

Untersuchungen zur Bestimmung der Liegezeit von Skeletteilen

Von

S. BERG und W. SPECHT

Mit 18 Textabbildungen (davon 3 farbigen)

(Eingegangen am 23. Mai 1957)

Über die Dekompositionsvorgänge am Knochen ist bisher kaum systematisch gearbeitet worden. Demzufolge liegen auch bis heute keine rechten Angaben darüber vor, nach welchen Gesichtspunkten der Gutachter bei der Beurteilung der Liegedauer von Skeletteilen vorgehen könnte, wenn man von den bekannten, die subjektive Prüfung der äußeren Beschaffenheit des Knochenmaterials betreffenden Daten absieht, welche zuletzt von WALCHER ausführlich zusammengefaßt wurden. Nach dem Hinweis von BEUMER auf Beziehungen zwischen Knochenalter und Gelingen der Uhlenhuthschen Reaktion hat u. W. erst wieder WEINIG das Problem im Jahre 1950 aufgegriffen, als er von NECKERMANN das Verhalten verschieden alter Knochen gegenüber UV-Licht und verschiedenen Farbstoffen am Querschnitt prüfen ließ. Die Untersuchungen von DETTMER, SCHMITT-RHODE und HABERICH über die mikrodensometrisch zu erfassende Änderung der Ultrastrukturdichte des Knochens beziehen sich nur auf die frische Leiche in den ersten Stunden p. m. und somit nicht auf das hier angesprochene Thema.

Da Zeitschätzungen an biologischem Material ja stets wegen ihrer Milieuabhängigkeit als problematisch zu gelten haben, ist es gut, möglichst viele, verschiedenartige, objektive Methoden anzuwenden, deren Ergebnisse als gemeinsames Gerüst der subjektiven Schätzung dienen können. Die objektive Beweisführung spielt nach unseren Erfahrungen auch für offensichtlich ältere Funde eine Rolle: Nicht nur kann die grobsinnliche Prüfung der Schwere und Festigkeit des Knochenmaterials bei Fehlen von Porositäten, Oberflächenusuren usw. zur Fehlbeurteilung führen, z. B. infolge speziell konservierender Einflüsse des anlagernden Erdmaterials; auch die Überzeugung des Juristen gelingt oft durch konkrete Analysendaten besser als durch die bloße Mitteilung des subjektiven Dafürhaltens. Dies sahen wir gelegentlich eines Exhumierungsfalles, bei dem an einer vom Täter als Vergrabungsplatz des Opfers bezeichneten Stelle, welche aber (wie sich später herausstellte) nicht die richtige war, zufällig Knochenteile eines neolithischen Hockergrabes

zutage gefördert wurden: Unser sofortiger Hinweis auf das augenscheinlich hohe Alter des ganz bröckeligen, mürben Skeletmaterials wurde von der anwesenden Untersuchungskommission einfach nicht akzeptiert; erst ein ausführliches Gutachten mit vergleichenden Analysenreihen vermochte Zweifel daran zu erwecken, daß man hier die Reste des Getöteten vor sich habe (völlig überzeugen ließ man sich freilich erst durch die Identifizierung prähistorischer Grabbeigaben).

Da wir in den letzten Jahren immer wieder aufgefundene Skeletteile zu begutachten hatten, verdichtete sich die Notwendigkeit zunehmend, die bekannten und auch neue methodische Gesichtspunkte an einem größeren Material systematisch zu überprüfen.

I. Methodik

Zur Verfügung standen 102 zuverlässig datierte menschliche Skelete bzw. Teile von solchen verschiedenster Herkunft, wobei für die Hauptreihe zu bemerken ist, daß die Knochen einheitlich reichlich mit Erde oder Zivilisationschutt bedeckt gewesen waren. War dies gelegentlich einiger Untersuchungsstücke nicht der Fall, rangieren diese in — wie sich zeigen wird, recht wichtigen — Nebenreihen. Die Auswertung wurde zunächst im wesentlichen auf korrespondierende Abschnitte des Oberschenkelknochens konzentriert. 57 Knochen stammten aus Grabauflassungen der Münchener Friedhöfe; 6 wurden von Herrn Prof. Dr. SCHLEYER aus seinem Bonner Material, 5 von Herrn Dr. JAROSCH aus Linzer Funden freundlichweise überlassen; 5 datierte Fälle aus dem laufenden Material des Bayerischen Landeskriminalamtes, 10 aus prähistorischen, 10 aus historischen Grabungsstätten in mittel- und südeuropäischem Boden (Alter bis 6000 Jahre) und 8 frische Vergleichsproben von Sektionsfällen ergänzten das Material. Die Auswertung erfolgte nach folgenden Gesichtspunkten:

A. Morphologische Methoden

1. Makroskopisch

- | | |
|---|------------------|
| a) Subjektive Einschätzung des Dekompositionsgrades | } am Querschnitt |
| b) Beobachtung der UV-Fluorescenz unter der Analysen-Quarzlampe | |
| c) Prüfung der Anfärbbarkeit der Knochensubstanz mit | |
| | { Indophenol |
| | { Nilblau |

2. Mikroskopisch

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Prüfung des Strukturzerfalls | } Delafield-Färbung |
| am histologischen Schnitt mittels | |
| | { Phasenkontrastverfahren |
| | { polarisiertem Licht |

B. Chemische Methoden

3. Bestimmung des Gesamt-Stickstoffs nach KJELDAHL
4. Bestimmung des Gesamt-Fettes (Ätherextraktion im Soxhlet)
5. Eiweiß-Präcipitin-Reaktion
6. Chemische, spektrographische und petrographische Untersuchung bodenkundlicher Beziehungen — Stoffaustausch Knochen \longleftrightarrow Erde

C. Physikalische Methoden

- | | | |
|---|---|---|
| 7. Prüfung des Materialverhaltens gegenüber Ultraschall mit dem Impuls-Echo-Verfahren | { | a) Ultraschallgeschwindigkeit
(V_L = Longitudinalgeschwindigkeit) |
| | | b) Schallwellenwiderstand |
| | | c) Schallabsorption (Dämpfung) |
8. Dichtebestimmung
9. Röntgen-Spektrogramm
10. Radiocarbon-Methode

Die Untersuchungen nach A 1 und 2 sowie C 7 und 8 wurden an allen Proben durchgeführt, die übrigen Verfahren kamen orientierend an verschiedenen Knochen zur Anwendung. Einzelheiten der Technik folgen bei den jeweiligen Abschnitten.

II. Ergebnisse

1. Die *subjektive Einschätzung des Dekompositionsgrades* wäre an unserem Material naturgemäß von vornherein dem Fehler der Befangenheit unterlegen, weil ja das Alter der Stücke dem Untersucher jeweils bekannt war, und ist deshalb nicht im einzelnen verwertet. Im großen ganzen fanden wir die Erfahrung bestätigt, daß die letzten Weichteilreste nach etwa 5 Jahren Lagerung an der Luft und rund 10 Jahren in der Erde verschwinden, wobei porös-humöse Böden und oberflächliche Lagerung den Zerfall fördern, während er durch lehmig-feuchtes Erdreich verzögert wird. So sahen wir z. B. nach 10jähriger Lagerung in 40 cm Tiefe eines Kies-Schotterbodens nur noch geringe Fettwachs-spuren an den Femurkondylen, in einem anderen Fall bei 10jähriger Lagerung im feuchten Lehm in 2,5 m Tiefe eine erst teilweise Skeletierung mit noch großen Partien kompakt-schmieriger Weichteilmassen.

Die Knochen aus den Münchener Friedhofsböden zeigten sich schon nach 8—9 Jahren völlig skeletiert, ohne oder mit nur geringen Markresten in Form von Fettwachs, der Knochen selbst trocken nach bereits durchlaufenem Fettdurchtränkungsstadium. Das Material mit Liegezeiten von 10—100 Jahren unterschied sich makroskopisch hinsichtlich Schwere, Festigkeit bzw. Härte, fehlender Oberflächenusuren usw. vielfach überhaupt nicht; ja sogar einige der 200—500 Jahre alten Knochen waren mit den Mitteln der grobsinnlichen Überprüfung von den 10 bis 20jährigen praktisch nicht zu unterscheiden. Einige der 15—50jährigen Stücke zeigten freilich, besonders im Kondylenbereich, schon deutliche Verwitterungserscheinungen und erschienen im ganzen leichter, trockener als die frischeren Knochen. Eine ausgesprochen mürbe, kreidig-eindrückbare Compacta trafen wir erst bei 1000- und mehrjährigen Knochen an, während mit dem Nagel zerdrückbare Spongiosastrukturen z. T. schon nach 50—100 Jahren, an bevorzugten Usur-Stellen auch noch früher, festzustellen waren. Andererseits fielen einige sehr

alte Knochen dolomitischer Lagerung (etwa 4000 Jahre) durch besonders gut erhaltene Festigkeit ohne eigentliche Petrifikation auf. Hierauf wird später noch ausführlich einzugehen sein; es wurde ja schon darauf hingewiesen, daß gelegentlich Täuschungsmöglichkeiten ungeahnten Ausmaßes auftauchen: Die subjektive Altersschätzung dieser fossilen Skeletteile neigte eher zu einer Datierung von einigen Jahrzehnten! Umgekehrt könnte die Entkalkung von Knochen in saurem Hochmoor (GABRIEL) eine wesentlich zu hohe Einschätzung der Liegezeit bedingen.

Die Prüfung der *Ultraviolett-Fluoreszenz* muß an frischen Sägeschnitten oder Anschliffen erfolgen, welche zweckmäßigerweise den ganzen Querschnitt erfassen; die Oberfläche des Knochens verliert nämlich schon nach verhältnismäßig kurzer Liegezeit die Fähigkeit, im Licht der Quarzlampe aufzuleuchten, während die inneren Bezirke der Compacta noch gut fluorescieren. NECKERMANN zog als Kriterien für die Beurteilung der Liegezeit folgende Punkte heran:

a) Die Intensität und Helligkeit des Aufleuchtens (je stärker, desto kürzere Liegezeit).

b) Der blauviolette Farbton (von 5—20 Jahren leuchtend und an Stärke zunehmend, von da an mehr ins Graue und Stumpfe hinübergehend).

c) Die Ausbildung einer gelben Randzone (je stärker und breiter, desto längere Liegezeit).

d) Der allmähliche Umschlag ins Gelbbraune (nach 30 Jahren).

e) Der rotbraune Farbton (bei Knochen mit sehr langer Liegezeit).

Wir haben erwartungsgemäß an unserem Material die auch in der Archäologie bekannte Tatsache, daß die Fluoreszenz mit zunehmender Liegedauer abnimmt, im großen und ganzen bestätigt gesehen. Von dieser Regel gibt es aber Ausnahmen, deren Existenz zur Zurückhaltung in der Bewertung der UV-Fluoreszenz als Einzelbefund zwingt: Ganz frische Knochen, je nach Lagerung auch noch Skeletteile aus der Dekompositionsphase der ersten Jahre, können relativ schwach aufleuchten; verhältnismäßig alte Knochen (1000- und mehrjährig) wiederum können auffallend intensiv fluorescieren. Der erstere Befund scheint vom Grad der Fettdurchtränkung abhängig zu sein, welche offenbar einen abschwächenden Einfluß hat; der letztere hängt mit dem Ausmaß und Charakter der Transmineralisationsvorgänge zusammen: stärkere Carbonatisierung führt zur Intensivierung der Fluoreszenzeigenschaften. Den Befund NECKERMANNs, daß die Entwicklung von der starken, weißgelblichen Fluoreszenz über eine von 5—20 Jahren Liegedauer zunehmend blauviolette Periode schon nach 30 Jahren zu einer Abblässung ins Gelbgraue und nach 100 Jahren ins homogen Rotbraune gehe, konnten wir nur teilweise bestätigen; auch die Ausbildung einer braungelben Randzone bei 20jährigen Knochen wird sich

wohl nur ausnahmsweise finden. In diesen Detailbeobachtungen zeigt sich der Fehler der kleinen Zahl (NECKERMANN hatte nur 10 Knochen zur Verfügung), eventuell auch ungenauer Datierung einzelner Stücke. Die blauviolette Tönung der Fluoreszenz charakterisierte bei unseren Knochen auch schon die früheste Phase; nur ausnahmsweise sahen wir ein ausschließlich weißgelbes Aufleuchten bei 1 oder 2 Jahre alten Knochen, dafür vorwiegend weißliche Fluoreszenz auch noch bei wesentlich älteren Stücken. Die blauviolette Tönung zeigte eine langsame Abnahme bis etwa zu Liegezeiten von 500—1000 Jahren mit zögernder Auflösung in fleckig unzusammenhängenden Inseln erhaltener Fluoreszenz innerhalb graubräunlicher, toter Flächen; ein Befund, den wir ausnahmsweise auch noch an mehrtausendjährigen Knochen bemerken mußten. Eine ins diffus Graubräunliche gehende Abblässung des Fluoreszenzbefundes wurde nur ganz vereinzelt auch schon an jüngeren Knochen gesehen. Eine gewisse schlecht qualifizierbare Irregularität der Fluoreszenzbefunde spiegelt sich auch in der auszugsweisen Wiedergabe der Protokolle in Tabelle 1 wieder.

Tabelle 1

Fall (Näheres vgl. Tabelle 8)	Liegedauer (Jahre)	UV-Fluoreszenz frisch hergestellter Femurquerschnitte
P 51—58	0	mittelstark oder schwach, violett, oft etwas rötlich
A 63	2	sehr stark, weißlich mit nur geringem bläulichem Unterton
A 62	3	stark, bläulichviolett
L 3	5	sehr stark, bläulich
M 60	9	mittel, grauviolett
M 61	9	sehr stark, weißlichviolett
B 2	10	gut, bläulich
L 4	10	sehr stark, weißbläulich
L 1	11	gut, bläulich, etwas fleckig
B 4	11	gut, bläulich, etwas fleckig
M 15	14	gut, weißlichviolett
M 18	18	stark, weißbläulich
M 41	20	stark, weißlichviolett
M 27	36	gut, bläulich, bräunliche Außen- und Innenzone
M 33	56	stark, weißlich mit bläulichem Ton
W 1—8	200—500	meist noch recht gut, bläulich, teilweise fleckig graubräunlich
Gr 30	1200	stark, weiß
K 1	1400	schwach, graugelblich mit breiter brauner Außenzone
Agr. 2	1900	schwach, weißlich
K 2	4000	schwach, graugelblich, ohne braune Außenzone
MLT	6000	0 bis schwach grauweißlich mit schmaler brauner Außenzone

Zur Prüfung der Anfärbbarkeit des Knochens mit Indophenol und Nilblau wurden nach NECKERMANN etwa 5 mm dick abgesägte Knochenscheibchen 20 min in eine 2%ige Lösung von Dichlorphenolindophenol in 70%igem Alkohol gelegt, dann nach kurzem Abspülen 10 min in 70%igem

Alkohol differenziert und nach 12stündiger Lagerung in Wasser trocken gelassen; ein weiteres Knochenscheibchen wurde 10 min mit 2%iger wäßriger Lösung von Nilblausulfat gefärbt, abgespült und etwa 12 Std in 1%iger Essigsäure gehalten. Die so behandelten Stückchen behalten in getrocknetem Zustand den erreichten Färbungszustand einige Zeit unverändert. — Von der Anfärbung der „Knochenporen“ haben wir nicht viel Brauchbares gesehen, konnten jedoch NECKERMANN'S Befunde

Tabelle 2

Fall (Näheres vgl. Tabelle 8)	Liegezeit (Jahre)	Anfärbbarkeit mit					
		Indophenol			Nilblau		
		innen		außen	innen		außen
P 53	0		—			rot	
A 63	2	rot	—	+	++	—	(+)
A 62	3	++	—	+	+	—	+
L 3	5	+		—	—		+
M 60	9		+++			(+)	
M 61	9		+++			(+)	
L 5	10		++		—		+
L 4	10		++			+	
B 2	10		+			+	
B 4	11		+			+	
L 1	11		+			++	
B 6	14		+			+	Außensaum +++
M 41	20		++			(+)	
M 27	36		++			+	
M 33	56		+			+	
W 1	200—500		+			++	Außensaum +++
			mit Inseln				
W 5	200—500		++			+++	
W 8	200—500		+	++		++++	
Gr. 48	1200		(+)			+++	
K 1	1400		—			++++	
Agr. 1	1900		—			++++	
MLT	6000		—			++++	

über die Abnahme der Indophenolfärbung mit zunehmender Liegezeit bei steigender Anfärbbarkeit der Knochensubstanz mit Nilblau weitgehend bestätigten. Auch hier ergaben sich allerdings für die jüngeren Knochen Unregelmäßigkeiten, welche sich durch wechselnde Redoxlage und p_{H} -Verhältnisse im Verlauf von Fäulnis und Fetttransgression erklären lassen: Ganz frische und wenige Jahre alte Knochen verhielten sich vielfach gegenüber Nilblau *und* Indophenol negativ; Markspuren an der Innenseite färbten sich teils stärker, teils mit Farbumschlag, teils gar nicht an; auch in den peripheren gegenüber den zentraleren Zonen der Compacta zeigten sich teilweise Unterschiede in der Anfärbbarkeit.

Erst etwa ab einer Liegedauer von 10 Jahren fand sich ein gesetzmäßiger Ablauf der Anfärbarkeit mit den beiden Farbstoffen im obigen Sinne. Tabelle 2 bringt eine Reihe von Befundbeispielen, wobei besonders diejenigen der älteren Stücke, da untereinander kaum abweichend, je für die ganze Gruppe gelten können.

Es fällt auf, daß über eine verhältnismäßig große Zeitspanne hinweg — etwa von 10—100 Jahren Liegedauer — der Knochen von beiden Farbstoffen ziemlich gleich gut angefärbt wird. Da aber auch hier geringe Differenzen zu verzeichnen waren, wird man nur klare Überlegenheiten des einen oder anderen Farbstoffes verwerten dürfen, womit man einerseits ungefähr die Phase zwischen 5 und 20 Jahren, andererseits beiläufig diejenige von 100—1000 und endlich eine solche von weit über 1000 Jahren Liegezeit abgrenzen kann.

Man kann übrigens auch — worauf wir bei der Prüfung von Falsifikaten prähistorischer Sammlungsgegenstände kamen, weil hier keine größeren Materialstücke entnommen werden durften —, eine Spur Feilmehl des zu untersuchenden Knochens unter dem Deckglas durch tropfenweises Zufließenlassen und Wieder-Absaugen der Lösungen färben und das Verhalten der Knochenpartikelchen unter dem Mikroskop prüfen; am besten zählt man gefärbte und ungefärbte Partikel gegeneinander aus, da man auf diese Weise sogar zu einem zahlenmäßigen Ausdruck der FarbadSORPTION gelangt. Dabei genügt es meist, das Verhalten gegen Nilblausulfat zu prüfen; rezentes Knochenmaterial färbt sich nicht oder nur bis zu einem gewissen Prozentsatz an, während alt- und prähistorische Stücke ein 100%iges Anfärbungsergebnis zeitigten.

2. Die *mikromorphologische Prüfung des Strukturzerfalls* erfolgte an entkalkten Femur-Querschnitten, welche meist nach der auch von FOERSTER, GOLDBACH und HINÜBER verwendeten Methode mit Delafield-Hämatoxylin behandelt wurden.

Die gleichen Schnitte wurden jeweils auch im Phasenkontrast-Verfahren und polarisierten Licht untersucht, nachdem sich in Vorversuchen gezeigt hatte, daß die Ergebnisse der letzteren Methoden im Prinzip die gleichen sind, ob man nun am nichtentkalkten Dünnschliff, am ungefärbten oder gefärbten histologischen Schnitt arbeitet — vorausgesetzt natürlich, daß Quellungsvorgänge ausgeglichen werden; die Doppelbrechung der Lamellensysteme stellt sich dann am entkalkten Schnitt sogar distinkter dar als am Schliff. Die Auswertung von Dünnschliffen nach mineralogischen bzw. petrographischen Gesichtspunkten stand nur vereinzelt im Mittelpunkt der Beurteilung, nämlich wenn sich aus Widersprüchen zwischen anatomischem Befund und geologisch-archäologischer Datierung der Verdacht einer exogenen Neu-Mineralisation des Knochenmaterials ergab.

Als erster — sozusagen im Nebengang — erhobener Befund dieser vergleichend-histologischen Untersuchungen ergab sich, daß ältere Knochen bei der Salpetersäure-Behandlung in der Regel viel schneller entkalkt werden als frischere (Tabelle 3).

Der Beginn des postmortalen Strukturzersatzes im Bereich der Compacta zeigte sich bei den Knochen aus den Münchener Erdgräbern nach einer etwa 10jährigen Phase, in der allenfalls von einem Deutlicherwerden der Lacunen in den konzentrischen Lamellensystemen gesprochen werden kann, mit dem zögernden Auftreten von Zusammenhangsverschiebungen innerhalb der Schaltlamellenfelder bzw. von Versinterungserscheinungen an den äußeren Grundlamellen. Von geringen Schwankungen abgesehen, blieb der Befund innerhalb der ersten Jahrzehnte praktisch unverändert. Wir sahen zwar an verschiedenen Knochen, z. B.

Tabelle 3

Fall	Lebensalter (Jahre)	Liegezeit (Jahre)	Entkalkungszeit (Std)
P 55	26	0	84
P 53	67	0	86
A 63	74	2	76
A 62	46	3	80
M 61	62	9	78
L 1	?	11	74
B 2	?	11	72
M 15	78	14	70
M 29	69	25	60
M 45	71	35	65
M 11	43	52	50
W 2	?	200	48
K 8	?	900	20
Gr. 30	?	1200	4
MLT		4000—6000	2

mit Liegezeiten von 10, 20, 30 und 50 Jahren, Differenzen im Sinne einer eindeutigen Progredienz des Strukturzerfalls; diese Veränderungen wurden aber bei anderen Knochen, auch solchen gleicher Lagerungsverhältnisse, vermißt, so daß von einem gesetzmäßigen Strukturwandel innerhalb der ersten Jahrzehnte kaum die Rede sein kann. Erst etwa vom 4. postmortalen Jahrzehnt ab sahen wir neben der Ausbildung von Diskontinuitäten im Schaltlamellenbereich auch die Entwicklung luftgefüllter Zerfallswaben in den konzentrischen

Lamellensystemen von den Haversschen Kanälen aus. Der ungemein langsame Zersatz der fibrillären Grundsubstanz in den Speziallamellen der Osteone äußert sich in einem fortschreitenden Undeutlicherwerden eben der charakteristischen Lamellenzeichnung zugunsten einer Entwicklung radiär oder irregulär angeordneter Sinterlinien; schließlich — dies erst bei Jahrhunderte währendender Lagerung — sieht der ganze Querschnitt verwaschen, oft wie gefältelt aus, so daß man Mühe hat, mit der gewöhnlichen Optik die lamelläre Schichtung noch zu erkennen. Manchmal sind auch in noch späteren Stadien, im Gegensatz zu der vorerwähnten zentrifugalen Auflockerung, gerade die innersten Ringe um die Haversschen Kanäle noch gut erhalten. Dies könnte daran liegen, daß Mineralgele (Brauneisen, Manganate, Carbonate) im Rahmen einer schon langsam beginnenden Petrifikation zuerst auf dem Wege der ehemaligen Gefäßröhren vordringen und auf den Zersatz der mikroanatomischen Struktur lokal hemmend einwirken. In den Abb. 1—5 sind Beispiele der verschiedenen Zersatzformen wiedergegeben, welche offenbar nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ von den Lagerungsbedingungen

abhängig sind. Die von JERUSALEM im Randbereich von Makrodefekten des Schädeldaches keltischer und alemannischer Skelete gefundene Lamellen-Dissoziation mit „pinselförmiger Aufspaltung“ haben wir an

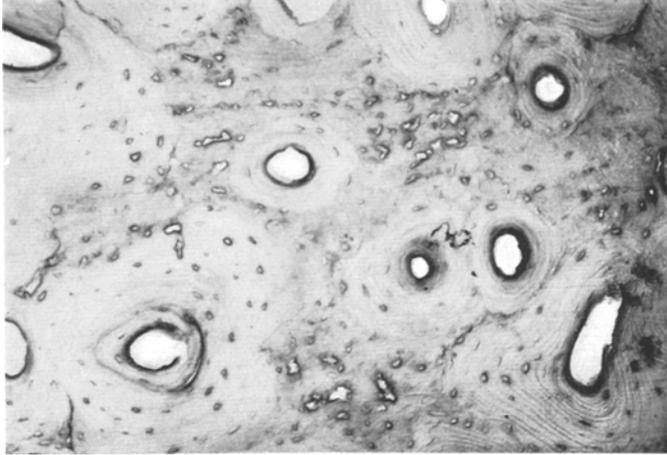


Abb. 1. Postmortaler Strukturersatz am Femur-Querschnitt. Delafield-Färbung, etwa 120fach. 1. Form: Beginn mit Ausbildung von Zerfallswaben in den Schaltlamellenfeldern (L 4, 10 Jahre Erdgrab, peripherer Osteongürtel)

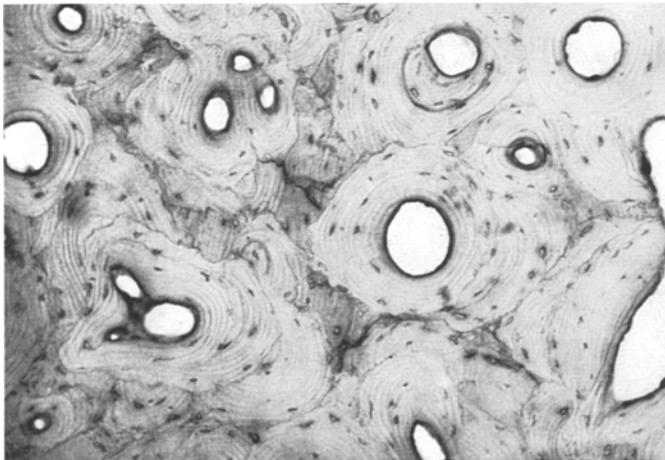


Abb. 2. Postmortaler Strukturersatz am Femur-Querschnitt, 1. Form: Beginn mit Ausbildung von Sinterlinien in den Schaltlamellen-Feldern (M 32, 14 Jahre Erdgrab, peripherer Osteongürtel)

unserem Material nie gesehen, ebensowenig eine Durchwachsung mit pflanzlichen Mikroorganismen oder Fraßstellen von Insektenlarven. — Mit der Phasenkontrastoptik sind die Lamellen in der Regel besser und

auch noch an Stellen erkennbar, wo dies im normalen gefärbten Präparat nicht mehr der Fall ist. — Die beste Darstellung ergibt sich bekanntlich bei Anwendung der Polarisationseinrichtung durch die Substanz- und

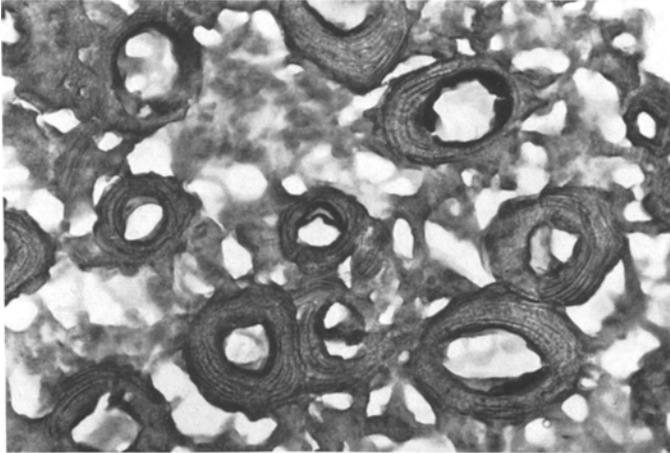


Abb. 3. Postmortaler Strukturzerfall am Femur-Querschnitt, 1. Form: Fortgeschrittener Zerfall mit elektiver Erhaltung der inneren Speziallamellen (Gr 43, 1200 Jahre Erdgrab)

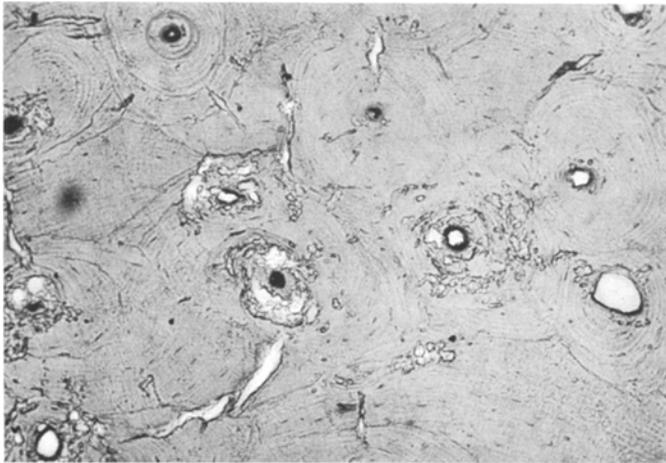


Abb. 4. Postmortaler Strukturzerfall am Femur-Querschnitt, 2. Form: Beginn mit Ausbildung von Zerfallswaben in den Osteonen (M 45, 35 Jahre Erdgrab)

Form-Doppelbrechung der schrägverlaufenden, sich kreuzenden Fibrillensysteme innerhalb der Knochenlamellen.

Die Stärke der Doppelbrechung innerhalb der Osteonquerschnitte unterliegt einer rhythmischen Schwankung, welche die einzelnen Lamellen scharf hervortreten läßt. Die optische Orientierung der Knochensubstanz in den Haversschen

Systemen entspricht jener eines „Sphärokristalls“, dessen Achse mit der Längsachse der Säulen zusammenfällt. Bei gekreuzten Nicols ergibt sich daher unter dem Polarisationsmikroskop ein entgegengesetztes optisches Verhalten der beiden Sektorenpaare NW/SO auf der einen, NO/SW auf der anderen Seite. Das erstgenannte Sektorenpaar wird durch Einfügungen des Gips-Kompensators blau gefärbt, zeigt also negative Doppelbrechung in der Radialrichtung, das zweite Sektorenpaar wird mit dem Kompensator gelb, besitzt also positive Doppelbrechung in der Radialrichtung. Da nur die Fibrillen aufleuchten, welche parallel zu einem der schrägen Durchmesser angeordnet sind, werden die Sektoren durch ein dunkles Kreuz getrennt, welches seinerseits den Hauptebenen der gekreuzten Nicols entspricht (SCHMIDT).

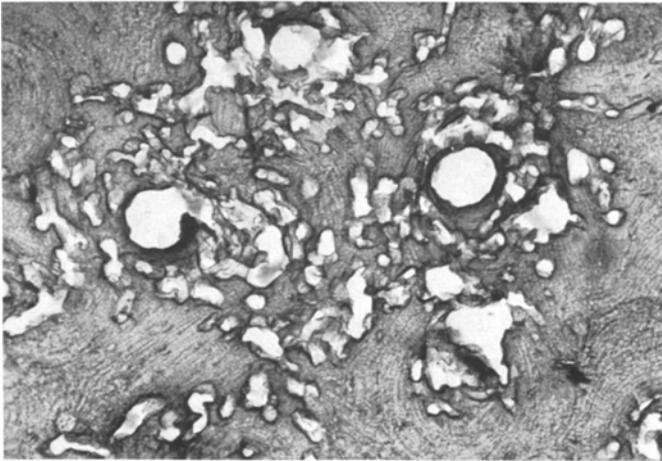


Abb. 5. Postmortaler Strukturzersatz am Femur-Querschnitt, 2. Form: Fortgeschrittener wabiger Zerfall der Osteonzentren (K 3, 1200 Jahre Erdgrab)

Wir fanden bei den Reihenanalysen der Schnitte im polarisierten Licht, daß die Fibrillensysteme der Knochenlamellen noch viel widerstandsfähiger sind, als man dies nach den Färbungsbefunden annehmen konnte: auch an den mehrtausendjährigen Knochen verschiedener prähistorischer Fundstätten, welche normaloptisch nur noch einen fast amorphen Brei von Strukturtrümmern zwischen den auch hier noch sichtbaren Lücken der Haversschen Röhren erkennen ließen, so daß gegebenenfalls sogar die Organdiagnose in Frage gestellt wäre, erschienen im polarisierten Licht bei gekreuzten Nicols noch vielfach erhaltene Lamellenbilder (Abb. 6). — Verfolgt man das polarisationsoptische Verhalten der Knochenschnitte durch die verschiedenen Phasen des postmortalen Abbaus, so sieht man, daß jene uncharakteristische Versinterung der Struktur teilweise von einer Isotropisierung der Knochen säulen begleitet ist, indem das leuchtkräftige Bild des konzentrischen Schalenbaus in frischen Knochen allmählich in die homogen violette Tönung der Zwischenschichten mit herabgesetzter Doppelbrechung

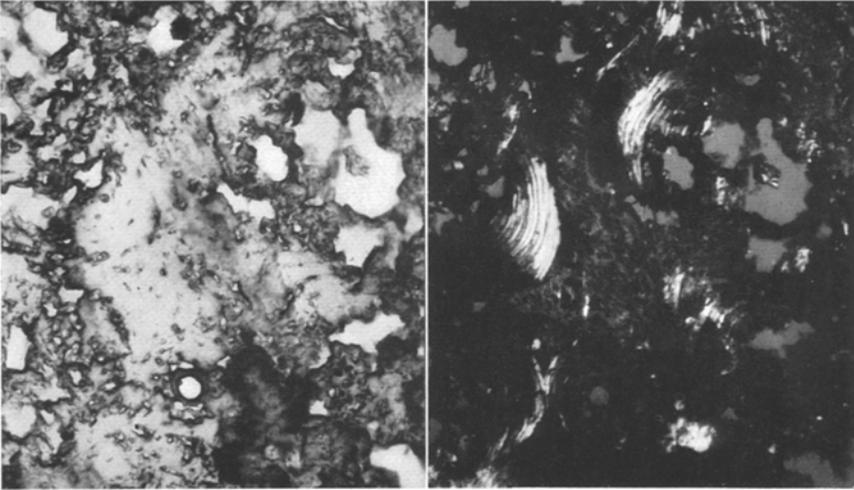


Abb. 6. Femur-Querschnitt A 3, 4000 Jahre Lagerung im Erdgrab. Links: Delafield-Färbung, etwa 120fach. Haverssche Kanäle erweitert, Knochensubstanz versintert und wabig durchsetzt, keine Lamellenzeichnung mehr erkennbar. Rechts ebenso, jedoch im polarisierten Licht bei gekreuzten Nikols. Noch deutlich erhaltene Doppelbrechung in verschiedenen Bereichen konzentrischer Lamellen-Systeme

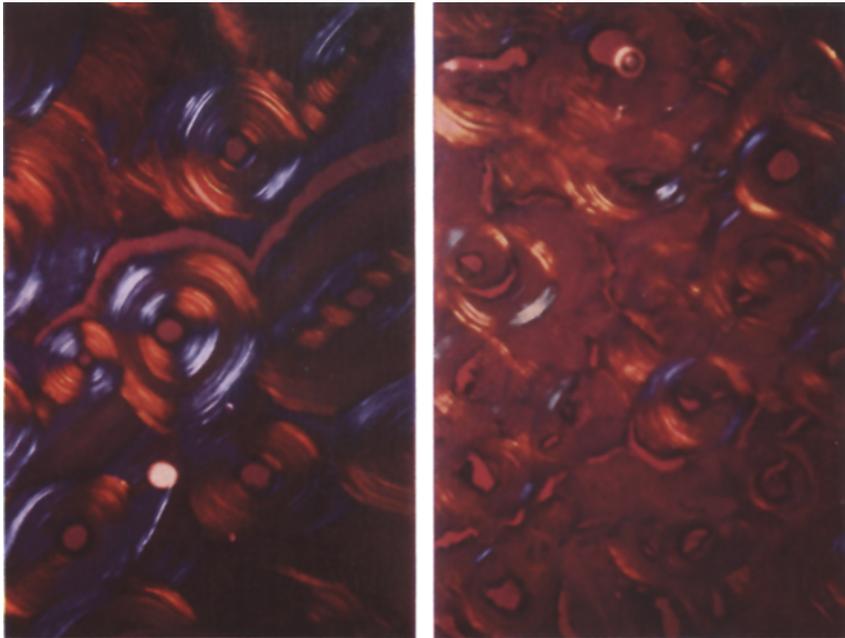


Abb. 7

Abb. 8

Abb. 7. Femur, 3 Jahre Erdgrab. Entkalkter Schnitt im polarisierten Licht bei gekreuzten Nikols, mit Gipskompensator. Vollständig erhaltenes Lamellenbild. Vergr. etwa 120fach
 Abb. 8. Wie Abb. 7, 200 Jahre Erdgrab. Bei noch recht gut erhaltenem Strukturzusammenhang fortgeschrittene Isotropisierung durch Fibrillenzerfall, Reduktion der negativ doppelbrechenden Sektorenpaare zugunsten der positiv doppelbrechenden Sektorenpaare

übergeht; auch die Gegensätzlichkeit der Sektoren verliert sich, so daß das gesamte Reflexbild in zunehmendem Maße unregelmäßig ausgebreitet tote Zonen aufweist (Abb. 7 und 8). Keineswegs immer beginnen diese Veränderungen nun in den äußeren bzw. inneren Schichten der Compacta, wenngleich diese Art der Zerfallsprogression auch wohl die häufigste ist: wir sahen z. B. in den 200—500 Jahre alten Knochen historischer Münchener Friedhöfe vorwiegend einen fortgeschrittenen, wabigen Zersatz der äußeren und inneren Lamellensysteme, während im zentralen Bereich noch ein tadellos erhaltener Osteongürtel mit kaum veränderten optischen Eigenschaften angetroffen wurde; in anderen

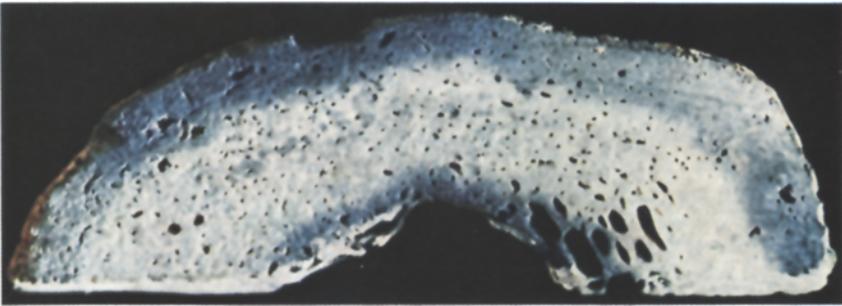


Abb. 9. Berliner Blau-Reaktion am calcinierten Femur-Querschnitt (4000jährige Lagerung im Erdgrab)

Fällen sah man, offenbar unter dem bereits erwähnten konservierenden Einfluß von peripher vordringender Mineralisation ein überraschend gutes Erhaltensein in morphologischer und optischer Hinsicht gerade der äußersten Compactaschicht (K 9). In einem 4000jährigen Femurstück (K 4), welches eine überraschend gute Erhaltung seiner fibrillären Strukturelemente aufwies, wie sie sonst nur bei den 200—500jährigen Knochen gesehen wurde, fanden wir nach 3stündiger Calcination auf Glimmerplatte im Muffelofen bei 800° die oberflächliche Compacta in 1—2 mm Tiefe homogen bläulichgrünlich verfärbt. Während bräunliche, außer dem subperiostalen Bereich meist auch den Markkanal umscheidende, die Berlinerblau-Reaktion gebende Niederschläge allenfalls auf Relikte des Bluteisens, wahrscheinlicher aber auf eine Sekundär-impregnation mit Eisensalzen zurückgeführt werden könnten, handelte es sich hier um Manganatschmelzen, wie sie als Oxydationsschmelzen von Mangansalzen im vorliegenden Falle mit Calciumcarbonat entstanden (Abb. 9). Der Zusammenhang beider Befunde war augenscheinlich, weil sich die Zone der auffälligen morphologischen Erhaltung mit der Mn-Zone deckte, und auch bei anderen, gleichalten Stücken ohne entsprechenden Manganbefund ein vielfach stärkerer Zersatz festgestellt wurde.

In diesen Befunden zeigt sich eine bemerkenswerte Parallele zu der eingangs erwähnten Beeinflussung der Makro-Dekomposition von Skeletmaterial durch die Einbettungsmassen. Ebenso wie uns die Manganatisierung einen speziell konservierenden Einfluß auf die organischen Strukturelemente im Sinne eines nur äußerst retardiert fortschreitenden Zersatzes, insbesondere des sich an die Mangan- bzw. Eisen-Sperrzone anschließenden Knochens zu haben scheint, trägt bekanntlich die Einbettung in kalk- bzw. dolomitführende Schichten, wohl auf Grund günstiger p_{H} -Verhältnisse, dazu bei, die Entkalkung der Knochen hintanzuhalten, so daß ein unverhältnismäßig guter makroskopischer Erhaltungszustand (geringe Brüchigkeit, gute Härte und Schwere) resultiert, ohne daß etwa von einer eigentlichen Petrifikation die Rede sein könnte. Andererseits kann es in solchen Fällen natürlich bei entsprechender Nachbildung der Strukturen durch mineralisches Material zu einem weitgehenden Verlust der organischen Struktur kommen — ein Vorgang, der sich z. B. im Schliffbild nicht erkennen ließe, da bekanntlich calcinierter Knochen sich polarisationsoptisch annähernd ebenso verhält, wie wenn die Fibrillensysteme selbst noch vorhanden wären. Die anstelle der Fibrillen in der Kittsubstanz entstandenen feinen Röhren bewirken eine Stäbchen-Doppelbrechung (Gitterpolarisation); deshalb zog SCHAFFER seinerzeit auch den wohl zu Unrecht verallgemeinernden Schluß, daß fossiler Knochen sich stets so verhalte wie geglühtes Material. Im histologischen Schnitt nach Entkalkung läßt sich die Frage nach dem Charakter der doppelbrechenden Strukturen natürlich leicht klären: Man sieht bei petrifizierten Knochen einen völligen Zerfall mit höchstens noch spurenhaft erhaltener Doppelbrechung, bei durch Entkalkung aufgeweichtem Material (z. B. Moorleichen) dagegen gut erhaltene Fibrillenstruktur (AICHEL). Ebenso wie letztere Gesichtspunkte bei der herkömmlichen, approximativ-grobsinnlichen Altersschätzung unbedingt Berücksichtigung finden müssen, ist es notwendig, den histologischen Zerfallsbefund auf die Gesamtheit der Erhebungen zu beziehen. Ist z. B. nur die Peripherie des Compactaquerschnittes gut erhalten, so ist dies von vornherein artefaktverdächtig; es kommen aber auch Total-Konservierungen vor, denen man es am Schnitt nicht ansieht, daß sie, exogen bedingt, aus der Reihe der anderen Befunde herausfallen. In diesen Fällen ist u. U. das Verhalten des Knochens gegenüber Ultraschall geeignet, einen Anhalt für den Fortschreitungsgrad der Dekompositionsvorgänge zu bieten.

3. Unsere Versuche, aus einer *Abnahme des Stickstoffgehaltes* der Knochensubstanz Anhaltspunkte für den Dekompositionsgrad zu gewinnen, haben gezeigt, daß auf dieser Grundlage fast am wenigsten auszurichten ist.

NECKERMANN vermutete zwar auf Grund halbquantitativer Schätzungen nach dem Verfahren von LASSATGNE, daß wenigstens zwischen frischen, jahrzehntealten und 100jährigen Knochen gesetzmäßige Unterschiede im *Stickstoffgehalt* zu finden seien. Die quantitative N-Bestimmung nach KJELDAHL in je 500 mg Knochenfeilmehl zeigte in unseren Reihen jedoch sehr bald, daß innerhalb der ersten 50 Jahre Lagerung im Erdgrab praktisch überhaupt keine Veränderung des Stickstoffgehaltes der Knochen eintritt. Erst im Lauf von Jahrhunderten werden offenbar die Gerüsteiweiße der Compacta allmählich zersetzt und eluiert — ein Befund, der sich ja auch im Rahmen unserer morphologischen Erhebungen bestätigen ließ —, so daß man sogar an prähistorischen Stücken immer noch mit Stickstoffwerten von um 25% der Ausgangs-Größenordnung rechnen kann (Tabelle 4). Das Vorhandensein unzeretzter organischer Substanz zeigt auch folgender Versuch: Unterwarf man z. B. einen der 1400jährigen Knochen der trockenen Destillation im Glührohr, so entwickelten sich rasch zuerst weißliche, dann gelbliche Dämpfe, die sich zu großen Tropfen gelbbrauner und immer dunkler braungefärbter Destillate kondensierten. Der Knochen selbst färbte sich dabei tiefschwarz. Auch WALCHER erwähnte die positive Brennpote bei jahrhundealtem Material. Grundsätzlich empfiehlt es sich, vor der Durchführung der Kjeldahl-Bestimmung die Knochenmehlprobe mittels Natriumschmelze qualitativ auf Stickstoff und Schwefel sowie mittels Ninhydrin zu prüfen.

4. Ähnliche Ergebnisse hatten die *Fettbestimmungen*. Allerdings handelt es sich ja bei den Abdampfrückständen unserer 8stündigen Ätherextraktionen von je 200 mg Knochenmehl im Soxhlet nicht ohne weiteres ausschließlich um Fette, so daß die schwankenden, innerhalb mindestens der ersten 30 Jahre p. m. praktisch in gleicher Höhe verharrenden Werte keineswegs etwa ein Gleichbleiben des Neutralfettgehaltes beweisen (Tabelle 4).

Besonders die noch überraschend hohen Werte bei 1000- und mehrtausendjährigen Knochen ließen hier stärkste Zweifel aufkommen. Tatsächlich beobachtet man bei Extraktion der Ätherverdunstungsrückstände mit Tetrachlorkohlenstoff eine nur partielle Lösung des „Gesamtfettes“. Die mit Tetrachlorkohlenstoff abtrennbaren hochmolekularen, wachsartigen Fraktionen scheinen weitgehend ähnlich strukturiert zu sein, da deren Ultraviolettabsorption¹ in allen bisher geprüften Proben bei weitgehend angenähertem Kurvenverlauf durch ein steiles Absorptionsmaximum bei $\lambda = 260 m\mu$ gekennzeichnet ist (Abb. 10).

Fast scheint es weiterhin, als stünde die Menge Tetrachlorkohlenstoff-löslicher Substanz in einem Abhängigkeitsverhältnis zu den

¹ Herrn K. FISCHER, München, sei für analytische Mitarbeit gedankt.

alterungsbedingten Umsetzungsvorgängen im Knochen, wie aus der steigenden Tendenz der Extinktionen (Tabelle 5) hervorgeht.

Tabelle 4

Fall	Liegezeit (Jahre)	Gesamt- Stickstoff g-%	Ätherex- trahierbare „Fett“- Substanzen mg-%	Uhlen- huth
P 51	0	4,8	700	+++
P 53	0	5,1	1200	+++
P 55	0	4,9	1000	+++
M 62	3	4,0	800	++
M 61	9	4,8	370	+
B 2	10	4,9	400	
B 4	11	4,1	200	
M 21	16	4,4		
M 41	20	4,2		(+)
M 13	24	4,03	300	
M 44	29	4,1		(+)
M 45	35	4,3	650	(+)
M 27	36	4,3		(+)
M 5	44	3,9	250	?
M 11	52	4,4		
M 33	56	5,0	225	—
W 1	200—500	3,64	150	
W 4	200—500	3,67	150	
W 7	200—500	3,7	225	
Gr. 27	1200	1,43	90	—
Gr. 48	1200	1,40	225	—
A 3	4000	0,9	75	—

Tabelle 5

Fall	Liegezeit (Jahre)	Extinktion der CCl ₄ - löslichen Fraktion (1 g/L/20°C)	CCl ₄ - lösliche Fraktion % des Gesamt- äther- extraktes
M 61	9	1,670	70
M 13	24	1,710	75
M 5	44	1,925	100
M 33	56	2,325	54,5
Gr. 43a	1200	2,535	70
Gr. 43b	1200	2,808	66,7

nach den Angaben von BEUMER und WALCHER auch der *Ausfall der Uhlenhuthschen Eiweiß-Präcipitin-Reaktion* geben. Wir erhielten bei frischeren Knochen stärkere, schneller eintretende Reaktionen als bei älteren, konnten jedoch über eine Liegezeit von etwa 40 Jahren Erdgrab hinaus

Vermutlich handelt es sich bei den Ätherextrakten aus jüngeren Knochen vorwiegend um schon frühzeitig durch Hydrolyse entstandene Fettsäuren, die dann nicht nur als Seifen (Calcium, Magnesium usw.) abgebunden, sondern auch in wachsartige Produkte oder heterogene, noch nicht näher definierte Substanzen umgebaut werden, die — einmal entstanden — sich dem weiteren Zersetzung gegenüber resistent verhalten.

In diesem Zusammenhang sind auch die Ergebnisse, die die Spektralanalyse¹ der aus Knochen mit Äther extrahierten „Gesamtfette“ lieferte, erwähnenswert (Tabelle 6).

In den extrahierbaren „Gesamtfetten“ wurden 15 Elemente spektralanalytisch erfaßt. Sie sind einerseits Seifen, andererseits okkludierten Spurenelementen — auch solchen exogener Natur (Einbettungsmaterial) — zuzuordnen.

5. Einen gewissen Hinweis auf das Alter eines Knochens kann

¹ Durchgeführt von Doz. Dr. habil. SCHÖNTAG, München.

mit unseren Seren (Behring-Werke) bei NaCl-Extraktion über 24 bis zu 72 Std bei 4° C keine Präcipitation mehr erzielen, auch dann nicht, wenn nach dem Vorschlag BEUMERS steigende Mengen Knochenmehl extrahiert wurden (vgl. Tabelle 4).

6. Die Prüfung der bodenkundlichen Beziehungen beschäftigten uns praktisch im Zusammenhang mit der Auswertung jedereinzeln Versuchsreihe. Während die Zersetzung der Leichen im Erdgrab primär unabhängig vom Boden erfolgt, wird sie sekundär von der Bodenbeschaffenheit, der Bodenzusammensetzung und der Bodenreaktion gesteuert.

Ist der Boden sauer, kommt es beispielsweise infolge Einwirkung von Humus und Gerbsäuren durch Unterbindung der bakteriellen Zersetzung zu gewissen Konservierungen der Haut und oft auch der inneren Organe (bei Moorleichen z. B. in ausgeprägter Form), im Gegensatz zu der erwähnten Zerstörung des Knochens durch Herauslösen des Calciumphosphats.

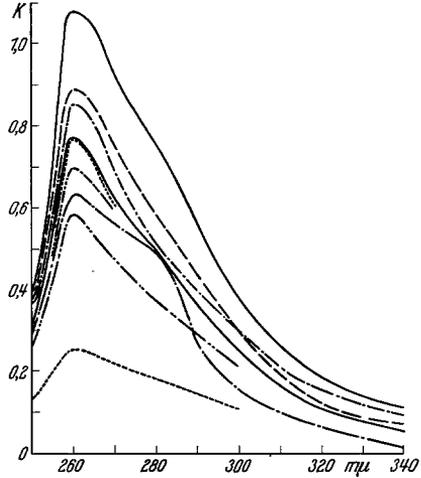


Abb. 10. Absorptionsmaximum in den Extinktionskurven der „Fett“-Extrakte von 9 Knochenproben verschiedenen Alters (10—1200 Jahre)

Tabelle 6

Nachgewiesene Elemente	Liegezeit in Jahren (darunter Nr. der Probe)								
	9	11	24	35	44	56	1200		
	M 61	M 4	M 13	M 45	M 5		M 33	Gr. 43a und Gr. 43b	
Zink	sp	sp	sp	1	sp	sp	1	sp	sp
Silber	1	1	sp	1	1	sp	sp	1	2
Kupfer	1	2	1	1	2	1	2	1	2
Calcium	3	4	3	3	4	3	3	3	4
Aluminium . .	2	2	2	2	3	2	2	2	3
Nickel	sp	sp	sp	sp	sp	—	—	sp	sp
Eisen	2	2	2	2	2	1	2	1	2
Silicium	2	3	2	2	3	2	2	3	3
Magnesium . .	2	2	1	2	3	1	1	2	3
Blei	sp	sp	sp	sp	sp	(sp)	(sp)	sp	sp
Zinn	—	sp	sp	—	sp	—	—	(sp)	(sp)
Mangan	1	2	1	1	2	1	sp	1	2
Phosphor . . .	2	2	1	2	2	1	2	1	2
Quecksilber . .	—	—	—	—	—	—	—	1	—
Barium	1	1	sp	sp	1	1	sp	sp	1

sp = Spur; 1 = 0,001—0,01%, 2 = 0,01—0,1%; 3 = 0,1—1%; 4 = 1—10%.

Durch die Leichenzersetzungsprodukte werden andererseits charakteristische chemische und strukturelle Veränderungen in dem angrenzenden Boden des Erd-

grabes — besonders bei Vergrabungen ohne Sarg — hervorgerufen, z. B. Bildung von grünem bis grünschwarzem Eisensulfid, von blauen bis blaugrünen Vivianitablagerungen $(\text{PO}_4)_2\text{Fe}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, Bleichung des Bodens und Abführung seiner Feinstbestandteile. Schneidet man in solchen Fällen ein Bodenprofil (Wiedergabe der Grabungswand), so erkennt man wie in einem Chromatogramm oder einer Adsorptionssäule die Diffusions- und Reaktionszonen der Zersetzungsprodukte und kann sie der Auswertung zuführen.

Diese und ähnliche Erscheinungen, aber auch nachweisbare Stoffaustauschreaktionen zwischen Leichensubstanzen und Boden, die wesentliche Rückschlüsse auf die Dauer unveränderter Leichenlagerung an primärer Stelle zulassen, interessieren im Rahmen der Problemstellung; denn die Stoffeinwanderung aus dem Boden im Sinne sekundärer Imprägnationen, Hohraumfüllungen und Neumineralisation (Petrifikation), die bis in die spätesten Alterungsphasen eines Skelets akut bleiben, ist ihrer Menge und Art nach von erheblicher diagnostischer Bedeutung. (Man denke in diesem Zusammenhang z. B. auch an die toxikologisch wichtige, hinreichend bekannte postmortale Sekundärinfiltration von Arsenverbindungen in Knochen, die — wie in einem erst letztlich bearbeiteten Exhumierungsfall zu erweisen war — in reichlichem Maße aus der homogen stark fahlerzhaltigen¹ Friedhofserde stattgefunden hatte).

Auch die spektrographische Kontrolle des Spurenelementhaushalts von Knochenmaterial kann — erfolgt sie in Abhängigkeit von den Spurenelementen der Einbettungsmassen — von Wichtigkeit bei Aussagen zur Liegedauer sein. Auf die Einbeziehung entsprechender Erdproben in den Untersuchungskomplex sollte sonach nicht verzichtet werden. Zur Charakteristik der Erdproben aus den Begräbnisstätten trug u. a. die rationelle Bodenanalyse bei, von der einige Beispiele in Tabelle 7 zusammengestellt sind.

Tabelle 7

Erdprobe aus der Bestattungsstätte	Quarz- und Feldspat %	darin		Ton- sub- stanz %
		SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	
Münchener Friedhof, Fälle: M 15, (32), 21, 18	28,5	60,1	39,9	71,5
München-Trudering, Fälle: Gr. 30, 27, 43, 48	30,4	56,2	43,8	69,6
Sizilien, Fälle: Agr. 6 und 7	14,7	20,3	79,7	85,3

Nach geologischen und pedologischen Methoden läßt sich die Frage nach der Liegezeit rezenter bzw. nur einige Dezennien alter Knochen natürlich nicht beantworten; denn die Umweltbedingungen haben sich in den letzten Jahren nicht so gewandelt, daß dies im Bodenbild, am

¹ Fahlerze sind Verbindungen von Schwefelantimon oder Schwefelarsen oder von beiden zugleich mit Schwefelkupfer, Schwefeleisen usw.

Bodeninhalt und damit auch an charakteristischen Skeletveränderungen zu erkennen wäre. Immerhin können fallweise seitens der Geologen doch informierende Hinweise auf die richtige Altersschätzung gegeben werden, beispielsweise kritische Bemerkungen zu Inkohlungsprozessen im Fundortbereich, zur Beurteilung von Sinterbildungen, zur Dauer neu entstehender Sandanschwemmungen und -überdeckungen usw.

7. Wir haben u. W. erstmals in Erwägung gezogen, die *Anwendung von Ultraschall (US) auf dem Gebiet der Knochenprüfung* heranzuziehen.

SOKOLOFF hatte bereits 1929 gefunden, daß Stoffe mit inneren Fehlstellen (Sprüngen, Rissen usw.) eine wesentlich schlechtere Schalldurchlässigkeit zeigen als vollkommen homogene Materialien. Die hochfrequenten Ultraschallschwingungen durchsetzen als periodische Dichteschwankungen das betreffende Material, wobei sich Inhomogenitäten usw. als Störungen der Schalleitung bemerkbar machen.

a) Das von uns verwendete *Echoskop*¹ arbeitet nach dem der Radartechnik entlehnten Impulsechoverfahren, einer bekannten Methode auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.

Ein kurzer US-Impuls von nur wenigen Schwingungen wird in den Prüfling geschickt (Sendeimpuls). Die Zeit bis zum Auftreten des Rückwandechos nach Reflexion des Schallwellenbündels an der Bodenfläche des Prüflings wird in bekannter Weise auf dem Schirm einer Brownschen Röhre als Seitenabstand zwischen den beiden Impulsaufzeichnungen (Zacken) an einer im Bildschirm aufleuchtenden, geeichten Skala (Tiefenmaßstab) genau meßbar (vgl. Abb. 11).

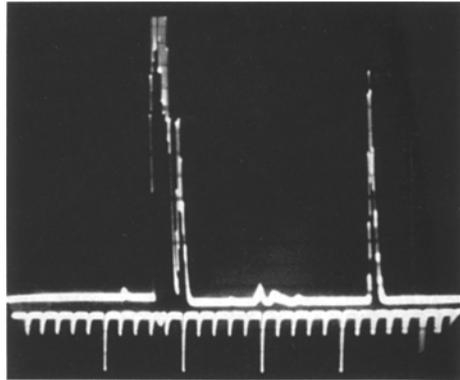


Abb. 11. Impulsaufzeichnung auf dem Bildschirm des Echoskops. Links der Sendepuls, rechts das Rückwandecho; unten Tiefenmaßstab in Zentimeter-Skalenteilen

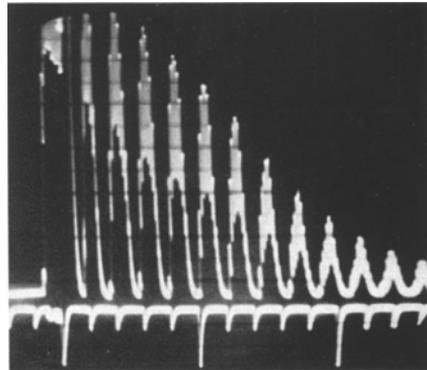


Abb. 12. US-Dämpfung, ersichtlich aus der Abnahme der Echoimpulse nach Anzahl und Amplitudenhöhe

¹ Fa. Dr. Lehfeldt u. Co. GmbH., Heppenheim a. d. Bergstraße.

Diese Laufzeitdifferenz ist in Relation zur Dicke des Prüflings Ausdruck der Schalleitungsgeschwindigkeit (V_L), da mit Longitudinalschwingungen gemessen wird. Nicht nur die V_L , sondern auch die Absorption des US ist bei verschiedenen Materialien unterschiedlich. Kann das Schallwellenbündel das Material ungehindert passieren, beobachtet man auf dem Schirm das Bild der aufeinanderfolgenden Bodenechos

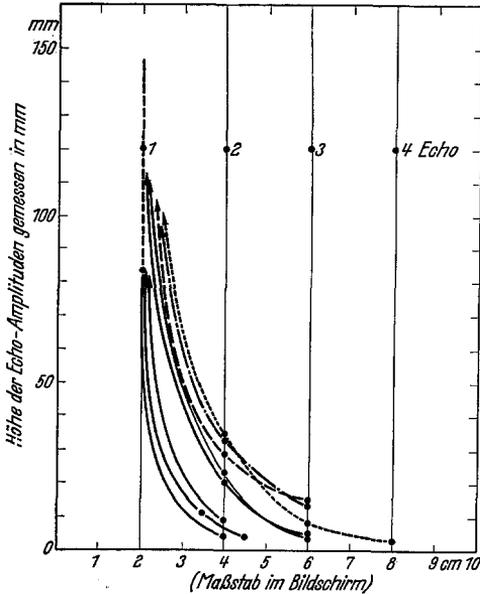


Abb. 13

Abb. 13. Dämpfungskurven von 8 Knochen, 200—500jährige Lagerung

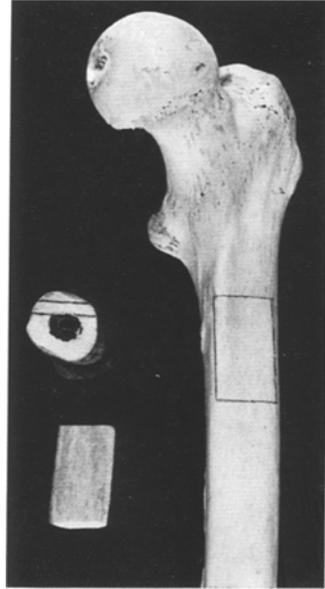


Abb. 14

Abb. 14. Die Entnahme der Knochentafeln aus dem oberen Drittel der Femurdiaphyse. Bei manchen Knochen ist der mediale Abschnitt des Oberschenkelschaftes geeigneter

als sog. zeitliches Spektrum, das wertvolle Rückschlüsse auf die Dämpfung im Material zuläßt. Aus der Abnahme der Zahl der Rückwandechos, der Kürzung der Echoamplituden und nicht zuletzt auch der Unschärfe der Echozacke wird der Grad der Dämpfung ersichtlich (vgl. Abb. 12). Letztere kann fallweise ein solches Maß erreichen, daß die Auswertung von Messungen unmöglich wird. Andererseits vermitteln beispielsweise die durch Anlegung eines Millimetermaßstabes auf dem Bildschirm abgegriffenen Höhen der Echoamplituden innerhalb der zeitlichen Echospektren ein anschauliches Bild der Schalldämpfung. Die Abb. 13 zeigt die weitgehend ähnlichen Dämpfungskurven von 8 aus einer Serie mehrhundertjähriger, aus vergleichbaren Bestattungsverhältnissen stammender Knochen (V_L im Durchschnitt = 1464 m/sec).

b) Zur Untersuchung werden jeweils Compactastücke dem oberen Femurdrittel entnommen, die durch planparalleles Zuschleifen in geeignete Form gebracht werden (Abb. 14).

Es ist notwendig, einerseits möglichst glatte, ebene Oberflächen zu erreichen, andererseits die Dicke der Knochen tafeln so groß wie möglich zu wählen; sie darf 3—4 mm nicht unterschreiten, weil sonst die Meßergebnisse unzuverlässig werden. Gegebenenfalls hält man — notwendig nach Maßgabe des Durchmessers der schallabgebenden Fläche des Schallkopfes (z. B. 15 mm) — die Breite der gewonnenen Außenfläche geringer.

Die Dicke der Knochen tafeln wird mittels Schublehre ermittelt.

Um zu verhindern, daß das zur Ankoppelung des Schallkopfes auf die Knochenfläche aufzubringende Paraffinöl in den Knochen eindringt, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, zunächst eine durch schnelles Verstreichen von Uhu-Klebstoff leicht herzustellende hauchdünne und alsbald klebfrei trocknende Schutzschicht auf der Ober- und Unterseite des Täfelchens anzubringen. Zur Messung wird zweckmäßigerweise die so vorbereitete Probe unter ausreichender Paraffinölankoppelung leicht und gleichmäßig auf den nach oben gerichteten Schallkopf aufgedrückt.

Die Wahl der günstigsten Schallfrequenz richtet sich in erster Linie nach der Struktur des Prüflings. Die Schallwellen hoher Frequenz, d. h. kleiner Schallwellenlänge, werden in einem groben Gefüge sehr stark gestreut; sie können daher nur in geringe Tiefen eindringen, und die von den Korngrenzen reflektierten Wellen ergeben auf dem Leuchtschirm starke Störungen, aus denen sich Fehler- und Rückwandechos nicht mehr oder nur schlecht herausheben. Man wird daher zunächst bei der Prüfung mit tiefen Frequenzen zu prüfen versuchen. Von den vier am Gerät vorhandenen Ultraschallfestfrequenzen liefert vorzugsweise die Frequenz von 2,4 MHz meist optimale Echos, die als stets gleichmäßig helle, stehende Bilder in allen Meßbereichen erhalten werden. Fallweise wurde auch mit der Frequenz von 4 MHz gemessen. Mit dem Prüfkopf der Eigenfrequenz 2,4 MHz konnten jedenfalls noch Knochen tafeln durchschallt werden, die bei den höheren Frequenzen bereits schallundurchlässig sind. Zur Dokumentation oder zwecks nachträglicher Auswertung können mittels der vor dem Schirmbild sitzenden Robot-Kamera durch Fernauslöser die Bilder mit einer darunter einsteckbaren Kennkarte aufgenommen werden.

Man wird stets bestrebt sein, mehrere oder alle überhaupt möglichen Echos auf dem Bildschirm sichtbar werden zu lassen. An der — in Längen in Stahl geeichten — Längenskala wird der Abstand zwischen zwei Impulsen für die Stahlwelle genau in Zentimeter angegeben. Die Abstände von Echo zu Echo werden gemessen und die Zahlenreihe

interpoliert — eine Notwendigkeit zugleich, um sich davon zu überzeugen, ob die Echos reell sind oder etwa materialbedingte Anomalien darstellen.

Da der automatisch registrierte Meßwert der Knochentafel auf der Zentimeterskala des Echoskops in Dicke Stahl angezeigt wird, ergibt sich durch einfache Umrechnung, und zwar aus der Dicke der Knochentafel (Millimeter), dividiert durch den Abstand der Impulsaufzeichnungen (Millimeter), multipliziert mit 6000 (Laufgeschwindigkeit für den Eichstahl) die *Ultraschallgeschwindigkeit* für den Prüfling (Abb. 15).

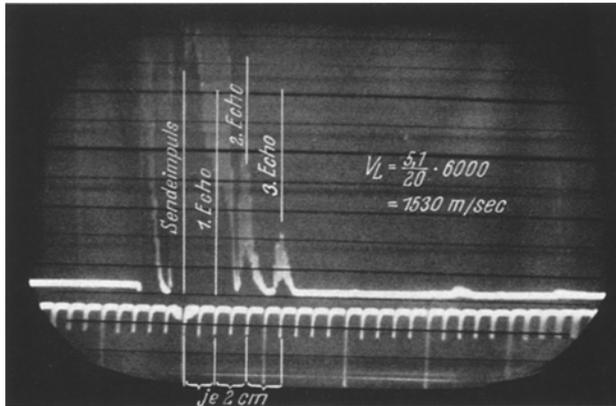


Abb. 15. Echobild zur Messung der Longitudinalgeschwindigkeit von Ultraschall in einer Knochentafel, mit Berechnungsbeispiel. Frequenz: 2,4 MHz; Quarz: 30 mm; Verstärkung: 4 Skt.; Maßstab (1 Teilstrich): 1 cm; Kopplung: Paraffinöl. Knochenscheibe, Dicke: 5,1 mm

Zwischen V_L und Dichte besteht eine enge Beziehung. Das Produkt aus der Schallgeschwindigkeit (cm/sec) und der Dichte der Knochentafel (g/cm), dividiert durch 10000 (entsprechend 10^{-4}) ergibt den *Schallwellenwiderstand* $\rho \cdot V_L$ ($z \cdot 10^{-4}$).

Bei den Messungen wurden als Kontrollen jeweils entsprechende Scheiben aus Eisen ($V_L = 5748$ m/sec) und Kork ($V_L = 852$ m/sec) vorgeschaltet.

c) In der folgenden Tabelle 8 sind die Meßergebnisse jener Knochen zusammengestellt, die einheitlich unter grob vergleichbaren Lagerungsbedingungen (vorwiegend Erdbedeckung) gealtert waren.

Sofern in der Tabelle je Fall mehrere Meßwerte und der sich daraus ergebende Mittelwert angegeben sind, war die entsprechende Zahl Knochentafeln getestet worden.

Die Bestimmung der Dichte erfolgte an den isolierten Compactastücken, um Unregelmäßigkeiten durch die Beimengung von Markresten, Luftbläschen in der Spongiosa usw. zu vermeiden.

Tabelle 8

Fall	Liegezeit (Jahre)	Lagerungsbedingungen	Lebens- alter, Ge- schlecht	Dichte ρ (g/cm ³) 15° C	Schallge- schwindig- keit V_L (m/sec) 15—18° C	Schall- wellen- wider- stand $z \cdot 10^{-4}$ $\rho \cdot V_L$
P 51	0	frisch	64	1,92	2790	54
P 52	0	frisch	50	1,65	2976	49
P 53	0	frisch	67	1,99	3024	60
P 54	0	frisch	55	2,04	2610	57
P 55	0,3	Luft, geschlossener Raum	26	2,24	2958	66
A 62	3	Exhumierung, Erdgrab	46	1,79	2580	46
M 60	9	Erdgrab Münchener Friedhof	64	1,90	2130	41
M 61	9	Erdgrab Münchener Friedhof	62	1,94	2250 2316}	2283 44
L 4	10	Erdgrab Oberösterreich	?	1,95	2250	44
L 1	11	Erdgrab Oberösterreich	?	1,79	1920	34
B 2	10	unter Haustrümmern Rheinland	?	2,07	1920 1950 1950}	1940 40
B 4	11	unter Haustrümmern Rheinland	?	1,97	2070 1860 2100}	2010 38
A 66	12	oberflächlich, Kiesboden, Starnberg	40	2,00	2060 1962}	2011 40
B 6	14	Erdgrab Rheinland	jung	1,85	2100	39
M 15	14	Erdgrab Münchener Friedhof	78	1,78	2160	38
M 32	14	Erdgrab Münchener Friedhof	67	1,71	nicht meßbar in- folge zu starker Dämpfung	
M 21	16	Erdgrab Münchener Friedhof	74	1,78	2136	38
M 18	18	Erdgrab Münchener Friedhof	33	1,99	1710	34
M 41	20	Erdgrab Münchener Friedhof	63	1,98	2218	42
M 42	20	Erdgrab Münchener Friedhof	73	1,94	1902	37
M 29	25	Erdgrab Münchener Friedhof	69	1,85	nicht meßbar in- folge zu starker Dämpfung	
M 13	24	Erdgrab Münchener Friedhof	55	1,98	2100	42
M 44	29	Erdgrab Münchener Friedhof	84	1,72	1800	31
M 45	35	Erdgrab Münchener Friedhof	71	1,90	2046	39
M 27	36	Erdgrab Münchener Friedhof	61	1,85	1920	36
M 5	44	Erdgrab Münchener Friedhof	?	2,39	1800	43
M 11	52	Erdgrab Münchener Friedhof	43	2,24	1968	44
M 37	55	Erdgrab Münchener Friedhof	63	1,89	1878	35
M 33	56	Erdgrab Münchener Friedhof	43	1,81	2118	38
M 8	56	Erdgrab Münchener Friedhof	30	1,84	1626	30
S 1	127	Erdgrab Münchener Friedhof	35	1,69	1620	27
W 1	200—500	Erdgrab Münchener Friedhof	—	1,78	1482	26
W 2	200—500	Erdgrab Münchener Friedhof	—	1,91	1392	27
W 3	200—500	Erdgrab Münchener Friedhof	—	1,80	1452	26
W 4	200—500	Erdgrab Münchener Friedhof	—	1,69	1500	25
W 5	200—500	Erdgrab Münchener Friedhof	—	1,32	1512	20
W 6	200—500	Erdgrab Münchener Friedhof	—	1,61	1410	23
W 7	200—500	Erdgrab Münchener Friedhof	—	1,68	1440	24
W 8	200—500	Erdgrab Münchener Friedhof	—	1,82	1530	28

Tabelle 8 (Fortsetzung)

Fall	Liegezeit (Jahre)	Lagerungsbedingungen	Lebens- alter, Ge- schlecht	Dichte ρ (g/cm ³) 15° C	Schallge- schwindig- keit V_L (m/sec) 15—18° C	Schall- wellen- wider- stand $z \cdot 10^{-4}$ $\rho \cdot V_L$
K 8	etwa 900—1000	Erdgrab Schammendorf, LKrs. Lichtenfels	— —	1,83	1260	23
Gr. 30	1200	(karolingerzeitliche Bestattung) Reihengräber der Bajuwaren- zeit, Trudering bei München	— —	1,78	1272	23
	1200	Reihengräber der Bajuwaren- zeit, Trudering bei München	— —	1,79	1560	28
	1200	Reihengräber der Bajuwaren- zeit, Trudering bei München	— —	1,58	1066	17
	1200	Reihengräber der Bajuwaren- zeit, Trudering bei München	— —	1,72	1200	21
K 1	1200—1400	Merowingerzeitliche Bestat- tungen, Epfach, LKrs. Schongau	— —	1,71	1176	20
K 5	1200—1400	Merowingerzeitliche Bestat- tungen, Epfach, LKrs. Schongau	— —	1,75	1166	20
K 7	1200—1400	Merowingerzeitlicher Grabfund, Untermenzing-München	— —	1,73	1134	19
K 3	1200—1400	Merowingerzeitliche Bestat- tungen, Trudering-München	— —	1,84	1092	20
K 6	1200—1400	Merowingerzeitliche Bestat- tungen, Trudering-München	— —	1,74	1020	17
Agr. 1	1900	Sizilien, Katakombe	— —	1,74	1374 1056	1215
Agr. 2	1900	Sizilien, Katakombe	— —	1,64	948 978	976
Agr. 3a b c d	etwa 1800—1900	Sizilien, Erdgrab	— —	1,70	750	764
					768	
					792	
					744	
Agr. 4	etwa 1800—1900	Sizilien, Erdgrab	— —	1,67	1116 1080 1098	1086
Agr. 5	etwa 1800—1900	Sizilien, Erdgrab	— —	1,55	852 884	868
K 9	etwa 3000	bronzezeitliche Bestattung, Kronwinkel, LKrs. Landshut	— —	2,15	852	18
A 3	etwa 4000	Erdgrab, Niederbayern (spätes Neolithikum)	— —	1,27	690 558 870	706
MLT	etwa 6000	Erde, Niederbayern: mesolithische Tierknochen	— —		um 700	9

Die in Tabelle 8 zusammengestellten Meßergebnisse lassen erkennen, daß die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Liegedauer der Knochen unter der Erde, bezogen auf größere Zeiträume, kontinuierlich abnimmt (Abb. 16).

Betrachtet man die Werte der ersten 60 Jahre, so ergibt sich zwar, daß frische Knochen und vielleicht noch solche der ersten 5 Jahre stets

deutlich höhere V_L -Werte zeigten als das länger liegende Material; bei eindeutigem Absinken der Mittelwerte auch in den ersten Jahrzehnten p. m. kommt man aber doch zu dem Schluß, daß die Streuung der Werte im einzelnen eine Unterscheidung z. B. zwischen 10- und 50jährigen Knochen nicht regelmäßig zulassen wird. Nach den bisherigen, freilich noch wenig umfangreichen Meßergebnissen kann man aber immerhin sagen, daß V_L -Werte unter 2100 m/sec bei Knochen des ersten postmortalen Dezenniums noch nicht vorkamen, solche unter 1700 m/sec noch nicht innerhalb der ersten 50 Jahre; andererseits wurden Werte über 2300 m/sec nicht mehr nach Ablauf der ersten 10 Jahre, solche über 2100 nicht mehr nach 50 Jahren erreicht. — Danach könnte z. B. ein fraglicher Knochen mit einer V_L von 1850 m/sec keinesfalls jünger als 10 Jahre, wohl aber noch älter als 50 Jahre sein; ein solcher mit einer V_L von z. B. 2200 m/sec könnte jedenfalls jünger sein als 10 Jahre, aber ausnahmsweise auch noch bis 50 Jahre Liegezeit aufweisen; eine V_L von 1600 m/sec endlich bewiese ein Alter von über 50 Jahren.

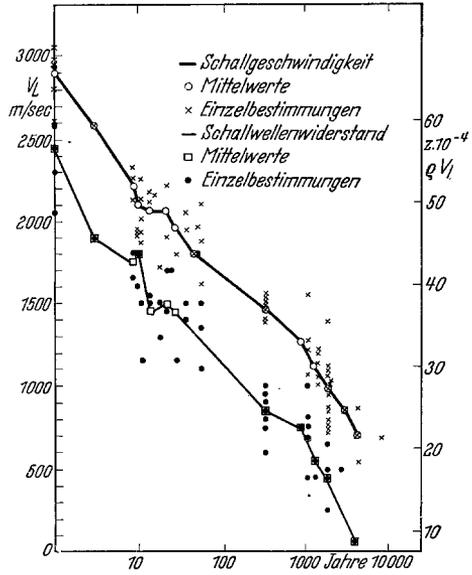


Abb. 16. Schallgeschwindigkeit (V_L) und Schallwellenwiderstand (qV_L) in Abhängigkeit von der Liegedauer von Knochen

Viel besser verwertbar werden, im Gegensatz zu den meist wenig aufschlußreichen Dichtewerten, die US-Daten, wenn man die späteren Dekompositionsphasen mit einbezieht.

Zwischen dem morphologischen Zerfall und der Abnahme der US-Leitfähigkeit bestand im allgemeinen weitgehende Parallelität, weshalb letztere zunächst rein als Ausdruck der dekompositionsbedingten Porositätszunahme gedeutet wurde.

d) Wie die bisherigen Nachforschungen ergaben, spielt unter den Ursachen der Abnahme der Schalleitfähigkeit im Knochen im Rahmen der postmortalen Dekomposition der Feuchtigkeitsverlust offensichtlich eine nur relativ untergeordnete Rolle (Tabelle 9), indem die Entwässerung lediglich zu einer Abnahme der V_L -Werte führte, die den Rahmen der Meßgenauigkeit nicht überschreitet.

Von bedeutenderem, wenn nicht dem entscheidenden, Einfluß ist demgegenüber der Verlust verseifeter Fette mit anschließender Ausbildung

luftgefüllter Mikro-Zerfallslücken (Abb. 17). Ließ man nämlich in einen alten porösen Knochen ($V_L = 868$ m/sec) ungezwungen Öl infundieren, so erreichte man einen maximalen Anstieg der V_L auf 3600 m/sec (Tabelle 10).

Tabelle 9

Behandlung	Fall P 51	Fall P 52
	V_L (m/sec)	V_L (m/sec)
Original ohne Behandlung	2790	2976
Entwässerung mittels Alkohol während 4 Wochen bei Zimmertemperatur	2772	2856

Tabelle 10

Behandlung	Knochen, Fall Agr.5
	V_L (m/sec)
Original, ohne Behandlung	868
Leinölaufsaugung während 14 Tagen . . .	2400
Leinölaufsaugung während 10 Wochen . .	3600 (konst.)

Tabelle 11

Fall	Liegezeit (Jahre)	Lagerungsbedingungen	Lebensalter, Geschlecht	Dichte (g/cm^3) 15° C	Schallgeschwindigkeit V_L (m/sec) 15—18° C	Schallwellenwiderstand $z \cdot 10^{-4}$; $\rho \cdot V_L$
A 63	2	Wasserleiche (Knochen noch markhaltig, schmierig)	74 ♂	1,90	3720 } 3660 3600 }	71 } 68 } 69
L 3	3—5	Wasserleiche	—	1,75	2550 } 2400 2250 }	45 } 39 } 42
L 5	10	Wasserleiche	—	1,90	2520 } 2520 2520 }	48
A 65	3	in Fichtendickicht, frei liegend	wahrscheinlich über 50 ♂	1,90	1710	32
K 2	etwa 4000	Höhlenerde, dolomitisch	—	2,39	1215	29
K 4	etwa 4000	Höhlenerde, dolomitisch	—	2,02	1130 } 1115 1116 } 1098 }	23

Weiterhin spielt der Verlust der knocheneigenen mineralischen Substanzen (vgl. später) eine Rolle.

e) So überzeugend die Meßreihen eine Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit und des Schallwellenwiderstandes von der Liegedauer von Knochen auch dartun, so nachdrücklich muß betont werden, daß die Bewertung auch dieser Meßergebnisse grundsätzlich nur mit umsichtiger

Berücksichtigung der oft sehr speziellen Milieuverhältnisse erfolgen darf, unter denen die Knochen altern. So fanden wir auch in Besonderheiten der US-Leitfähigkeit die von WALCHER betonte Erfahrung bestätigt, daß in Wasser liegender Knochen langsamer altert, während Luft und Wetter ausgesetztes Material vergleichsweise schneller verrottet als Skeletteile aus dem Erdgrab. Derartige Fälle unseres Materials sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

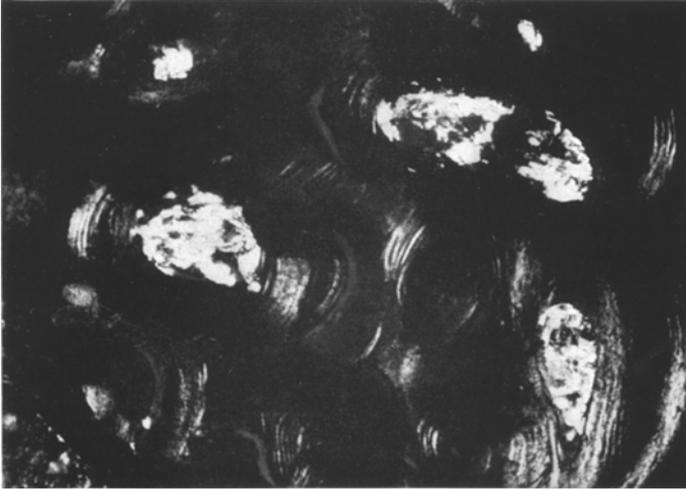


Abb. 17. Femur-Querschnitt M 18 (18 Jahre Erdgrab), entkalkt, im polarisierten Licht. Haverssche Kanäle ausgefüllt mit wachsartigen Relikten der Fett-Transgression

Während Knochen, die 3 Jahre lang uneingeschränkt allen Wettereinflüssen ausgesetzt und durch Tierfraß rarefiziert waren (Fall A 65), unter Zugrundelegung der ermittelten $V_L = 1710$ m/sec eine über 50jährige Liegedauer hätten beanspruchen können, gewann man nach den sehr hoch liegenden Ultraschallmeßwerten der Fälle A 63, L 3 und L 5 (Tabelle 11) den Eindruck, daß sich beispielsweise bei Lagerung in Wasser die Schalleitungsfähigkeit von Knochen auf Grund verzögerter Substanzverluste weniger verändert als bei Lagerung in trocken-humösen Böden oder im Freien. Bei einschlägigen Untersuchungen wird man im übrigen vor der Messung tunlich für die Elimination der den Knochen anhaftenden Feuchtigkeit durch mehrtägiges Trocknen an der Zimmerluft Sorge tragen.

Die Fälle K 2 und K 4 wurden begründeterweise als repräsentativ ausgewählt. Bei beiden Knochen standen der äußere Erhaltungszustand (Materialdichte K 2 = 2,39; K 4 = 2,202 und hervorzuhebende Strahlendichte) sowie der mikromorphologische Befund im Widerspruch zu den V_L -Werten der Compacta, die zu 1215 bzw. 1115 m/sec ermittelt

worden waren und dem wirklichen Alter der Knochen viel näher kamen als die ersteren Daten.

Bei stereotyper Auswertung der Meßwerte hätte man das Alter beider Knochen mit etwa 1500 Jahren annehmen müssen, womit die sichere archäologische Datierung (Mesolithikum) allerdings noch längst nicht erreicht war. Handelte es sich sonach tatsächlich um wesentlich ältere Knochen, war anzunehmen, daß durch milieubedingte Umstände am Lagerungsort die fortschreitende Zersetzung unterbrochen bzw. unterbunden worden war und die Knochen von diesem Stadium an unter konservierenden Verhältnissen weiter alterten.

Hob sich bereits der Knochen K 9 (s. oben) sinnfällig durch eine erhebliche Eisenimprägnation charakteristisch bandförmiger Anordnung heraus, so zeigten die Knochen K 2 und K 4 neben erheblicher Eisenanwanderung an die Knochenoberflächen analoge Bilder tiefgreifender, etwa $\frac{1}{3}$ der Compacta ausmachender Manganimprägnation mit einer Mangananreicherung, die das Mehrfache des Mangangehaltes des umgebenden Erdreiches ausmachte. Das Erdreich enthielt 0,1%, die Knochenimprägnation 0,32% Mn.

Voraussetzung für die Entstehung der bandförmigen Imprägnationscharakteristika, die von uns bislang an Knochen von nur mehrhundertjähriger Lagerung im Erdreich trotz einiger Reichhaltigkeit des Untersuchungsmaterials nicht gefunden wurden, konnte aller Voraussicht nach nur der vorangegangene, auf diese Knochenbereiche beschränkte totale Abbau der organischen Substanz von der Knochenoberfläche her gewesen sein, der in K 4 offensichtlich erst herdförmig auf die Compacta übergegriffen hatte, als der Fortgang der Zersetzungsreaktionen unterbrochen wurde.

Die Dekomposition des peripheren Knochens manifestierte sich im übrigen durch die hier isoliert sehr niedrige Longitudinalgeschwindigkeit $V_L = 774$ m/sec.

Der Fundort dieser Knochen (unter Kulturschuttschichten einer Höhle) gewährleistete einerseits trockene Lagerung; andererseits waren aber auch physikalisch-chemische Faktoren, wie kontinuierlich weitgehender Luftabschluß, tiefe, nur geringen Schwankungen unterliegende Temperatur, keine Störung durch bewegte Grundwässer und Zurückdrängung der Wasserstoffionen-Konzentration im umgebenden Medium Voraussetzungen dafür, daß sich diese Knochen Tausende von Jahren zu erhalten vermochten. Das kalkreiche, dolomitische Milieu, in dem sich die Knochen befanden, verhinderte die Herauslösung des Calciumphosphats (Apatit) und damit die Zerstörung der Knochen. Zweifelsohne spielte in den Fällen K 2 und K 4 aber auch der Einfluß von Neumineralisationen, sekundären Imprägnationen und Hohlraumfüllungen im Knochen eine Rolle.

Die Ausfüllung schallabsorbierender Lufträume mit Substanzen, die die US-Fortpflanzung begünstigen (z. B. CaCO_3 mit einer V_L von 6130 m/sec, Brauneisenstein $V_L = 1830$ m/sec) (vgl. Abb. 18) wird in diesem Sinne vergleichsweise erhöhte Laufgeschwindigkeiten bedingen, während sich bei überwiegender Erhaltung organischer Strukturelemente unter dem Einfluß speziell konservierender Lagerungsbedingungen bei gleichzeitiger Elution der besserleitenden anorganischen Grundsubstanz des Knochens (Apatit) eine entsprechend niedrigere V_L finden wird.

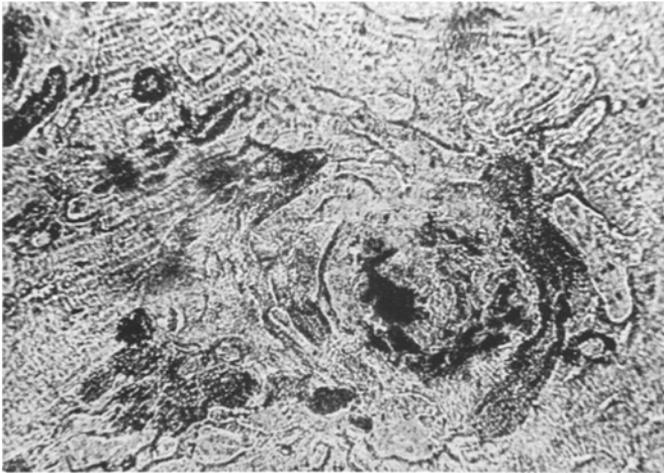


Abb. 18. Femur-Querschnitt K 9 (etwa 3000 Jahre Erdgrab), peripherer Osteongürtel, Schliffbild; Haversscher Kanal und Mikrozerfallsrücken ausgefüllt mit Brauneisengel (Aufnahme Prof. FISCHER, München)

Dies ergibt sich aus einem Versuch, bei dem der gleiche Knochen ($V_L = 1530$ m/sec) im calcinierten (3 Std bei 800°) Zustand eine um 55,2% des Ausgangswertes erhöhte Longitudinalgeschwindigkeit $V_L = 2375$ m/sec, nach der Entkalkung dagegen nur noch eine solche von 1020 m/sec aufwies.

f) Letztlich wurde mittels eines *Durchschallungsverfahrens* (senkrechter Durchtritt der Strahlen) das Maß der Schalldurchlässigkeit planparalleler Knochentäfelchen zu ermitteln versucht.

Wir bedienen uns des *Sonometers*¹, das es an Hand entsprechend ausgeführter Tastspitzen ermöglicht, die Proben mit der gewünschten Zahl von Meßpunkten zu testen. Gemessen wurde mit einer Schallfrequenz von 2,85 MHz unter Ankoppelung des Sende- und Empfangskopfes an die Knochentäfelchen mit Vaseline.

¹ Fa. Dr. Lehföldt u. Co., Heppenheim, die die Testungen entgegenkommenderweise in ihren Laboratorien ermöglichte.

Die in der Tabelle 12 angeführten Werte der lokalen Schallabsorption sind aus je 5 Einzelbestimmungen gemittelt. Die in Dezi-Bel¹ (db/cm) angegebenen Dämpfungen lassen — selbst wenn man von den reproduzierten Ausreißern absieht — eine Beziehung zu den Alterungsstadien der Knochen nicht klar hervortreten. Eine nähere Erörterung der Befunde ist daher zurückzustellen.

Tabelle 12. Lokale Schallabsorption von Knochentäfelchen in db/cm, gemessen mit Sonometer

Fall	Liegezeit (Jahre)	Lokale Schallabsorption db/cm	Fall	Liegezeit (Jahre)	Lokale Schallabsorption db/cm
P 51	0	41	M 44	29	74
P 52	0	42	M 45	35	30
P 53	0	36	M 27	36	50
P 54	0	55	M 5	44	44
P 55	0	49	M 11	52	52
M 15	14	46	M 37	55	44
M 32	14	97	M 33	56	36
		(mit Echoskop nicht meßbar)	M 8	56	45
M 21	16	46	Gr. 30	1200	33
M 18	18	40	Gr. 27	1200	33
M 41	20	23	Gr. 82	1200 (?)	35
M 42	20	34	Gr. 43	1200	40
M 13	24	25	Gr. 48	1200	53
M 29	25	80			
		(mit Echoskop nicht meßbar)			

Aus diesen Ergebnissen erhellt zwingend, daß

1. *morphologischer Befund, Dichte und Ultraschall-Leitfähigkeit stets nur in ihrer Kombination für eine Schätzung der Liegezeit von Knochen herangezogen werden können, und*

2. *als Grundlage der Bewertung in kritischen Fällen neben der chemischen und spektralanalytischen vor allem auch die bedeutenden Aufschluß gebende petrographische Dünnschliffuntersuchung mit heranzuziehen ist.*

9. Zur Unterstützung der morphologischen und physikalisch-chemischen Befundauswertung wurde letztlich die Anfertigung von *Röntgenspektrogrammen* aus einer kleinen Feilmehlprobe des zu beurteilenden Knochens berücksichtigt. Mit zunehmendem Knochenalter ergab sich

¹ Unter „Bel“ versteht man eine dimensionslose Einheit zur Kennzeichnung von Dämpfungen, besonders in der Elektrotechnik; sie ergibt sich als Briggscher Logarithmus des Verhältnisses der beiden zu vergleichenden Größen, etwa $\log U_1/U_2$, wenn U_1 die Spannung am Eingang, U_2 die am Ausgang einer Leitung darstellt. Man verwendet meistens den 10. Teil dieser Einheit, das Dezi-Bel (db).

teilweise eine passagere Intensitätsabnahme der Beugungsringe im Debye-Scherrer-Diagramm (SCHÖNTAG); die Befunde lassen sich gegebenenfalls durch photoelektrische Intensitätsmessung objektivieren. Die Aufstellung einer auf die Liegedauer bezogenen Abhängigkeitskurve ist aber nicht möglich, weil schon bei den früh-historischen Stücken exogene Mineralisationen das Reflexbild nach Qualität und Intensität beeinflussen können. Gerade dieser Umstand kann aber — neben einer entsprechenden mineralogischen Auswertung am Schliiff — zur Interpretation des Echoskop-Befundes auf der einen, des mikroanatomischen Erhaltungszustandes auf der anderen Seite beitragen.

10. Selbstverständlich ist bei der Datierung prähistorischer, auch subfossiler Knochen insbesondere die *Radiocarbon-Methode* geeignet, verläßliche Anhaltspunkte zu liefern; sie hat eben nur den Nachteil, daß ein verhältnismäßig großes Stück des Untersuchungsobjektes zerstört werden muß. Nach der jüngsten Literatur (SUSS) ist die Genauigkeit der Libby-Methode mit ± 200 Jahren zu veranschlagen; danach kommt dieses elegante Verfahren für forensische Zwecke freilich weniger in Betracht.

Zusammenfassung

Da das Ausmaß der Veränderungen in und an Knochen sicher mit den äußeren Bedingungen variiert, denen die Knochen nach dem Tode ausgesetzt waren, kann man den Grad von Umbildungsvorgängen nicht schematisch als ein Maß der Zeit betrachten, die seit dem Ableben des Individuums verstrichen ist.

Wenn auch naturgemäß die Wahrscheinlichkeit umfangreicherer postmortaler Umsetzungen mit der Länge der Liegezeit steigt, so wird sich doch voraussichtlich aus Einzelkriterien des Dekompositionsgrades keine allgemein gültige Beziehung zwischen der Zerstörung der organischen Substanz und dem Alter von Knochen finden lassen, sieht man von der Radiocarbonmethode, der einzigen Möglichkeit ab, die an sich geeignet ist, aus der Bestimmung des $C^{14}:C^{12}$ -Verhältnisses in der organischen Substanz die absolute Länge der Zeit zu erfassen, die seit dem Tode des Individuums vergangen ist. Der Anwendung dieser Methode auf Objekte mit geringer Alterung scheint indessen vorerst noch die zu hohe Fehlergrenze entgegen zu stehen.

Erwartungsgemäß ergibt sich aus den bisherigen Untersuchungsbefunden, daß die Beurteilungsgrundlage einer Knochenaltersbestimmung letztlich nur aus der Summe aller aus den bisher bekannten und den mitgeteilten neuen Verfahren erzielbaren Detailergebnisse zu schaffen ist. So gelangt man zu Aussagen, die zumindest der Durchschnittswahrheit entsprechen.

Unverkennbare diagnostische Vorteile, die die erstmals zur Diskussion gestellte Ultraschall-Meßmethode im Rahmen der Problemstellung bietet, leiten sich aus der der fortschreitenden Liegedauer entsprechend kontinuierlich sinkenden Longitudinalgeschwindigkeit (V_L) des Knochenmaterials ab.

Vor allem für das zweite bis fünfte Jahrzehnt der Lagerung im Erdgrab ergaben sich bei allen Methoden keine so markanten Veränderungen des Dekompositionsgrades, daß eine Unterscheidung der Liegezeiten innerhalb dieser Phase mit der wünschenswerten Regelmäßigkeit gewährleistet erschiene. Auch die Ultraschall-Methode verlangt selbstverständlich die Berücksichtigung all jener milieubedingter Faktoren, die für die Entstehung von Merkmalen einer bevorzugten oder verzögerten Knochenalterung verantwortlich sind. Die kombinatorische Prüfung des Materials im UV-Licht, hinsichtlich der Anfärbbarkeit mit Indophenol/Nilblau sowie des mikroanatomischen Strukturersatzes und der Ultraschallgeschwindigkeit läßt aber eine zweifelsfreie Abgrenzung von Skeletteilen des ersten postmortalen Jahrzehnts gegenüber solchen der vier Folgejahrzehnte und vor allem der zweiten Hälfte des ersten Jahrhunderts zu.

Deutliche, die Altersansprache ermöglichende Wertabstufungen erhält man mit diesen Methoden, besonders drastisch mit dem Ultraschallverfahren, bei der Prüfung historischer Knochenfunde, und zwar im Gegensatz zu manchen chemischen Prüfmethode, die über Jahrhunderte hinweg weitgehend gleichbleibende, diagnostisch somit kaum voll verwertbare Ergebnisse liefern können.

Die objektive Abgrenzung solcher älteren Knochenfunde entspricht einer Notwendigkeit; denn die subjektive, grobsinnliche Schätzung der Liegedauer kann — wie die Praxis zeigt — zu erheblichen Irrtümern führen, und zwar auf Grund speziell konservierender Einflüsse des Einbettungsmaterials gelegentlich sogar noch bei subfossilen Skeleten.

Literatur

- AICHEL, O.: Über Moorleichen. Verh. Ges. phys. Anthrop. **2**, Sonderh., 57 (1927). — BERGMANN, L.: Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik, 6. Aufl. Stuttgart: Hirzel 1954. — BEUMER: Die Unterscheidung von Menschen- und Tierknochen. In LOCHTE, Gerichtsarztl. Technik, S. 286. Wiesbaden: Bergmann 1914. — DETTMER, N., J. M. SCHMITT-RHODE u. F. J. HABERICH: Histologisch und mikrodensometrisch nachweisbare postmortale Veränderungen der Knochengrundsubstanz. Virchows Arch. **328**, 324 (1956). — FOERSTER, A., u. H. J. GOLDBACH: Histologische Differenzierung von Femurdiaphysen Neugeborener. Dtsch. Z. gerichtl. Med. **43**, 273 (1954). — GABRIEL, M.: Die bisherigen Ergebnisse der Moorleichenforschung. Dtsch. Z. gerichtl. Med. **15**, 226 (1930). — JERUSALEM, CHR.: Über die histologische Diagnose postmortal und intravital entstandener Knochendefekte. Z. Morph u. Anthrop. **47**, 67 (1955). — LEHFELDT, W.: Prüfung von Blechen und Bändern auf Dopplungen. Technische und wirtschaftliche

Fragen. Mitt. Forschungsges. Blechverarbeitung **1955**, Nr 8. — Ultraschall in der metallverarbeitenden Industrie. Elektronik **1955**, Nr 2. — NECKERMAN, A.: Todeszeitbestimmung an menschlichen Knochen. Inaug.-Diss. Med. Erlangen 1950. — POHLMANN, R.: Ultraschall als neues Mittel der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung in der feinmechanischen Industrie. Microtecnic (Lausanne) **8**, Nr 2 (1954). — SCHAFFER, A.: Über den feineren Bau fossiler Knochen. Sitzgsber. Akad. Wiss. Wien, Math.-naturwiss. Kl. **98**, 319 (1889). — SCHMIDT, W. J.: Die Bausteine des Tierkörpers im polarisierten Licht. Bonn: Cohen 1924. — SOKOLOFF, S.: Zur Frage der Fortpflanzung ultra-akustischer Schwingungen in verschiedenen Körpern. Elektr. Nachr.-Techn. **6**, 454 (1929). — SPECHT, W., u. W. KATTE: Vorschlag eines neuen Verfahrens. Das Echoskop, ein Ultraschall-Gerät. Arch. Kriminol. **118**, 67 (1956). — SUESS, H. E.: Grundlagen und Ergebnisse der Radiokohlenstoff-Datierung. Angew. Chem. **68**, 540 (1956). — WALCHER, K.: Gerichtsärztliche Untersuchung von Skeletteilen. In ABDERHALDENS Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden, Bd. IV/12/2, S. 37. 1931.

Prof. Dr. W. SPECHT und Dr. STEFFEN BERG,
Bayerisches Landeskriminalamt, München 2, Türkenstr. 4