen.

Der sog. Osteoporosestatus quantifiziert, wie weit und in welcher Richtung ein Individuum vom alters- und geschlechtsspezifischen Trend der Indexwerte im Untersuchungskollektiv abweicht. Somit ermöglicht er auf jeder Altersstufe eine Aussage zum Vorliegen osteoporotischer Tendenzen bei einzelnen Individuen. Der Osteoporosestatus ist kein diagnostisches Werkzeug zum Erkennen von Fällen progredienter, klinisch manifester Osteoporose in archäologischen Skelettkollektiven, sondern eine auf die Voraussetzungen bodengelagerter Skelettkollektive abgestimmter Kennwert für die anthropologische Ursachenforschung osteoporotischer Erkrankungen.

Auf Grund berechneter Osteoporosestatuswerte können die Individuen eines Kollektivs in zwei Gruppen unterteilt werden, von denen die eine überdurchschnittlich knochengesund ist während die andere eher osteoporotische Tendenzen zeigt. Indem man mit anthropologischen und archäometrischen Methoden versucht, bei Gruppierungen oder Individuen mit verschiedenen Osteoporosestatuswerten, Unterschiede in der Lebensweise aufzudecken, können wertvolle Beiträge zum Risikofaktorenkonzept der Osteoporose geleistet werden.

Auffällig niedrige Osteoporosestatuswerte, insbesondere bei Individuen fortgeschrittenen Alters, legen den Verdacht klinisch manifester osteoporotischer Erkrankungen nahe, der an Hand von Skelet- und Röntgenbefund überprüft werden kann. Ein differentialdiagnostisches Problem erwächst aus der Tatsache, dass niedrige Osteoporosestatuswerte in seltenen Fällen auch aus nicht-osteoporotischen Prozessen resultieren können. Auch hier müssen Skeletbefund und Röntgenbild zur differentialdiagnostischen Abklärung herangezogen werden.

Neben der Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise wurden im Rahmen dieser Arbeit auch inhaltliche Ergebnisse an beiden Untersuchungskollektiven gewonnen, von denen die wichtigsten nachfolgend zusammengefasst werden.

Entsprechend den Erwartungen zeigen alle histomorphometrischen Parameter, die in einem Zusammenhang mit der Knochenmasse bzw. -dichte stehen, mit dem Lebensalter fortschreitende knochenatrophische Prozesse. Wie bereits viele andere Studien an archäologischem Material, können auch sie die Existenz knochenatrophischer bzw. osteoporotischer Prozesse in frühmittelalterlichen Bevölkerungen belegen.

Die Parameteränderungen mit dem Alter erfolgen dabei weitgehend linear. Ein Absinken des Östrogenspiegels im Zuge der Menopause wird im Parameterverlauf weiblicher Individuen nicht deutlich. Dieser Befund stützt die These, dass gewisse Unterschiede bezüglich der Muster osteoporotischer Prozesse in modernen und historischen Bevölkerungen bestehen.

Ein Vergleich des trabekulären Knochenvolumens im Beckenkamm archäologischer Skelete mit medizinischen Referenzdaten, bescheinigt den historischen Bevölkerungen eine etwas bessere Ausgangslage. Ihre Werte sinken jedoch, auf Grund

eines rapideren Knochenmasseverlustes während des Alterungsprozesses, bald unter die rezenter Probanden. Während sich das Wenigumstadter Kollektiv noch annähernd im Bereich der medizinischen Vergleichsdaten bewegt, sind die Altenerdinger Individuen von diesem Trend besonders dramatisch betroffen. Hinweise aus Aktivitätsmusteranalysen deuten auf eine Erhöhung der peak bone mass durch gesteigerte körperliche Aktivität, als mögliche Ursache für die verbesserte Ausgangslage der archäologischen Kollektive hin.

Der unterschiedlich starke Knochenmassenverlust, ist nicht auf das Becken beschränkt, sondern zeigt sich auch beim Vergleich der Indextrends auf Kollektivebene. Inwieweit sich diese Unterschiede auf verschiedene Subsistenzstrategien beider Bevölkerungen zurückführen lassen, bleibt so lange höchst hypothetisch, bis gezielte weiterführende Untersuchungen zur Ernährungsrekonstruktion bestehende Verdachtsmomente erhärten oder widerlegen.

In beiden Untersuchungskollektiven fielen vier Individuen durch besonders niedrige Osteoporosestatuswerte auf. Unter Zuhilfenahme der Röntgen- und Skeletbefunde konnten sie als Fälle einer postmenopausalen, einer senilen und einer Immobilisationsosteoporose interpretiert werden. Beim vierten Fall scheint hingegen eine Osteomalazie maßgeblich für den niedrigen Osteoporosestatuswert verantwortlich zu sein.

Signifikant höhere Osteoporosestatuswerte bei besonders wohlhabenden Bestattungen, im Vergleich zu einer ärmeren Referenzgruppe, legen für Wenigumstadt sozialgruppenspezifische Unterschiede der Lebensweise nahe, die sich auf das individuelle Osteoporoserisiko auswirken. Im Sinne des Risikofaktorenkonzeptes osteoporotischer Erkrankungen könnten sie in einer verminderten körperlichen Aktivität und einem höheren Fleischkonsum der wohlhabenderen Bevölkerungsschichten vermutet werden. Für Altenerding waren keine deutlichen sozialgruppenspezifischen Unterschiede feststellbar.

In beiden Untersuchungskollektiven konnte ein signifikant verbesserter Osteoporosestatus bei Bestattungen der fortgeschrittenen Belegungsphase gegenüber der früheren beobachtet werden. Interpretierbar ist dieser Befund als Ausdruck sukzessiv verbesserter Lebensbedingungen in mehr und mehr etablierten Siedlungsgemeinschaften.

Weiterführende Untersuchungen könnten mit anthropologischen und archäometrischen Methoden klären, inwieweit sich Zusammenhänge zwischen individuellen Osteoporosestatuswerten beider Untersuchungskollektive und rekonstruierten Lebensfaktoren ableiten lassen. Einer Anwendung des Osteoporosestatuskonzeptes und des Indextrendvergleichs auf weitere Untersuchungskollektive steht nichts im Wege. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahrensweisen können einen Beitrag dazu leisten, das große Informationspotential archäologischer Skeletserien für Geschichtswissenschaften und medizinische Grundlagenforschung nutzbar zu machen.

Literaturverzeichnis

Adler P. (1967): Die Chronologie der Gebißentwicklung. In: Harnt E., Weyers H. (Hrsg.): Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde im Kindesalter. Die Quintessenz, Berlin, 38-74.

Agarwal S.C., Grynepas M.D. (1996): Bone quantity and quality in past populations. *Anat. Rec.* 246:423-432.

Ahlquist J., Damsten O. (1969): A modification of Kerley's method for the microscopic determination of age in human bone. *J. For. Sci.* 14:205-212.

Arlot M.E., Delmas P.D., Chappard D., Meunier P.J. (1990): Trabecular and endocortical bone remodelling in postmenopausal osteoporosis: comparison with postmenopausal women. *Osteoporosis Int.* 1: 41-49.

Arnold J.S. (1981): Trabecular pattern and shapes in aging and osteoporosis. In: Jee W.S.S., Parfitt A.M. (Hrsg.): Bone histomorphometry. Third international workshop, Armour Montague, Paris, S. 297-308.

Aufderheide A.C., Rodríguez-Martí n C. (1998): The Cambridge encyclopedia of human paleopathology. Cambridge University Press INC.

Australian national consensus conference (1997): The prevention and management of osteoporosis. Consensus statement. *The Medical Journal of Australia* [online, 167:S1-S15]. Available: <http://www.mja.com.au/public/guides/osteo/osteo.html> [1999, May 18].

Beilner T. (1994): Beraubungsspuren auf den Skeleten des merowingerzeitlichen Reihengräberfeldes von Wenigumstadt, Ldkr. Aschaffenburg, Bayern. Zulassungsarbeit, Institut für Anthropologie und Humangenetik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Beilner T., Grupe G. (1996): Beraubungsspuren auf menschlichen Skeleten des merowingerzeitlichen Reihengräberfeldes von Wenigumstadt (Ldkr. Aschaffenburg). *Arch. Korrb.* 26:213-217.

Bell L.S. (1990): Palaeopathology and diagenesis: An SEM evaluation of structural changes using backscattered electron imaging. *J. Arch. Sci.* 17:85-102.

Bergner C. (1994): Aktivitätsmuster im frühen Mittelalter - Ein Beitrag zur Alltagsgeschichte. Diplomarbeit, Institut für Anthropologie und Humangenetik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Boivin G., Meunier P.J. (1993): Histomorphometric methods applied to bone. In: Grupe G., Garland A.N. (Hrsg.): Histology of ancient human bone: Methods and diagnosis. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, S. 137-156.

- Bosch K. (1993): Statistiktaschenbuch. 2. Aufl., Oldenburg, München-Wien.
- Brickley M., Howel P.G.T. (1999): Measurement of changes in trabecular bone structure with age in an archäological population. *J. Arch. Sci.* 26:151-157.
- Burr D.B., Ruff C.B., Thompson D.D. (1990): Patterns of skeletal histologic change through time: Comparison of an archaic native american population with modern populations. *Anat. Rec.* 226:307-313.
- Burton J.H., Wright L.E. (1995): Nonlinearity in the relationship between bone Sr/Ca and diet: Paleodietary implications. *Am. J. Phys. Anthropol.* 96:273-282.
- Carlson D.S., Armelagos G.J., Van Gerven D.P. (1976): Patterns of age-related cortical bone loss (osteoporosis) within the femoral diaphysis. *Hum. Biol.* 48: 295-314.
- Chavassieux P.M., Arlot M.E., Meunier P.J. (1985): Intersample variation in bone histomorphometry: Comparison between manual and computerized methods applied to iliac bone biopsies. *Calcif. Tissue Int.* 37: 345-350.
- Chayes F. (1954): The theory of thin-section analysis. *J. Geol.* 62:92-101.
- Cipriano-Bechtle A. (1994): Altern und Lebenserwartung in präindustriellen Bevölkerungen. Diplomarbeit, Institut für Anthropologie und Humangenetik, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Cipriano-Bechtle A., Grupe G., Schröter P. (1996): Ageing and life expectancy in the early middle ages. *Homo* 46: 267-279.
- Consensus development conference (1991): Diagnosis, prophylaxis and treatment of osteoporosis. *Am. J. Med.* 90:107-110.
- Cook M., Molto E., Anderson C. (1988): Possible case of hyperparathyroidism in a roman period skeleton from Dakhleh oasis, Egypt, diagnosed using bone histomorphometry. *Am. J. Phys. Anthropol.* 75:23-30.
- Cooper C. (1999): Epidemiology of osteoporosis. *Osteoporosis Int.* 2:S2-S8.
- Darby A.J., Meunier P.J. (1981): Mean wall thickness and formation periods of trabecular bone packets in ideopathic osteoporosis. *Calcif. Tissue Res. Int.* 33:199-204.
- Delling G, Hahn M., Pompesius-Kempa M., Behle K., Vogel M. (1989): Die trabekuläre Mikroarchitektur der menschlichen Wirbelsäule. Ergebnis einer kombinierten 2- und 3-dimensionalen Analyse. *Verh. Dtsch. Ges. Path.* 73:631.
- Delling G., Vogel M., Hahn M. (1991): Morphologische Mechanismen für die Regulation der Knochenstruktur. Grundlage für das Verständnis von Knochenmassenverlustsyndromen. *Nieren- und Hochdruckerkrankungen* 20:255-261.

Delling G., Vogel M. (1992): Pathomorphologie der Osteoporose. In: Schild H.H., Heller M. (Hrsg.): Osteoporose. Thieme Verlag, Stuttgart-New York, S. 7-26.

de Vernejoul M.C., Kuntz D., Miravet L., Goutallier D., Ryckewaert A. (1981): Bone histomorphometric reproducibility in normal patients. *Calcif. Tissue Res. Int.* 33: 369-374.

Dewey J.R., Armelagos G.J., Bartley M.H. (1969): Femoral cortical involution in three archaeological populations. *Hum. Biol.* 41: 13-28.

Dittmann C. (1999): Lebensbedingungen für Kinder im ausgehenden frühen Mittelalter (500 bis 700 n.Chr.). Ergebnisse der paläopathologischen Untersuchungen an den Kinderskeleten aus dem alamannisch-fränkischen Reihengräberfeld von Wenigumstadt, Ldkr. Aschaffenburg, Bayern. Diplomarbeit, Institut für Anthropologie und Humangenetik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Elias H., Henning A., Schwartz D.E. (1971): Stereology: Applications to biomedical research. *Physiol. Rev.* 51:158-200.

Ericksen M.F. (1976): Cortical bone loss with age in three native american populations. *Am. J. Phys. Anthrop.* 45:443-452.

Ericksen M.F. (1991): Histological estimation of age at death using the anterior cortex of the femur. *Am. J. Phys. Anthrop.* 84:171-179.

Farquharson M.J., Speller R.D., Brickley M. (1997): Measuring bone mineral density in archaeological bone using energy dispersive low angle X-ray scattering techniques. *J. Arch. Sci.* 24:765-772.

Frost H.M. (1964): Dynamics of bone remodeling. In: Frost H.M. (Hrsg.): Bone dynamics. Little, Brown and Co, Boston.

Gordon C.L., Lang T.F., Augat P., Genant H.K. (1998): Image-based assesment of spinal trabecular bone structure from high-resolution CT images. *Osteoporosis Int.* 8:317-325.

Gross R., Schölmerich P., Gerok W. (Hrsg.) (1987): Lehrbuch der inneren Medizin. 7. Aufl., Schattauer, Stuttgart-New York.

Grosskopf B. (1990): Individualaltersbestimmung mit Hilfe von Zuwachsringen im Zement bodengelagerter menschlicher Zähne. *Z. Rechtsmed.* 103: 351-359.

Grupe G., Piepenbrink H. (1988): Trace element contaminations in excavated bones by microorganisms. In: Grupe G, Herrmann B. (Hrsg.): Trace elements in environmental history. Proceedings of the symposium hold from June 24th to 26th, 1987, at Göttingen. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo, S. 103-112.

Grupe G. (1990): Sozialgruppenabhängiges Nahrungsverhalten im frühen Mittelalter am Beispiel der Skeletserie von Altenerding, Ldkr. Erding, Bayern (5.-7. Jahrhundert). *Anthrop. Anz.* 48:365-374.

Grupe G. (1998): Diet and health depicted from human skeletal remains by archaeometry. *Rivista di Antropologia* 76:121-131.

Gügel I. (1998): Simulationsversuch von Microwear mit Merkmalsvergleich an frühmittelalterlichen Molaren. Diplomarbeit, Institut für Anthropologie und Humangenetik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Hahn M., Vogel M., Pompesius-Kempa M., Delling G. (1992): Trabecular Bone Pattern Factor - a new parameter for simple quantification of bone microarchitecture. *Bone* 13:327-330.

Hammerl J. (1990): Bestimmung der Knochendichte durch quantitative digitale Radiographie (QDR) am Femurhals bei einer merowingischen Population aus Bockenheim / Landkreis Bad Dürkheim. Diss. Frankfurt am Main.

Hammerl J. (1996): Osteoporose einst - osteodensitometrische Untersuchungen an historischen Skeleten. *Med. Klin.* 91:27-28.

Hansen M.A., Overgaard K., Riis B.J., Christiansen C. (1991): Potential risk factors for development of postmenopausal osteoporosis - examined over 12-year period. *Osteoporosis Int.* 1: 95-102.

Heaney R.P., Recker R.R. (1981): Osteoporosis-related nutritional influences on bone: Calcium. In: DeLeuca H.F., Frost H.M., Jee W.S.S., Johnston Jr.C.C., Parfitt A.M. (Hrsg.) (1981): *Osteoporosis: Recent advances in pathogenesis and treatment*. University Park Press, Baltimore, S. 253-256.

Helmuth H. (1977): Körperhöhe, Paläodemographie und Selektion bei der frühmittelalterlichen Skeletserie von Altenerding. In: Schröter P. (Hrsg.): *75 Jahre Anthropologische Staatssammlung München 1902-1977*. Selbstverlag der Anthropologischen Staatssammlung München, S. 125-142.

Helmuth H., Ankner D., Hundt H.-J. (1996): Das Reihengräberfeld von Altenerding in Oberbayern II. Anthropologie, Damasizierung und Textilfunde. Philipp von Zabern. Mainz am Rhein.

Hermann B., Grupe G., Hummel S., Piepenbrink H., Schutkowski H. (1990): *Prähistorische Anthropologie. Leitfaden der Feld- und Labormethoden*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo-Hong Kong-Barcelona.

Hopf C., Reichel W. (1992): Orthopädie und Osteoporose. In: Schild H.H., Heller M. (Hrsg.): *Osteoporose*. Thieme Verlag, Stuttgart-New York, S. 180-200.

- Hu J.-F., Zhao X.-H., Chen J.-S., Fitzpatrick J., Parpia B., Campbell T.C. (1994): Bone density and lifestyle characteristics in premenopausal and postmenopausal chinese women. *Osteoporosis Int.* 4: 288-297.
- Janssen J., Laatz W. (1999): Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. 3. Aufl., Springer, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris-Tokyo-Hong Kong-Barcelona.
- Joakimsen R.M., Fonnebo V., Magnus J.H., Tollan A., Sogaard A.J. (1998): The Tromso study: Body height, body mass index and fractures. *Osteoporosis Int.* 8:436-442.
- Joakimsen R.M., Magnus J.H., Fonnebo V. (1997): Physical activity and predisposition for hip fractures: A review. *Osteoporosis Int.* 7:503-513.
- Jonsson B., Gärdsell P., Johnell O., Redlund-Johnell I., Sernbo I. (1992): Differences in fracture pattern between an urban and a rural population: A comparative population-based study in southern Sweden. *Osteoporosis Int.* 2: 269-273.
- Kalender W.A. (1992): Physik und Methodik der Knochenmineraldichtemessung. In: Schild H.H., Heller M. (1992):78-126.
- Kanis J.A. (1990): Osteoporosis and osteopenia. *J. Bone Miner. Res.* 5:209-211.
- Kanis J.A., Pitt F.A. (1992): Epidemiology of Osteoporosis. *Bone* 13:7-15.
- Kanis J.A., McCloskey E.V., de Takats D., Pande K. (1999): Clinical assessment of bone mass, quality and architecture. *Osteoporosis Int.* 2:S24-S28.
- Kelly P.J., Eisman J.A., Sambrook P.N. (1990): Interaction of genetic and environmental influences on peak bone density. *Osteoporosis Int.* 1: 56-60.
- Kemkes-Grottenthaler A. (1996): Critical evaluation of osteomorphognostic methods to estimate adult age at death: A test of the 'complex method'. *Homo* 46:280-292.
- Kerley E.R. (1965): The microscopic determination of age in human bone. *Am. J. Phys. Anthropol.* 23:149-164.
- Kiepersztok S. (1997): Diagnosis of osteoporosis. Post-Menopausal osteoporosis: Key issues. [online 1-2]. Available: <http://www.medinfo.ufl.edu/cme/osteo/osteo3.html> [1999, April 19].
- Kimmel D.B., Jee W.S.S. (1983): Measurements of area, perimeter and distance: Details of data collection in bone histomorphometry. In: Recker R.R. (Hrsg.): *Bone Histomorphometrie. Techniques and Interpretations*. CRC Press, Inc., Boca Raton, S. 89-108.

Kneissel M. (1993): Vergleich von nicht-invasiven und invasiven Methoden zur Erfassung des alters- und geschlechtsabhängigen trabekulären Knochenverlustes an archäologischem Material. Thesis, University Vienna.

Kneissel M., Boyde A., Hahn M., Teschler-Nicola M., Kalchhauser G., Plenk H.JR. (1994): Age- and sex-dependent cancellous bone changes in a 4000y BP population. *Bone* 15: 539-545.

Kneissel M., Roschger P., Steiner W., Schamall D., Kalchhauser G., Boyde A., Teschler-Nicola M. (1997): Cancellous bone structure in the growing and aging lumbar spine in a historic nubian population. *Calcif. Tissue Int.* 61:95-100.

Kraenzlin M.E. (1995): Sinnvolle Osteoporosediagnostik in der Praxis. In: Seibel M.J., Kraenzlin M.E. (Hrsg.): Osteoporose. 1. Interdisziplinäres Osteoporose-Symposium. Karger, Freiburg-Basel, S.24-29.

Kruse H.-P., Kuhlencordt F. (1984): Grundzüge der Osteologie. Internistische Knochenkrankungen und Störungen des Kalziumphosphat-Stoffwechsels. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo.

Lillegraven S. (1995): Untersuchungen zur Spongiosastruktur des Os pubis im Bereich der Facies symphysiales weiblicher Individuen unter besonderer Berücksichtigung von Gravidität und Partus. Diplomarbeit, Institut für Anthropologie und Humangenetik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Lips P., Courpron P., Meunier P.J. (1978): Mean wall thickness of trabecular bone packets in the human iliac crest: Changes with age. *Calcif. Tiss. Res.* 26:13-17.

Malluche H.H., Meyer W., Sherman D., Massry S.G. (1982): Quantitative bone histology in 84 normal american subjects. *Calcif. Tissue Res. Int.* 34: 449-455.

Martin D.I., Armelagos G.J. (1979): Morphometrics of compact bone: An Example from sudanese Nubia. *Am. J. Phys. Anthropol.* 51:571-578.

Matkovic V., Kostial K., Simonovic I., Buzina R., Brodarec A., Nordin B.E.C. (1979): Bone status and fracture rates in two regions of Yugoslavia. *Am. J. Clin. Nutr.* 32:540-549.

Matzen P.-F., Fleißner H.K. (1980): Orthopädischer Röntgenatlas. 2. Aufl., Georg Thieme Verlag, Stuttgart-New York.

Mays S., Lees B., Stevenson J.C. (1998): Age-dependent bone loss in the femur in a medieval population. *Int. J. Osteoarchaeol.* 8: 97-106.

Merz W.A., Schenk R.K. (1970): Quantitative structural analysis of human cancellous bone. *Acta anat.* 75:54-66.

Meunier P., Courpron P. (1973): Iliac trabecular bone volume in 236 controls - representativeness of iliac samples. In: Jaworski Z.F. (Hrsg.): Bone histomorphometrie. 1st international workshop. Ottawa, S. 100-105.

Minne H.W., Wüster C., Ziegler R. (1986): Pathogenese, Diagnose, Prophylaxe und Therapie der Osteoporose des alten Menschen. *Inn. Med.* 13:231-236.

Morosow E. (1996): Osteoporosehäufigkeit in Abhängigkeit vom Lebensalter in einer frühmittelalterlichen Bevölkerung. Zulassungsarbeit, Institut für Anthropologie und Humangenetik, Universität München.

Mosekilde L, Danielsen C.C., Sogaard C.H., Thorling E. (1994): The effect of long-term exercise on vertebral and femoral bone mass, dimensions, and strength - assessed in a rat model. *Bone* 15:293-301.

Mühlbauer R.C., Li F. (1999): Effect of vegetables on bone metabolism. *Nature* 401:343-344.

Neugebauer J.-W. (1991): Die Nekropole F von Gemeinlebarn Niederösterreich. Philipp von Zabern, Mainz am Rhein.

NIH (Hrsg.) (1984): NIH Consens Dev Conf Consens Statement Online 1984 Apr 2-4 (1984). Osteoporosis [online, 5(3):1-6]. Available: <http://isis.nlm.nih.gov/nih/cdc/www/43txt.html#Head1> [1999, May 18].

Nordin B.E.C. (1987): The definition and diagnosis of osteoporosis. *Calcif. Tissue Int.* 40:57-58.

Nordin B.E.C., Aaron J., Speed R., Crilly R.G. (1981): Bone formation and resorption as the determinants of trabecular bone volume in postmenopausal osteoporosis. *Lancet* i: 277-279.

Parfitt A.M. (1973): The quantitative approach to bone morphology. A critique of current methods and their interpretation. In: Frame B. Parfitt A.M., Chir B. (Hrsg.): Clinical aspects of metabolic bone disease. Excerpta Medica. Amsterdam, S. 86-94.

Parfitt A.M., Mathews C.H.E., Villanueva A.R., Kleerekoper M., Frame B., Rao D.S. (1983): Relationships between surface, volume, and thickness in iliac trabecular bone in aging and in osteoporosis. Implications for the microanatomic and cellular mechanisms of bone loss. *J. Clin. Invest.* 72: 1396-1409.

Parfitt A.M., Drezner M.K., Glorieux F.H., Kanis J.A., Malluche H., Meunier P.J., Ott S.M., Recker R.R. (1987): Bone histomorphometry: Standardization of nomenclature, symbols, and units. *J. Bone Mineral Res.* 2: 595-610.

Parfitt A.M. (1983): The stereologic basis of bone histomorphometry. Theory of quantitative microscopy and reconstruction of the 3rd dimension. In: Recker (Hrsg.):

Bone Histomorphometrie. Techniques and Interpretations. CRC Press, Inc., Boca Raton, S. 53-87.

Perzigian A.J. (1973): Osteoporotic bone loss in two prehistoric indian populations. *Am. J. Phys. Anthropol.* 39:87-96.

Pesch H.-J., Scharf H.-J., Lauer G., Seibold H. (1980): Der altersabhängige Verbundbau der Lendenwirbelkörper. Eine Struktur- und Formanalyse. *Virchows Arch. A Pathol. Anat. Histol.* 386:21-41.

Piepenbrink H. (1986): Prinzipien der Knochendekomposition und ihre Konsequenzen für die diagnostische Bearbeitung von Skelettfunden. In: Herrmann B. (Hrsg.): *Innovative Trends in der prähistorische Anthropologie*. Mitt. Berl. Ges. Anthropol. Ethnol. Urgesch. 7:15-21.

Podenphant J., Engel U. (1987): Regional variations in histomorphometric bone dynamics from the skeleton of an osteoporotic woman. *Calcif. Tissue Int.* 40: 184-188.

Precht M., Kraft R. (1993): *Bio-Statistik*. Bd. 2, 5. Aufl., Oldenbourg. München-Wien.

Pun K.K., Wong F.H.W., Loh T. (1991): Rapid postmenopausal loss of total body and regional bone mass in normal southern chinese females in Hong Kong. *Osteoporosis Int.* 1: 87-94.

Riggs B., Melton L. (1983): Evidence for two distinct syndromes of involutional osteoporosis (editorial). *Am. J. Med.* 75:899-901.

Ringe J.D. (1985): Die sozioökonomische Bedeutung der Osteoporose. *Hamb. Ärz. tebl.* 5:153-155.

Ringe J.D. (1992): Epidemiologie der Osteoporose. In: Schild H.H., Heller M. (Hrsg.): *Osteoporose*. Thieme Verlag, Stuttgart-New York, S. 1-6.

Ringe J.D. (1995): Osteoporose: Postmenopausale Osteoporose, senile Osteoporose, sekundäre Osteoporose, Osteoporose des Mannes. Thieme Verlag. Stuttgart-New York.

Romeis, B. (1989): *Mikroskopische Technik*. Neubearb. von Böck, P. (Hrsg.). 17. Aufl. Urban und Schwarzenberg, München-Wien-Baltimore.

Roosevelt A.C. (1984): Population, health, and the evolution of subsistenz. In: Cohen M.N., Armelagos G.J. (Hrsg.): *Paleopathology at the origins of agriculture*. Academic Press INC, Orlando-San Diego-New York-London-Toronto-Montreal-Sydney-Tokio, S. 559-584.

Sage W. (1974): Gräber der älteren Merowingerzeit aus Altenerding Ldkr. Erding (Oberbayern). 54. Bericht der Römisch-Germanischen Kommission 1973. Walter de Gruyter&Co, Berlin.

Sage W. (1984): Das Reihengräberfeld von Altenerding in Oberbayern I. Katalog der anthropologischen und archäologischen Funde und Befunde. Gebr. Mann Verlag, Berlin.

Schapira D., Schapira C. (1992): Osteoporosis: The evaluation of a scientific term. *Osteoporosis Int.* 2:164-167.

Schild H.H., Heller M. (1992): Konventionelle Röntgendiagnostik. In: Schild H.H., Heller M. (Hrsg.): *Osteoporose*. Thieme Verlag, Stuttgart-New York, S. 52-61.

Schulz M. (1991): Prophylaxe und Therapie der Osteoporose aus pharmazeutisch-pharmakologischer Sicht. In: von Werder K., Schulz M. (Hrsg.): *Osteoporose. Vorträge und Arbeitsunterlagen der Fortbildungsveranstaltungen im Frühjahr 1991 in Deggendorf, Kempten, München, Bayreuth, Regensburg, Würzburg und Nürnberg*, veranstaltet von der Bayerischen Landesapothekerkammer - Ausschuß für Aus- und Fortbildung. Schriftenreihe der Bayerischen Landesapothekerkammer, Heft 43, München.

Schulz G., Manns M. (1992): Ätiologie, Diagnostik und Therapie der Osteoporose. In: Schild H.H., Heller M. (Hrsg.): *Osteoporose*. Thieme Verlag, Stuttgart-New York, S. 27-51.

Schwartz M.P., Recker R.R. (1981): Comparison of surface density and volume of human iliac trabecular bone measured directly and by applied stereology. *Calcif. Tissue Int.* 33:561-565.

Seeman E. (1999): Osteoporosis in men. *Osteoporosis Int.* 2:S97-S110.

Seibel M.J., Kraenzlin M.E. (Hrsg.) (1995): *Osteoporose. 1. Interdisziplinäres Osteoporose-Symposium*. Karger, Freiburg-Basel.

Siegenthaler W., Kaufmann W., Hornbostel H., Waller H.D. (Hrsg.) (1987): *Lehrbuch der inneren Medizin*. 2. Aufl., Georg Thieme Verlag, Stuttgart-New York.

Siegert G. (1993): Ontogenetische Marker für den Spurenelementeintrag in das menschliche Skelet. Diplomarbeit, Institut für Anthropologie und Humangenetik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Spencer H., Krämer L. (1986): NIH Consensus Conference: Osteoporosis. *J. Nutr.* 116:316-319.

Stauch E. (in Vorbereitung): Wenigumstadt. Ein Bestattungsplatz der Völkerwanderungszeit und des frühen Mittelalters im nördlichen Odenwaldvorland. Diss. Universität Würzburg.

Stout S.D., Teitelbaum S.L. (1976): Histomorphometric determination of formation rates of archäological bone. *Calcif. Tissue Res.* 21:163-169.

Thompson D.D., Salter E.M., Laughlin W.S. (1981): Bone core analysis of Baffin Island Skeletons. *Arctic Anthropol.* 18:87-96.

Thomsen K., Gotfredse A., Christiansen C. (1986): Is postmenopausal bone loss an age-related phenomenon? *Calcif. Tissue Int.* 39:123-127.

Turban-Just S. (1993): Histomorphometrie bodengelagerter menschlicher Knochencompacta am Beispiel der frühmittelalterlichen Skeletserie von Altenerding (Landkreis Erding in Oberbayern). Diplomarbeit, Institut für Anthropologie und Human-genetik, Ludwig-Maximilians-Universität München.

Turban-Just S., Grupe G. (1995): Post-mortem-Rekonstruktionen von Stoffwechselraten mittels Histomorphometrie bodengelagerter menschlicher Knochencompacta. *Anthrop. Anz.* 53:1-25.

Turban-Just S. (1997): Zum biogenen Abbau menschlicher Knochenkollagene. *Anthrop. Anz.* 55:131-141.

Uytterschaut H. (1985): Determination of skeletal age by histological methods. *Z. Morph. Anthropol.* 75:331-340.

Uytterschaut H. (1993): Human bone remodelling and aging. In: Grupe G., Garland A.N. (Hrsg.): *Histology of ancient human bone: Methods and diagnosis*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, S. 95-110.

Whitehouse W.J. (1974): The quantitative morphology of anisotropic trabecular bone. *J. Microsc.* 101:153-168.

Whitehouse W.J. (1976): Errors in area measurement in thick sections, with special reference to trabecular bone. *J. Microsc.* 107:183-187.

WHO (Hrsg.) (1994): Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis. WHO technical report series 843.

Whyte M.P., Bergfeld M.A., Murphy W.A., Avioli L.V., Teitelbaum S.L. (1982): Postmenopausal osteoporosis. A heterogeneous disorder as assessed by histomorphometric analysis of iliac crest bone from untreated patients. *Am. J. Med.* 72:193-202.

Wu K., Schubeck K.E., Frost H.M., Villanueva A.R. (1970): Haversian bone formation rates determined by a new method in a mastodon, and in human diabetes mellitus and osteoporosis. *Calcif. Tissue. Res.* 6:204-219.

Ziegler R. (1988): Kommentar zu "Consensus report": Consensus development conference: Prophylaxis and treatment of osteoporosis. Klin. Wochenschr. 66:1044-1046.

Zink A. (1998): Kindersterblichkeit im frühen Mittelalter - morphologische und paläopathologische Ergebnisse an der Skeletserie von Altenerding, Ldkr. Erding, Bayern. Dissertation, Universität München.

Zöfel P. (1988): Statistik in der Praxis. 2. Aufl., Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

Anhang

A1. Histomorphometrische Messdaten

Wenigumstadter Untersuchungskollektiv

Grab Nr.	m/w	Alter	WA	WP	WT	BA	BP	BT	OP%	RE%
3	w	22	-	-	-	-	-	-	2,10	67,37
5	w	31	1486350	17438	-461	2765685	24629	-572	4,81	53,81
10	w	55	1075933	15358	312,2	1707921	17215	223	8,93	41,85
14	m	58	923801	14413	1037	1705909	19046	348	6,16	41,67
20	m	37	1867661	21261	-414	3233700	28064	-771	3,78	45,55
25	w	38	1250549	21592	537	1787533	22993	537	3,38	50,75
42	m	47	1319590	20399	146	2071724	26960	-48	4,74	31,80
47	m	32	1288519	16984	309	2491902	20261	4	7,02	43,22
53	m	28	1114406	18316	2489	2078858	23628	10	5,07	56,82
57	w	50	1270427	20620	629	1837893	22359	-68	7,40	25,51
64	m	53	1341809	21023	469	2642615	25553	-521	8,08	48,25
66	m	62	1010074	15315	1190	2086400	22929	72	4,99	65,86
67	w	34	1190633	17471	2267	2026751	23111	-4	4,31	37,64
70	m	33	1318160	15632	42	2522268	21291	-205	4,22	47,43
71	w	37	1103818	15603	726	2084329	22389	-629	3,84	39,64
73	m	27	1323418	18739	850	2650955	28914	-452	6,26	64,41
77	m	68	883341	15060	924	2432827	23113	-747	5,88	38,88
78	w	49	1228689	17095	77	2115066	21887	-414	8,31	32,92
79	w	20	1530572	19914	471	3352981	25246	-672	3,65	78,68
85	w	40	1434380	18961	269	2046785	25047	-35	6,37	63,65
86	w	54	728618	10144	1142	1483856	16464	521	19,84	24,61
95	m	24	1672015	23372	316	2863992	28145	-883	4,67	70,99
101	w	22	2079505	21329	-406	3378104	25407	-551	3,87	56,03
102	w	21	1339216	17466	102	2258312	26293	47	4,11	57,21
104	w	33	1132792	16121	426	2630278	22337	-712	4,91	55,84
106	w	49	983812	16276	2168	1777734	24254	294	5,49	44,65
108	w	33	1476046	22915	-327	2158033	27391	-342	5,75	51,39
110	w	55	1198245	17463	-101	1845420	22482	-503	8,49	61,96
117	m	63	1189039	18971	336	2071846	21496	421	4,37	37,06
118	m	42	1378447	19433	781	1864519	21553	357	4,59	52,46
119	m	48	1084874	14784	698	1862636	19227	-303	7,26	45,08
121	m	68	852253	15396	815	1477452	20224	398	7,40	27,86
129	w	27	1290791	15610	958	2360344	20269	-499	2,34	60,23
131	w	41	879439	8675	1519	1217713	12043	1008	16,15	45,04
140	w	35	1285527	18856	-65	1844039	23503	203	2,58	62,15
141	m	41	1135431	14851	558	1864627	20716	169	4,48	43,88

143	m	43	1245767	17858	547	2397019	19966	-541	5,59	42,16
152	m	34	1632737	18645	-207	2475574	22619	-806	5,10	50,99
155	w	20	1272911	14778	592	2649906	24372	-271	4,47	62,64
158	m	72	989570	15073	506	1418365	18791	472	5,44	27,46
159	w	28	1322915	20827	-50	2284739	26803	-1258	2,01	39,11
161	w	39	1181922	16117	268	2124041	18498	-280	6,39	36,51
166	m	35	1355180	19139	347	2154904	21056	-203	3,69	50,33
171	w	42	1226611	19187	67	2071098	24089	-563	4,84	34,52
178	m	44	1317469	17771	694	2846277	25138	-631	5,05	51,13
185	w	58	927084	14074	844	2081874	21059	-243	18,6	44,06
188	w	19	1626221	21097	-480	3500018	25227	-703	3,94	63,30
205	w	21	1823254	23451	-1017	3063856	27185	-460	3,20	76,28
206	m	41	1304923	18012	142	2712611	23075	-817	3,60	56,14
208	w	20	1394956	15977	473	1712290	18659	891	4,53	49,69
212	m	41	-	-	-	2829944	22604	-167	4,48	57,40
215	w	66	1104384	17623	850	1802293	20697	76	6,06	58,27
216	m	69	930591	13693	467	2530880	18689	-511	6,54	49,77
221	w	34	1700651	20975	-166	3185521	24943	-584	6,69	55,14
222	m	50	1586012	18854	-192	4120070	20267	-1202	4,24	49,69
225	m	63	1279312	19076	990	2439137	23465	277	4,80	68,90
231	w	18	-	-	-	-	-	-	2,51	59,86
239	m	40	1114930	15938	518	2214004	23091	-364	3,80	46,49
245	m	43	1152972	15762	717	2092768	22342	-146	4,67	34,01
251	m	63	869248	13152	1181	2214105	21935	-293	8,56	37,39
253	w	55	1177177	18340	-165	1945260	25916	-36	8,55	39,11
254	w	71	676217	11965	1794	2092329	17966	23	16,44	38,37
257	w	77	903761	15530	726	1734204	23499	290	18,75	44,51
258	m	28	1331549	14645	42	3213774	24547	-1499	5,19	59,77
6/7	m	29	1964851	20076	-156	2415460	25222	85	5,63	55,50
84A	w	31	1250873	18192	384	2987219	27539	-1548	2,71	42,82
84B	w	75	844292	14772	957	2054156	26087	-100	8,10	44,49

Tabelle 3. Histomorphometrische Messdaten des Wenigumstadter Untersuchungskollektivs. Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung: m/w: Geschlecht, männlich/weiblich; WA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper. BA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; OP%: Porosität (%) der ventralen Femurdiaphysencompacta; RE%: Rippenmaterialerfüllungsgrad (%).

Altenerdinger Untersuchungskollektiv

Grab Nr.	m/w	Alter	WA	WP	WT	BA	BP	BT	OP%	RE %
55	m	45	1338643	17629	-64	3194073	21726	-1123	4,17	33,92
71	m	32	1218450	15401	147	2199296	18060	-413	4,59	37,87
78	w	62	1473960	19830	178	1955566	19550	-297	18,05	46,93
92	m	24	1521862	17506	238	3136360	23219	-199	2,06	54,72
106	m	48	1269919	16294	181	2403561	22443	-475	6,77	38,34
118	w	44	939825	17410	63	1973820	22176	-66	8,86	47,92
128	w	32	1458510	21604	486	2987257	26223	-954	4,75	59,60
135	m	50	1315267	16800	607	2506929	24388	-740	4,84	50,20
143	w	39	923812	13561	1282	1699458	20888	-74	11,04	39,83
146	w	31	1537241	18399	347	2288355	22710	-374	7,14	45,93
154	m	33	1882323	21847	-305	2645752	24802	-135	3,22	37,42
192	w	50	1323121	16835	120	1786433	17583	-249	4,06	37,14
201	w	37	1436242	16861	-61	2830254	22787	-1105	6,14	54,07
205	w	35	1309172	18317	-79	2057370	22422	-388	7,94	40,09
211	w	29	921196	14066	850	2642598	22621	-666	6,47	49,08
220	w	45	1132155	15794	837	2202147	18330	-208	8,91	47,53
224	w	58	1034456	13847	610	1733667	15646	496	15,40	31,66
231	w	49	1637159	21968	-239	2238293	18595	-171	6,20	39,65
245	w	30	1553241	18455	-91	2823342	23033	-1323	4,14	71,10
264	w	54	693596	12598	1438	1937625	16181	246	13,52	28,58
290	m	46	746352	11645	1537	2880368	20909	-809	4,12	28,85
294	w	30	1449902	20719	-266	2646820	26953	-918	4,85	60,36
296	m	32	1373502	17717	133	2914286	26477	-928	4,40	64,41
320	m	52	1670236	20718	94	2475221	19549	-53	4,64	45,27
323	m	45	1315806	22536	174	2430397	28447	-952	6,47	37,86
340	m	49	1240116	15920	18	3159215	22715	-1063	5,89	39,53
343	w	39	1457659	20613	157	2810930	29598	-1613	3,26	60,21
344	m	47	1166490	16970	391	2858612	25665	-986	5,22	57,83
419	m	42	1091969	17704	146	1676545	19698	-45	4,66	49,77
452	w	53	698336	12097	1601	1372281	20891	-399	18,70	36,49
471	m	71	723387	8381	1871	1228282	16202	483	8,75	27,79
529	m	38	1311822	17760	-198	2350217	22779	-439	4,46	53,51
532	w	57	951902	16278	1414	1564955	22003	48	16,80	43,92
566	m	27	1544728	21957	-374	2931227	25940	-913	4,78	48,29
576	w	41	921645	16391	627	1606808	21732	504	12,35	43,14
625	w	28	1700290	19049	-175	2937077	22913	-819	3,74	66,03
634	w	31	1188879	15992	249	2719187	23283	-960	3,72	61,15
655	m	44	1033059	13605	508	2755443	20983	-184	4,51	44,37
657	m	35	1349445	22016	157	2358491	26119	58	4,87	45,21
658	w	30	1093586	16698	1213	1957225	23213	-467	3,61	47,12
709	w	42	1123030	18152	899	1872562	22648	-398	6,96	34,74
725	m	68	587348	12517	1505	1134061	16694	1132	15,34	29,33
734	m	52	1343178	23400	-340	2388657	29046	-1236	6,30	30,65
740	m	38	1308258	19942	-51	2498188	23030	-488	4,77	51,21

747	w	36	1923898	23108	-638	3240756	25972	-1204	3,55	69,04
760	w	41	1000590	16169	1112	2047373	22496	-561	11,16	32,60
808	m	61	1084789	16174	238	2130997	21045	-361	5,97	38,12
832	w	26	1728637	20310	-250	2767389	24469	-664	3,66	48,26
848	m	82	949773	15000	1021	1085843	17934	986	8,22	39,23
860	m	50	1517644	20671	-27	2692515	24843	-508	4,95	40,84
903	m	46	1382812	19526	205	2548218	23931	-355	5,42	47,84
905	m	35	1446804	18135	248	2421826	24576	-612	3,59	58,46
947	m	69	1594373	21083	-216	2485866	22041	-456	4,27	31,15
1017	m	46	1137451	17852	271	2473408	24301	-946	5,52	42,41
1019	m	34	1315000	17887	155	3210079	23508	-918	3,40	56,70
1027	m	66	1456941	20784	-173	1889950	20204	-52	9,30	50,09
1034	m	53	1357626	17159	270	2310052	23832	-548	4,18	62,23
1037	m	58	957257	13429	676	1557018	20258	297	7,40	27,81
1045	m	58	1365369	17357	196	2661355	21445	-4	5,36	48,64
1063	w	49	1021092	14819	146	2041231	15391	72	5,55	36,69
1074	w	54	1041990	16500	346	2265306	21174	-423	9,40	41,53
1078	m	53	1683052	18995	-123	2395514	24897	-417	4,24	39,19
1085	m	33	1599839	19965	-614	2819502	25637	-844	6,68	40,09
1090	m	41	1023722	15258	810	1369437	20188	1043	7,35	33,68
1107	m	62	1430987	17899	194	1003593	12865	1897	7,54	31,03
1119	w	33	1642693	24004	-371	3036035	32082	-1382	3,70	59,37
1123	m	61	873593	15048	1215	1880793	21720	448	10,11	44,60
1154	m	67	898231	16008	258	2382361	23338	-844	7,16	42,01
1169	m	46	1117765	18676	-17	1598003	21794	176	6,04	40,96
1179	m	31	1525410	18955	189	2695567	23118	-327	3,79	39,91
1183	w	50	1073760	16380	990	1431771	14424	866	6,65	37,81
1229	w	40	1420583	18623	-243	2700567	22345	-681	4,98	62,23
1271	w	41	1474517	22295	-71	2750253	27939	-998	4,95	47,48
1285	m	51	1043035	16989	72	2415352	26753	-1163	7,97	42,36
1291	w	49	643897	8809	2104	2297395	18687	-172	9,04	43,07
1305	w	46	1533170	18922	-3	2773035	21799	-641	7,95	54,86
1314	w	61	665787	11516	1319	1099155	12543	617	5,75	38,17
1318	m	61	860448	14478	881	1554985	19220	636	6,59	36,77
1331	m	49	1450841	19202	-67	2447230	20084	-752	6,04	49,68
1339	m	73	1166147	17350	515	2021965	27084	-719	5,74	36,28
1340	w	35	1553155	20857	275	2703717	23470	-718	5,34	67,03
151A	w	34	1277005	188818	-398	2133225	19653	-236	12,69	31,75

Tabelle 4. Histomorphometrische Messdaten des Altenerdinger Untersuchungskollektivs. Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung: m/w: Geschlecht, männlich/weiblich; WA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper. BA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; OP%: Porosität (%) der ventralen Femurdiaphsencompacta; RE%: Rippenmaterialerfüllungsgrad (%).

A2. Korrelationsmatrizen histomorphometrischer Messwerte und individueller Sterbealtersdaten

1. Wenigumstadt Frauen

		Alter	WA	WP	WT	BA	BP	BT	OP%	RE%
Alter	r=	1,000								
	p=	0,000								
	n=	36								
WA	r=	-0,736	1,000							
	p=	0,000	0,000							
	n=	34	34							
WP	r=	-0,442	0,791	1,000						
	p=	0,004	0,000	0,000						
	n=	34	34	34						
WT	r=	0,410	-0,710	-0,651	1,000					
	p=	0,008	0,000	0,000	0,000					
	n=	34	34	34	34					
BA	r=	-0,587	0,733	0,542	-0,510	1,000				
	p=	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000				
	n=	34	34	34	34	34				
BP	r=	-0,309	0,554	0,761	-0,492	0,589	1,000			
	p=	0,038	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000			
	n=	34	34	34	34	34	34			
BT	r=	0,324	-0,412	-0,465	0,441	-0,715	-0,612	1,000		
	p=	0,031	0,008	0,003	0,005	0,000	0,000	0,000		
	n=	34	34	34	34	34	34	34		
OP%	r=	0,709	-0,656	-0,674	0,385	-0,479	-0,566	0,461	1,000	
	p=	0,000	0,000	0,000	0,012	0,002	0,000	0,003	0,000	
	n=	36	34	34	34	34	34	34	36	
RE%	r=	-0,519	0,571	0,390	-0,402	0,543	0,363	-0,172	-0,463	1,000
	p=	0,001	0,000	0,011	0,009	0,000	0,18	0,166	0,002	0,000
	n=	36	34	34	34	34	34	34	36	36

Tabelle 5. Korrelationsmatrix der histomorphometrischen Messwerte und der individuellen Sterbealtersdaten bei Wenigumstadter Frauen. Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung: WA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper. BA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; OP%: Porosität (%) der ventralen Femurdiaphysencompacta; RE%: Rippenmaterialerfüllungsgrad (%).

2. Wenigumstadt Männer ohne Grab Nr. 222

		Alter	WA	WP	WT	BA	BP	BT	OP%	RE%
Alter	r=	1,000								
	p=	0,000								
	n=	30								
WA	r=	-0,691	1,000							
	p=	0,000	0,000							
	n=	29	29							
WP	r=	-0,469	0,776	1,000						
	p=	0,005	0,000	0,000						
	n=	29	29	29						
WT	r=	0,251	-0,615	-0,293	1,000					
	p=	0,095	0,000	0,062	0,000					
	n=	29	29	29	29					
BA	r=	-0,495	0,578	0,385	-0,422	1,000				
	p=	0,003	0,000	0,020	0,011	0,000				
	n=	30	29	29	29	30				
BP	r=	-0,484	0,611	0,681	-0,181	0,618	1,000			
	p=	0,003	0,000	0,000	0,174	0,000	0,000			
	n=	30	29	29	29	30	30			
BT	r=	0,414	-0,316	-0,119	0,353	-0,795	-0,445	1,000		
	p=	0,012	0,048	0,269	0,030	0,000	0,007	0,000		
	n=	30	29	29	29	30	30	30		
OP%	r=	0,367	-0,391	-0,333	0,273	-0,200	-0,208	0,062	1,000	
	p=	0,023	0,018	0,039	0,076	0,144	0,135	0,373	0,000	
	n=	30	29	29	29	30	30	30	30	
RE%	r=	-0,471	0,423	0,377	0,077	0,556	0,463	-0,344	-0,260	1,000
	p=	0,004	0,011	0,022	0,346	0,001	0,005	0,031	0,083	0,000
	n=	30	29	29	29	30	30	30	30	30

Tabelle 6. Korrelationsmatrix der histomorphometrischen Messwerte und der individuellen Sterbealterdaten bei Wenigumstadter Männern. Ausgenommen wurde Grab Nr. 222. Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung: WA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper. BA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; OP%: Porosität (%) der ventralen Femurdiaphysencompacta; RE%: Rippenmaterialerfüllungsgrad (%).

3. Altenerding Frauen

		Alter	WA	WP	WT	BA	BP	BT	OP%	RE%
Alter	r=	1,000								
	p=	0,000								
	n=	37								
WA	r=	-0,522	1,000							
	p=	0,000	0,000							
	n=	37	37							
WP	r=	-0,457	0,890	1,000						
	p=	0,002	0,000	0,000						
	n=	37	37	37						
WT	r=	0,441	-0,842	-0,805	1,000					
	p=	0,003	0,000	0,000	0,000					
	n=	37	37	37	37					
BA	r=	-0,670	0,751	0,641	-0,641	1,000				
	p=	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				
	n=	37	37	37	37	37				
BP	r=	-0,657	0,569	0,687	-0,444	0,715	1,000			
	p=	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000			
	n=	37	37	37	37	37	37			
BT	r=	0,634	-0,653	-0,603	0,523	-0,858	-0,847	1,000		
	p=	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
	n=	37	37	37	37	37	37	37		
OP%	r=	0,624	-0,529	-0,445	0,474	-0,611	-0,392	0,517	1,000	
	p=	0,000	0,000	0,003	0,002	0,000	0,008	0,001	0,000	
	n=	37	37	37	37	37	37	37	37	
RE%	r=	-0,575	0,659	0,553	-0,512	0,792	0,637	-0,743	-0,576	1,000
	p=	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	n=	37	37	37	37	37	37	37	37	37

Tabelle 7. Korrelationsmatrix der histomorphometrischen Messwerte und der individuellen Sterbealtersdaten bei Altenerdingern Frauen. Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung: WA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper. BA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; OP%: Porosität (%) der ventralen Femurdiaphysencompacta; RE%: Rippenmaterialerfüllungsgrad (%).

4. Altenerding Männer

		Alter	WA	WP	WT	BA	BP	BT	OP%	RE%
Alter	r= p= n=	1,000 0,000 45								
WA	r= p= n=	-0,461 0,001 45	1,000 0,000 45							
WP	r= p= n=	-0,361 0,007 45	0,801 0,000 45	1,000 0,000 45						
WT	r= p= n=	0,55 0,001 45	-0,807 0,000 45	-0,833 0,000 45	1,000 0,000 45					
BA	r= p= n=	-0,608 0,000 45	0,507 0,000 45	0,382 0,005 45	-0,504 0,000 45	1,000 0,000 45				
BP	r= p= n=	-0,399 0,003 45	0,384 0,005 45	0,574 0,000 45	-0,482 0,000 45	0,624 0,000 45	1,000 0,000 45			
BT	r= p= n=	0,389 0,004 45	-0,304 0,021 45	-0,357 0,008 45	0,481 0,000 45	-0,815 0,000 45	-0,763 0,000 45	1,000 0,000 45		
OP%	r= p= n=	0,613 0,000 45	-0,603 0,000 45	-0,378 0,005 45	0,490 0,000 45	-0,670 0,000 45	-0,396 0,004 45	0,495 0,000 45	1,000 0,000 45	
RE%	r= p= n=	-0,436 0,001 45	0,331 0,013 45	0,270 0,037 45	-0,320 0,016 45	0,429 0,002 45	0,343 0,010 45	-0,338 0,012 45	-0,416 0,002 45	1,000 0,000 45

Tabelle 8. Korrelationsmatrix der histomorphometrischen Messwerte und der individuellen Sterbealtersdaten bei Altenerdingern Männern. Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung: WA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper; WT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Lendenwirbelkörper. BA: Trabekelfläche (μm^2) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BP: Trabekelumfang (μm) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; BT: TBPf-Wert ($\mu\text{m}^{-1} \cdot 10^6$) pro Standarduntersuchungseinheit im Beckenkamm; OP%: Porosität (%) der ventralen Femurdiaphysencompacta; RE%: Rippenmaterialerfüllungsgrad (%).

A3. Listings der Makroprogramme zur Bildanalyse mit NIH IMAGE

Macro 'Rippenmaterialerfüllung'; {*** Thomas Beilner 20.3.1998 ***}
 {Version für AE-R-Frauen}

```
{+++++}
{+++++}
{Dieses Programm berechnet Knochenmaterialoberfläche, Querschnittsfläche,}
{Querschnittsumfang und den Materialerfüllungsgrad in Prozent eines}
{Knochenquerschnittes und speichert die gewonnenen Daten in einer}
{Excel-lesbaren Datei ('Materialerfüllung').}
{Feste Thresholdeinstellung (140)}
{Vorbereitung der Bilder:}
{Scannen als Graustufenbilder mit 2400 dpi Auflösung}
{Eliminieren von Artefakten durch Filterprozesse und manuelles Bearbeiten}
{Bildtitel: jeweils Fund Nr. oder Grab Nr. }
{Speichern als TIFF-Format}
{+++++}
{+++++}
```

Var {Definition der eingesetzten Variablen}
 M:boolean;
 i,Particles,f,h,o,q,k,l,x,: integer;
 A1,A2,P,ME: real;
 Messnummer,NT,GA,G1,G2,Titel:string;

```
Begin
DisposeAll;
NewTextWindow('Information',420,95);MoveWindow(300,50);
Writeln;
Writeln(' ***** Automatische Analyse des Materialerfüllungsgrades *****');
Writeln(' ');
Writeln('                Bitte das erste Bild auswählen!');
{Grabnummernverzeichnis}
G1:='78+118+128+143+146+192+201+205+211+220+224+231+245+264+294+343
+
452+532+576+625+634+658+709+747+760+832+1063+1074+1119+1183+1229+
1271+1291+1305+1314+1340+151A+';
G2:='+++++';
GA:=G1;
For f=1 to 37 Do begin
  h:=pos('+',GA);
  o:=length(GA);
  NT:=GA;
  Delete(NT,h,o-h+1);
  q:=length(NT);
```

```

Delete(GA,1,q+1);
IF f= 37 Then GA:=G2;
Open(NT);
Titel:=WindowTitle;
Messnummer:=Titel;
IF f=1 Then Begin
    SelectWindow('Information');
    Dispose;
    SelectWindow(Titel);
end; {IF}
SetPalette('Grayscale');
SetThreshold(140);
MakeBinary;
{+++++}
{Analyse der Knochenmaterialoberfläche und des Querschnittumfangs}
{+++++}
Duplicate('Gesamtquerschnitt');
A1:=0;A2:=0;P:=0;ME:=0;
SetOptions('AreaPerimeter');
SetScale(0.426,'µm'); {Skalierung für 1:1 Scan}
SetParticleSize(200,999999);
AnalyzeParticles('labelreset');
Particles:=rCount;
IF Particles > 1 Then Begin
    NewTextWindow('Information',305,120);MoveWindow(500,200);
    Writeln;
    Writeln(' ***** Analysefehler *****');
    Writeln;
    Writeln('      Mehrere Objekte wurden erfasst!!!!');
    Writeln;
    Wait(10);
    Dispose;
    Messnummer:='Fehler';
end; {IF}
A1:=rArea[1];
P:=rLength[1];
Dispose;
{+++++}
{Analyse der Gesamtquerschnittsfläche}
{+++++}
SetOptions('Area');
SetScale(0.426,'µm'); {Skalierung für 1:1 Scan}
SetParticleSize(200,999999);
AnalyzeParticles('labelresetinclude');
A2:=rArea[1];
DisposeAll;
{+++++}
{Messdatenaufbereitung}

```

```

{+++++}
ME:=(A1/A2)*100;
A1:=round(A1);A2:=round(A2);P:=round(P);
{Export der Daten in die Datei 'Materialerfüllung '}
Open('Materialerfüllung');
Write(Messnummer,',',A1,',',A2,',',P,',');
Writeln(ME:4:2,',');
Save;
Dispose;
end; {f}
End; {Programmende}

```

Macro 'Export vorbereiten';

```

Begin
  NewTextWindow('Materialerfüllung',500,100);
  Writeln('Grabnummer,',',',Knochenfläche',',',',Querschnittsfläche',',',
'Querschnittsumfang',',',',Materialerfüllung');
  Save;
  Dispose;
End; {Programmende}

```

Macro 'Femurporosität'; {*** Thomas Beilner 18.06.1998 ***}
 {Version für AE-O-Frauen}

```

{+++++}
{+++++}
{Dieses Macro berechnet die Porosität einer Knochenfläche; d.h. den Prozentsatz}
{einer Analysefläche, der von kanalartigen Strukturen eingenommen wird.}
{Bildvorbereitung: Mikroskop: 4x; Bild 12x7,98 cm 300 dpi; Kanäle weiß;}
{Knochenfläche schwarz; TIFF-Format}
{ Namensformat: GrabNr.-x mit x=Zahl der zu messenden Bilder; max. 9)
{+++++}
{+++++}

```

```

Var
  M:boolean;
  i,Particles,f,fe,k,h,o,q,l,m,t,bz,e,x,T: integer;
  A1,A2,AA,AK,Poro: real;
  Messnummer,NT,GA,G1,G2,Titel,KK,U,SS:string;

```

```

Begin
  DisposeAll;
  {Grabnummernverzeichnis}

```

```

G1:='78-1+118-1+128-1+143-1+146-1+192-1+201-1+205-1+211-1+220-1+224-
1+231-1+
245-1+264-1+294-1+343-1+452-1+532-1+576-1+625-1+';
G2:='634-1+658-1+709-1+747-1+760-1+832-1+1063-1+1074-1+1119-1+1183-1+
1229-1+1271-1+1291-1+1305-1+1314-1+1340-1+151A-1+++++++';
GA:=G1;
For f:=1 to 37 Do begin
  h:=pos('+',GA);
  o:=length(GA);
  NT:=GA;
  Delete(NT,h,o-h+1);
  q:=length(NT);
  Delete(GA,1,q+1); {löscht den ersten Bildnamen aus GA}
  IF f=20 Then GA:=G2;
U:=NT;
  Open(U);Titel:=WindowTitle;Messnummer:=Titel;x:=99;
  l:=length(Messnummer); l:=l-1;
Delete(Messnummer,l,2); {liefert die reine Grabnummer}
  SS:='-';
{+++++}
{Messung und Zählung der Kanalflächen}
{+++++}
  For m:=1 to 2 Do begin {Festeinstellung zur Analyse von 2 Bildern pro
    Individuum;}
    while x<99 Do begin {d.h. es handelt sich nicht um das erste Bild }
      KK:=concat(m);l:=length(KK);Delete(KK,1,l-1);
{errechnete Zählziffer wird in
einen String umgewandelt, dessen Länge genau auf die Zählziffer beschnitten
werden muss, da die Stringumwandlung Leerzeichen einfügt}
      U:=concat(Messnummer,SS,KK); {liefert Ladetitel}
      Open(U);
      x:=99;
    end;
    x:=1;
    SetPalette('Grayscale');
    AutoThreshold;
    MakeBinary;
    Invert;
    SetScale(0.426,'µm'); {Skalierung für 4x Mikroskopvergrößerung +
      2x Photookular}

    SetOptions('Area');
    SetParticleSize(10,999999);
    AnalyzeParticles('labelresetinclude');{Messen aller Kanalflächen}
    Particles:=rCount; k:=k+Particles; {k: Anzahl der Kanäle auf diesem Bild}
    For i:=1 to Particles Do begin
      A2:=A2+rArea[i];
    end; {i}
  DisposeAll;

```

```

end; {m}
{+++++}
{Porositätsberechnung und Export}
{+++++}
A1:=14726256; {Fläche zweier Bildausschnitte }
Poro:=100*A2/A1; {wird berechnet als die Porosität einer aus den Einzelbildern
zusammengesetzten Fläche! }
AK:=round(A2);
AA:=round(A1);
Open('Porosität');
Write(Messnummer,',');
Write(Poro:4:2);
Writeln(';k,','AA,','AK);
Save;
Dispose;
k:=0;    {Variablenrücksetzung für das nächste Individuum}
A1:=0;
A2:=0;
end; {f}
End; {Programmende}

```

Macro 'Export vorbereiten';

Begin

```

  NewTextWindow('Porosität',500,100);
  Writeln('GrabNr.',';','Porosität %',';','Kanäle',';','Analysefläche',';','Kanalfläche');
  Save;
  Dispose;
End; {Programmende}

```

Macro 'Trabekelanalyse' siehe Kapitel 5.5.3.

A4. Osteoporosestatuswerte

Wenigumstadt Frauen		Wenigumstadt Männer		Altenerding Frauen		Altenerding Männer	
Grab Nr.	O.-Status	Grab Nr.	O.-Status	Grab Nr.	O.-Status	Grab Nr.	O.-Status
5	0.51	14	-0.94	78	0.98	55	0.41
10	-0.13	20	1.90	118	-0.48	71	-1.29
25	-0.14	42	-0.49	128	0.65	92	0.60
57	-0.51	47	-1.40	143	-1.65	106	-0.37
67	-0.88	53	-1.13	146	-0.57	135	0.83
71	-0.64	64	0.00	192	0.59	154	0.38
78	-0.24	66	1.25	201	0.66	290	-0.89
79	1.30	70	-0.09	205	-0.91	296	0.74
85	0.69	73	-0.36	211	-1.07	320	1.30
86	-2.57	77	0.37	220	0.00	323	-0.45
101	1.48	95	1.08	224	-0.38	340	0.43
102	-0.65	117	0.65	231	1.10	344	0.93
104	0.05	118	-0.03	245	0.90	419	-0.66
106	-0.21	119	-1.39	264	-0.95	471	-1.40
108	-0.03	121	-1.66	294	0.12	529	0.12
110	0.95	141	-0.81	343	1.24	566	-0.13
129	0.06	143	-0.41	452	-1.76	655	-0.04
131	-2.38	152	0.28	532	-0.41	657	-0.48
140	0.24	158	-0.56	576	-1.54	725	-3.09
155	-0.34	166	0.02	625	0.74	734	-0.26
159	-0.62	178	0.79	634	0.08	740	0.06
161	-0.70	206	1.16	658	-1.17	808	0.16
171	-0.39	216	0.82	709	-0.80	848	0.22
185	-0.67	225	2.32	747	2.12	860	0.83
188	0.91	239	-0.20	760	-1.28	903	0.47
205	1.55	245	-0.88	832	-0.14	905	0.58
208	-1.43	251	-1.21	1063	0.07	947	1.76
215	1.63	258	0.49	1074	0.64	1017	-0.23
221	1.28	6/7	0.45	1119	1.00	1019	0.84
253	0.16			1183	-0.10	1027	0.81
254	-0.14			1229	1.22	1034	1.63
257	0.35			1271	0.91	1037	-1.41
84A	0.13			1291	-0.21	1045	1.39
84B	1.37			1305	1.35	1078	1.13
				1314	0.01	1085	-0.47
				1340	0.85	1090	-2.32
				151A	-1.81	1107	-0.70
						1123	-0.85
						1154	0.42
						1169	-1.08
						1179	-0.26
						1285	-0.56
						1318	-0.79
						1331	0.67
						1339	0.98

Tabelle 9. Osteoporosestatuswerte des Wenigumstadter und Altenerdinger Untersuchungskollektivs

A5. Sozialstratigraphische und chronologische Gruppenbildung

Wenigumstadt Grab Nr.					Altenerding Grab Nr.				
wohlha-	Vergleichsgruppe		5. Jh.	7./8. Jh.	wohlha-	Vergleichsgruppe		5./6. Jh.	7. Jh.
10	5	216	42	5	92	71	860	78	55
47	14	221	70	10	55	78	903	92	135
57	20	225	73	14	106	118	905	106	143
73	25	239	106	20	128	135	947	128	211
86	42	245	141	47	146	143	1017	146	220
102	53	251		53	192	154	1019	154	231
104	64	253		57	201	205	1027	192	245
106	66	254		64	224	211	1034	201	264
118	67	258		78	343	220	1037	224	419
141	70	6/7		79	625	231	1063	294	709
159	71	84A		86	658	245	1074	296	747
205	77	84B		95	1045	264	1078	343	848
257	78			102	1119	290	1085	344	860
	79			104	1285	294	1090	452	903
	85			108	151A	296	1107	471	1034
	95			110		320	1123	532	1045
	101			117		323	1154	566	1063
	108			118		340	1169	625	1078
	110			119		344	1179	634	1154
	117			121		419	1183	655	1285
	119			129		452	1229	657	
	121			152		471	1271	658	
	129			158		529	1291	760	
	131			159		532	1305	832	
	140			166		566	1314	947	
	143			171		576	1318	1074	
	152			178		634	1331	1085	
	155			185		655	1339	1090	
	158			205		657	1340	1119	
	161			206		709		1123	
	166			215		725		1183	
	171			225		734		1271	
	178			239		740		151A	
	185			251		747			
	188			253		760			
	206			254		808			
	208			257		832			
	215			258		848			

Tabelle 10. Zuteilung von Individuen des Wenigumstadter und Altenerdinger Untersuchungskollektivs zu sozialstratigraphischen und chronologischen Gruppen.

A6. Messdaten der Schnittdicketestreihen

Grab Nr.	Schnittdicke μm	Trabekelfläche im Beckenkamm μm^2
25	68	1468708
25	75	1370136
25	90	1871460
25	101	1875791
25	103	1699276
25	118	1444319
25	140	1723925
25	175	2220795
102	60	2051832
102	75	2452915
102	100	2258312
102	145	2629380
102	205	2727894
740	68	2255036
740	85	2672045
740	95	2158921
740	100	2565146
740	108	2671684
740	110	2908624
740	120	2899047
740	122	2679429
740	150	3120942
740	170	3193599
740	185	3452225
848	58	1106342
848	70	1517911
848	80	1069283
848	90	1515710
848	112	1786443
848	115	1483947
848	122	1586720
848	130	1186718
848	132	1585131
848	148	1555212
848	150	1384824
1305	70	2580170
1305	82	2477532
1305	90	2606417
1305	100	2762233
1305	112	2677098
1305	118	3208656
1305	130	3501462
1305	150	3522110
1305	155	3922444

Tabelle 11. Messdaten der Schnittdicketestreihen.

Stichwortverzeichnis

A

Altenerding 18
 Altersatrophie 2, 3, 12
 Altersbestimmung 12, 19, 41, 70
 Altersklassen 19

B

basic multicellular units 4
 Beckenkamm 22
 Beckenkammbiopsie 22
 Beckenkammspungiosa 45
 Belegungsphase 19
 Bestimmtheitsmaß 39
 Bewegungsmangel 7, 8
 Bildanalysesystem 9
 Bildauflösung 25
 Bildbearbeitungsprogramm 25, 26, 27
 Bilddateien 25
 Bildschirmauswertung 26
 Bildstörungen 84
 Bildtitel 27, 29, 30
 BIODUR 23
 BMD-Werte 2, 3, 9, 97
 BMU 4
 Bodensedimente 23
 body mass index 8

C

Chronologie 58

D

Dateigröße 27
 Dekomposition 14, 78
 Dekompositionsprozesse 12, 30, 83
 Delesse 10, 36
 Dentition 26
 digitale Bildverarbeitung 83
 Digitalkamera 25
 Doublingartefakte 27
 DPA 9
 dual photon absorptiometry 9

dual x-ray absorptiometry 9

Dünnschnitte 23

Dünnschnittpräparate 9

DXA 9, 10, 13, 82

E

Epoxidharz 23

Ernährung 12, 105

Ernährungsrekonstruktion 19, 106

Ernährungsweise 8, 15, 105

F

Femurcompacta 22, 49

Filterparameter 85

Filterungsprozesse 84

Frakturrisiko 1, 2, 3, 9, 10, 99

Framing-Effekte 54, 57

Friedhofsgröße 19

G

genetische Prädisposition 7

Indexkomponentengewichtung 94

Grabausstattung 58

Gräberchronologie 33, 58

Gräberfeld 19

Grabraub 18, 33, 79

H

Haverssche Kanäle 4, 80

Histomorphometrie 9, 10, 14, 36, 82

histomorphometrische Analyse 27

histomorphometrische Daten 41, 128

histomorphometrische Messparameter
16

Holmes-Projektionseffekt 34, 75, 76

hypertrophe Atrophie 109

I

ideopathische Osteoporose 7

Immobilisationsosteoporose 110

Immobilität 7, 8, 11

Indexwerte 31, 37, 53, 65, 93, 106

Innenlochsägemikrotom 23

Isotropie 76

J

Jahresringe 12

K

Kalziumbilanz 8

Killerosteoklasten 4

Knochen 4

Knochenanbauprozesse 10

Knochenbiopsie 9, 13

Knochenmassenverlust 4, 102

Knochenmineraldichte 1, 9, 13, 105

Knochenproben 21

Knochenstatus 8, 52, 99

Knochenumbau 4

Knochenumbauraten 81

Compactaporesität 4

Kompressionsbrüche 56

Korrekturfaktoren 60, 62

Korrelationskoeffizienten 38

Korrelationsmatrizen 132

Corticalisdicke 4

Kortikoidtherapie 7

L

Lactation 8

Lebensbedingungen 15, 18, 101

Lendenwirbelkörper 22

Lendenwirbelkörperspongiosa 42

Lifestyle-Faktoren 12, 15, 17

Listings 136

M

Macroprogramm 86, 87

Macroprogrammiersprache 27, 86

Makroprogramm 136

Materialerfüllungsgrad 51

Materialerhaltungszustand 14

Menopause 8, 10, 44, 103

Microwearanalyse 18

N

NIH IMAGE 27

O

Oberschenkelcompacta 22

Osteoblasten 4, 10

Osteoblasteninsuffizienz 4

Osteogenesis imperfecta 7

Osteoid 4

Osteoidsäume 36, 61

Osteoklasten 4, 10

Osteomalazie 109

Osteonerfüllungsgrad 81

Osteopenie 2, 108

Osteophytenbildung 56

Osteoporose 1

Osteoporosedefinition 1, 3

Osteoporoseformen 5, 6, 7, 10, 99

Osteoporoseprädisposition 33

Osteoporosestatus 31, 32, 52, 65, 94,
96, 107

Osteoporosestatuswerte 141

Ö

Östrogenspiegel 6, 8

P

Parameterkombination 93

Parameterstandardisierung 31

Parodontitis 21

Parodontose 21

Partus 8

peak bone mass 1, 2, 7, 8, 56, 104

physische Aktivität 12, 111

Porosität 30, 31, 49

Positionseffekte 74, 75

postmenopausale Osteoporose 6, 109

präruptive Zementringe 26

Prämolaren 19, 21, 23, 71

Probenentnahmestelle 72

Q

QTC 9

quantitative Computertomographie 9

R

Referenzdaten 59

Regressionsgerade 31

Reihengräberfriedhöfe 15, 18

Reinigungsprozedur 23
Remodelling 4
Residuen 32
Resorptionslakunen 4
Resorptionsmuster 4
Rippen 21, 51
Rippenmaterialerfüllungsgrad 29, 31
Rippenproben 21
Risikofaktoren 6, 7, 8, 13
Risikofaktorenkonzept 7, 17
Röhrenknochen 4, 8
Röntgenaufnahmen 37
Röntgenfilme 38

S

Schmutzpartikel 85, 92
Schnittdicke 23, 24, 35, 59, 60, 75, 143
Schnittdicketestreihen 35, 39, 59, 60, 143
Schnittebene 75
Sedimentauflagerungen 28, 78, 79
Sedimenteinspülungen 78
Segmenteffekte 73
Seiteneffekte 73
sekundäre Osteoporose 7
senile Osteoporose 6
Silberfärbung 24, 28, 78
single photon absorptiometry 9
Sozialstratigraphie 33, 41, 58, 110, 142
SPA 9
Spongiosaproben 22, 34, 59
Spurenelementanalyse 19, 106
Statistik 38
Sterbealter 19, 20, 26, 31
Sterbealtersbestimmung 11, 12, 21, 26, 69
Stereologie 9
Stickstoffisotopenanalyse 107
Strukturparameter 10

T

Tabellenkalkulationsprogramm 29, 38
TBPf 29
Tetrazyklin 10
Tonwertkorrektur 28
Totenruhe 14
Trabekel 4, 5, 29
Trabekelfläche 31, 42, 45
Trabekelkonturerosionen 85
Trabekelperforationen 4, 5
Trabekelumfang 43, 47, 85
Trabekelvernetzung 29
Trabekular Bone Pattern faktor 29, 43, 47
trabekuläres Knochenvolumen 10
T-score 3, 96

U

Umbaudynamik 10
Umbauzyklus 4
Umrechnungsfaktoren 35, 59
Untersuchungskollektiv 18
UV-Exposition 109

V

Variationskoeffizient 26
Vernetzungsgrad 5, 10, 29
Versinterungen 78, 79
Vitamin-D-Mangel 109

W

Welch-Test 39
Wenigumstadt 18

Z

Zahnerkrankungen 21
Zahnsteinbildung 21
Zahnwurzelzement 12, 21, 26
Zahnwurzelzementmethode 15, 18, 19, 41, 69
Z-score 2, 3, 99

