Universität Ulm
Institut für Humangenetik
Leiter: Prof. Dr. Walther Vogel

Kernwaffen-induziertes Radiocarbon (^{14}C) und die Liegezeitbestimmung von menschlichen Skelettresten

Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades der Humanbiologie
(Dr. biol. hum.)
der Medizinischen Fakultät
der Universität Ulm

vorgelegt von
Bettina Danner
aus Rostock

2006

Amtierender Dekan:	Prof. Dr. Klaus-Michael Debatin
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Friedrich Wilhelm Rösing
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Wilhelm Gaus
Tag der Promotion:	26. Januar 2007

für Marie

Inhaltsverzeichnis

		Inhaltsverzeichnis	V
		Abkürzungsverzeichnis	VII
I		**Einleitung**	**1**
II		**Kritische Beurteilung der Grundlagen**	**9**
	II 1	Einführung	11
	II 2	Die Radiocarbon-Methode	12
	II 3	Der Nachweis von ^{14}C und ^{90}Sr in rezenten Knochen	25
	II 4	Die qualitative Bestimmung des Stoffwechsels im Knochen: Benennung der biologischen Prozesse	44
	II 5	Die Quantifizierung des Stoffwechsels im Knochen: Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ und die jährliche Austauschrate	76
III		**Forschungsstand und Aufgabenstellung**	**147**
IV		**Material und Methoden der FoRCaDa**	**153**
	IV 1	Material und Methoden zur Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe	155
	IV 2	Das Material zur Bestimmung der jährlichen relativen Skelettmasse-Änderung (ΔSM)	174
	IV 3	Methoden der Statistik	180
V		**Ergebnisse**	**205**
	V 2	Die Bestimmung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM)	233
	V 3	Entwicklung, Überprüfung und Beurteilung des Modells FoRCaDa	240
VI		**Diskussion**	**287**
	VI 1	Auswahl von Einflussgrößen auf die ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe	289
	VI 2	Die Bestimmung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM)	303
	VI 3	Entwicklung, Überprüfung und Beurteilung des Modells FoRCaDa	352
VII		**Zusammenfassung**	**379**
		Literaturverzeichnis	381
		Anhang	
		Inhaltsverzeichnis	A III
		Anhang 1	A 1
		Anhang 62	A 133
		Danksagung	

Abkürzungsverzeichnis

Symbole:

<	kleiner
>	größer
≤	kleiner, gleich
≥	größer, gleich
=	gleich
#	beliebige Ziffer, Zahl, Anzahl
%	Prozent (1/100)
∅	Durchschnitt
‰	Promill (1/1000)
♀	weiblich, Frau, Frauen
♂	männlich, Mann, Männer
°C	Grad Celsius
Δ	Delta, Differenz

chemische Elemente und physikalische Formeln:

^{12}C	häufigstes Isotop des Kohlenstoffs
^{13}C	Isotop des Kohlenstoffs
^{14}C	radioaktiver Kohlenstoff, Radiocarbon
^{137}Cs	radioaktives Cäsium
^{40}K	radioaktives Kalium
^{14}N	Stickstoff
^{238}Pu, $^{239/240}Pu$	radioaktives Plutonium
^{222}Ra	radioaktives Radon
^{90}Sr	radioaktives Strontium
^{90}Y	radioaktives Yttrion
C: ^{12}C, ^{13}C, ^{14}C	Kohlenstoff: Isotope des Kohlenstoffs
Ca	Kalzium
CH_3COOH	Essigsäure
C_2H_2	Acetylen
CO_2	Kohlendioxid
CO_3^{2-}	Karbonat
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser
HCl	Salzsäure
Li_2C_2	Lithiumcarbid
NaOH	Natriumhydroxyd
PO_4^{3-}	Phosphat
Sr: ^{86}Sr, ^{87}Sr, ^{90}Sr	Strontium: Isotope des Strontium
$\delta^{13}C$	Verhältnis von ^{13}C : ^{12}C bezogen auf Standard und auf Durchschnittswert von Holz (korrigiert auf -25 ‰)
$\Delta^{14}C$	auf $\delta^{13}C$ normiertes Radiocarbon
$\delta^{14}C$	Verhältnis von ^{14}C : ^{12}C (entspricht 2 x δ13)

Abkürzungen:

%cv	Variationskoeffizient in Prozent
1/t; $1/t_C$	Austauschrate, Stoffwechselrate, turnover rate (z. B. von Kohlenstoff $1/t_C$)
A	Aktivierungs-Obergrenze für Osteone
a	Jahr
aaBD	scheinbare Knochendichte, areal appararent bone density (g/cm²)
Abb.	Abbildung
A-Bombe	Atom-Bombe
AIC	Akaike-Maß
AMS	Akzelerator-Massen-Spektroskopie
A_{Ost}	Osteonenfläche
ARF-Zyklus	Aktivierung, Resorption und Prozessumkehr, Formation des Knochengewebes
B	Knochenbilanz
BC	before Christ (vor Zeitenwende, vor Jahr 0)
BMC	Knochen-Mineralgehalt (Bone mineral content)
BMI	Body mass index
BMU	basic multicellular unit, z. B. (Sekundär)Osteon
bp, BP	before present (vor 1950)
BRU	bone remodeling unit
BSO	bone structural unit
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa, ungefähr
CB	Chondroid Bone; Chondroblast
chap	Chapter
CTF	concave-tending facing; Drift des Knochens in Richtung der konkaven Beugeseite
CTG	Computertomographie
d	dies, Tag
d. h.	das heisst
DAG	directed acyclic graph
d_C	Kompaktadicke
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
d_{Gewebe}	Dichte (Knochen als Gewebe)
d_M	Durchmesser der Markhöhle
DNS	Desoxyribonukleinsäure
d_{Organ}	Dichte (Knochen als Organ)
d_{Ost}	Osteonendurchmesser
d_S	Durchmesser eines Spongiosabälkchens (Trabekels)
d_T	Gesamtdurchmesser
ebd.	ebenda
ed	Editor
eds	Editoren
EO LBTS	Effector Organ of Lamellar Bone Turnover Systems, z. B. (Sekundär)Osteon
et al.	et alii
etc.	et cetera
f	Formation
f_C	Fläche (der Knochenkompakta im Querschnitt)
fig.	figure
f_M	Fläche (der Markhöhle im Querschnitt)
FoRCaDa	Forensische Radio-Carbon-Datierung
f_T	Fläche (des gesamten Knochens im Querschnitt)
GA	Gewebealter
GB	Großbritanien
ggf.	gegebenenfalls
h	Stunde
H-Bombe	Wasserstoff-Bombe
Hrsg.	Herausgeber
HWZ	Halbwertzeit

HWZ_{bio}	biologische Halbwertzeit (Verweilzeit x ln 2)
ID	Identifikationsnummer (hier für ^{14}C-Messwerte)
IKK	Interkorrelationskoeffizient
IQ	Intelligenz-Quotient
Jh.	Jahrhundert
k	Diskriminanzfaktor gegen Strontium (1/OR)
K	jährliche, relativer Korrekturwert zur $Skelettmasseänderung_{netto}$
Kap.	Kapitel
KI	Konfidenzintervall
l	Länge
Lj.	Lebensjahr
Ljz.	Lebensjahrzehnt
ln	natürlicher Logarithmus
m. E.	meines Erachtens
Max	Maximum
MES	Minimum Effective Strain
Min	Minimum
MU	mechanical usage
MW	Mittelwert
N	gesamter Stichprobenumfang, gesamte Individuenzahl
n	Stichprobenumfang, Individuenzahl in einem Teilkollektiv
nMiss	fehlende Werte in bezug auf den gesamten Stichprobenumfang (N)
OD	Osteonendichte, Osteonenakkumulation
OD_{GA}	Osteonenakkumulation in Abhängigkeit vom Gewebealter
O_{Fr}	Osteonenfragmente
O_M	missing osteons
OR	Observed Ratio (Verhältnis von Kalzium und Strontium)
ORU	osteonal remodeling unit
O_{St}	vollständige Osteonen
p	Porosität
p.	page
P: $P_{3,}$ P_{97}	Perzentil: 3. und 97. Perzentil
P_{50}	Median
pH-Wert	-log (Konzentration von H^+)
pM	physiologische Mitte des Knochens
pMC	percent modern, z. B. 100 % + $\Delta^{14}C$ % seit 1950
r	Korrelationskoeffizient (Pearson)
r	Resorption
R^2	lineares Bestimmtheitsmaß
R^2_{adj}	lineares Bestimmtheitsmaß, adjustiert
R_f	maximal gebildete Knochenmenge
rH-Wert	
R_r	maximal resorbierbare Knochenmenge
RU	Rasseunterschied (auch als %RU)
s	Standardabweichung
S.	Seite
s. o.	siehe oben
s. u.	siehe unten
SATMU	Skeletal Struktural Adaptations to Mechanical Usage
SDM	Sexualdimorphismus (auch als %SDM)
SM	Skelettmasse
SSW	Schwangerschaftswoche
SU	Sowjetunion
Suppl	Supplement
t	Tonne
t	turnover, Umsatz
t; t_C	Verweilzeit (z. B. des Kohlenstoffs im Gewebe t_C)

Tab.	Tabelle
TBCa	Gesamtkörperkalzium (Total body calcium)
tbl.	table
TBMC	Gesamtkörper-Mineralgehalt (Total body mineral content)
U	jährliche, relative Umbaurate
u. a.	unter anderem
U.S.A. (USA)	United States of America
v. Chr.	vor Christus (vor Jahr 0)
v. h.	vor heute (vor 1950)
v. u. Z.	vor unserer Zeit (vor Zeitenwende, vor Jahr 0)
vaBD	scheinbare Knochendichte, volumetric appararent bone density (g/cm³)
V_C	Volumen (der Kompakta)
v_f	Bildungsrate von Osteonen
V_f	Volumen neugebildeten Knochens
V_G	Gewebevolumen
vgl.	vergleiche
V_L	Volumen (der Leerräume)
V_M	Volumen (der Markhöhle)
Vol	Volumen
v_r	Resorptionsrate von Osteonen
V_r	Volumen abgebauten Knochens
V_{rs}	Umbildungs-Raum je Umbildungsprozess durch ein Osteon
vs.	versus
v_t	Knochenumatz (turnover)
V_T	Volumen (des gesamten Knochens)
yr	year, Jahr
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
z. Zt.	zur Zeit
α	Endbelastungs-Operator
β	(lokaler) Beanspruchungs-Operator
β^-	Aussendung eines Kernelektrons, damit Zerfall eines Neutrons zu einem Proton
β_0	y-Achsenabschnitt, Intercept
$\beta_{1 \ldots n}$	1. bis nter Regressionskoeffizient
Γ	Drift-Operator
ΔSM	jährliche, relative Skelettmasseänderung$_{netto}$
μ	Aktivierungs-Funktion oder -Rate von Osteonen
ρ	Knochenbilanz (Rho)
ρ_f	Walldicke oder Formation eines Osteons
ρ_r	Erosionstiefe eines Osteons
σ	Sigma-Zeit (Entstehungszeit eines Osteons: aus σ_r und σ_f)
σ_f	Zeit für Formation eines Osteons
σ_r	Zeit für Resorption und Prozessumkehr eines Osteons

Kapitel I
Einleitung

Alle Biowissenschaften befassen sich mit der natürlichen Variabilität ihrer Untersuchungsobjekte in Zeit und Raum. Aus dem Beobachten, Beschreiben und dem zeitlichen und räumlichen Vergleichen dieser Variabilität können Prozesse hervortreten, die hier stellvertretend mit den Begriffen Evolution, Vererbung und Adaptation, aber auch Ontogenese und Alterung benannt werden sollen. Somit sind das Erfassen inter- und intraindividueller Variabilität, das Beschreiben des Typischen und das Erkennen von Prozessen auch die Hauptthemen in der Anthropologie und Humanbiologie, die je nach Fachgebiet eine an dem jeweiligen Forschungsobjekt orientierte Konkretisierung erfahren. Hier seien stellvertretend die Auxologie oder Entwicklungs- sowie Industrieanthropologie, aber auch die Skelettanthropologie sowohl mit ihrer historischen als auch angewandten forensischen Ausrichtung genannt. Und an dieser letztgenannten Stelle berührt die Biologie vom Menschen die Rechtsmedizin.

Denn im Gegensatz zu den Biowissenschaften, in denen es selten um die Rekonstruktion eines individuellen Schicksals geht und wenn, dann oft nur zur Veranschaulichung eines allgemeinen Prozesses (wie z. B. bei SHIPMAN 1981 in ihrer *‚Life History of a Fossil‘* zur Taphonomie; der Erfassung regelhafter dekompositorischer Prozesse nach Ablagerung eines Kadavers oder Leichnams), steht im Mittelpunkt der Arbeit eines forensisch arbeitenden Anthropologen immer das Bemühen um die Aufdeckung eines Einzelschicksals bis hin zur Identifikation. Diese Arbeit wird erschwert, wenn ein Skelettfund und dessen Befund (Fundumstände und Begleitfunde) keine (zeitliche) Einordnung der Knochen zulassen oder zwingend einen gegenwärtigen Bezug nahelegen. Das sind jedoch beides äußerst übliche Situationen, unter denen Knochenfunde eine kriminalpolizeiliche Aufmerksamkeit erfahren. Ob sich Ermittlungen anschließen und ob und mit welchem Erfolg diese durchgeführt werden können, hängt von der Beantwortung grundsätzlicher Fragen ab. Bei diesen geht es um die Bestimmung der Spezies, der Liegezeit, des Geschlechts, des Sterbealters, der Körperhöhe und Rasse und es geht um die Erhebung identifizierender, individueller

Merkmale wie Zahnstatus, Proportions- und Formmerkmale, seltene Varietäten (Discreta) bzw. pathologische Veränderungen sowie um die Erarbeitung von Hinweisen auf die Todesursache, den Sterbe- und Liegeort und ggf. Täter.

Aus dem Erfahrungsschatz der Skelettanthropologie lassen sich Methoden benennen, die zur Bestimmung von Spezies, Geschlecht, Sterbealter, Körperhöhe, Rasse und Individualmerkmalen herangezogen werden können. Diese Methoden – an definierten Skelettserien erarbeitet – bewähren sich bei der Untersuchung von ausreichend großen Gräberfeldpopulationen. Es lassen sich mit diesen Methoden trotz der biologisch bedingten Variabilität bei der Ausprägung der Einzelmerkmale vertret- und verwertbare Erkenntnisse gewinnen. Eine Methodenverbesserung führt hier nicht unmittelbar zur Erweiterung unseres Wissens. Wie weit diese Aussage Berechtigung hat, soll an einem Beispiel verdeutlicht werden: Die *‚Empfehlungen zur Alters- und Geschlechtsbestimmung‘* von 1979 bzw. die *„Empfehlungen für die forensische Geschlechts- und Altersdiagnose am Skelett“* von 2005 legen für die Altersbestimmung von Erwachsenen die Methode von ACSÁDI UND NEMESKÉRI (1970) nahe. Die Erkenntnisse aus den darauf aufbauenden Sterbetafeln erfahren durch die Verwendung der neuen Methode der Zementringannulation weder eine wesentliche Korrektur noch lassen sich grundsätzlich neue Erkenntnisse gewinnen. Damit stellt sich hier nicht die Frage nach einer Methodenkritik, sondern nach dem Nutzen eines methodischen Mehraufwandes in Routineuntersuchungen.

Anders stellt sich die Frage dagegen in der forensischen Anthropologie. Dem methodischen Aufwand ist hier kaum eine Grenze gesetzt. Geht es um die Verfolgung einer Straftat, wird dieser sogar erwartet. Allerdings kann auch dabei nur auf das sich ständig erweiternde Methodenspektrum der Skelettanthropologie zurückgegriffen werden. Die Verantwortung tritt hier bei der Formulierung und Interpretation der Untersuchungsergebnisse zutage und kann nur durch einen mit der speziellen forensischen Problematik vertrauten und idealer Weise an Gräberfelduntersuchungen geschulten Spezialisten (Osteologen) wahrgenommen werden. Dies soll bereits an dieser Stelle klar herausgestellt werden. Es sind vor allem zwei Aspekte, die diese Klarstellung erfordern.

Unsere Ausbildung drängt auf eine immer größere Spezialisierung – und wegen der großen Informationsfülle ist es selbst hier schwierig, Überblick zu wahren. Demgegenüber wird es aber auch immer leichter, auf fachfremde Informationen zurückzugreifen. Gute grafische Darstellungen, Formeln, mehr oder weniger leicht reproduzierbare Ergebnisse

einer Apparateforschung verführen mitunter zur Anwendung einer Methode ähnlich einem ‚Kochrezept' (z. B. so bei VERHOFF ET AL. 2006). Die fachintern geführte Diskussion über den Stellenwert einer Methode bleibt für den gelegentlichen Anwender zu häufig unerkannt. Interdisziplinäre Ausbildung / Forschung in personam wird unter diesen Bedingungen schwierig. Zwar immer wieder gefordert, findet sie innerhalb der Wissenschaftlergemeinschaft nur bedingt Akzeptanz. Diese Problematik muss hier benannt werden, da mit der vorliegenden Arbeit selbst ein Zugreifen auf unterschiedliche Fachgebiete verbunden ist.

Wie bereits deutlich wurde, besitzt die Erfassung von zeitabhängigen Prozessen in der forensischen Osteologie eine große Bedeutung. Zum einen betrifft dies die Bestimmung des Lebens- bzw. Sterbealters des Individuums. Dazu stehen eine Reihe etablierter Methoden zur Verfügung, sodass in Abhängigkeit von Geschlecht, Alter, Fragmentierungsgrad und Erhaltungszustand der Überreste eine Altersbestimmungen mit einer Genauigkeit von Monaten bis zu einem Jahr bei Säuglingen und Kleinstkindern, aber auch bis hin zu einigen Jahrzehnten bei älteren Erwachsenen möglich ist. Diese Unterschiede sind abhängig von der eingesetzten Methode, berühren aber auch die mit dem Alterungsprozess einhergehende und zunehmende interindividuelle Variabilität der Menschen und führen zu den beschreibbaren Abweichungen zwischen dem in Kalenderjahren angegebenen chronologischen Alter und dem anhand einer Methode ermittelten (biologischen) Alter eines Menschen.

Demgegenüber stellt die Bestimmung der Liegezeit von Skelettfunden ein bisher noch nicht gelöstes Problem der forensischen Osteologie dar. In der Forensik spricht man von Liegezeit, wenn eine Todeszeitbestimmung durch das Auftreten später Leichenerscheinungen wie der Autolyse, Fäulnis und Verwesung nur noch eingeschränkt möglich ist, spätestens jedoch beim Vorliegen von Fettwachsbildung, Mumifikation oder Skelettierung. In Zusammenarbeit mit der Kriminalistik stellt aber gerade die Bestimmung der Liegezeit ein wichtiges, wenn nicht das zentrale Problem bei der Auffindung (isolierter) menschlicher Körper- bzw. Skelettteile dar. Denn ohne die Verknüpfung aller, z. B. am Skelett erarbeiteten Informationen mit der Vermisstendatei der Polizei – also mit Namen und Lebensdaten konkreter Personen – ist eine erfolgreiche Ermittlung kaum denkbar. So ist ganz konkret bei Tötungsdelikten ohne Identifikation oft kein Zugang zum Täter möglich.

Auf den Erhaltungszustand eines Skelettes wirkt eine kaum überschaubare Vielfalt biotischer und abiotischer Einflüsse: Zu diesen Einflüssen gehören Eigenschaften, die mit dem Verstorbenen selbst verbunden sind wie Sterbealter und Krankheiten, die die Dichte und die

Struktur des Knochens beeinflussen, die Stärke der Weichteilbedeckung und die Dauer, wie lange diese nach dem Tod erhalten bleibt. Zu diesen Einflüssen gehören aber beispielsweise auch der Ort der Deponierung (auf einem Friedhof, in einem Grab oder in einer Gruft, in einem Moor, im Wasser, auf der Erdoberfläche, geschützt oder ungeschützt) oder die Eigenschaften des Lagerungsortes (z. B. beim Boden dessen Typ, seine Feuchte und Durchlüftung, sein pH- und rH-Wert, dessen Grundwasserstand und Fluktuation) oder allgemein der Temperaturgang, die örtliche Niederschlagsmenge, die vorhandene Flora und Fauna mit Insekten, Nagern, Omnivoren und Carnivoren, Manipulationen von Menschen an der Leiche, ggf. Umbettungen, aber auch der Todesort in Kombination mit der Todesart wie z. B. Verbrennen, Erhängen, Vergiften. All diese und noch mehr Faktoren wirken untereinander beliebig variabel und kovariierend bei der Dekomposition eines Skelettes und zudem unterschiedlich auf die verschiedenen Knochen eines Skelettes, die sich z. B. in ihrem Kompakta- bzw. Spongiosaanteil unterscheiden, Röhren- oder Plattenknochen sind.

Im Ergebnis dieser Situation entstand eine ebenfalls kaum noch überschaubare Anzahl von Arbeiten zum Problem der Liegezeitbestimmung. Diese dokumentiert einerseits die Notwendigkeit und den Willen zur Lösung, andererseits aber auch, dass ein praxisbezogener, erfolgreicher Ansatz bisher fehlt. Zu diesem Bemühen gehört auch der Einsatz der Arbeitsgruppe um W. M. BASS (Knoxville, Tennessee; z. B. BASS 1984, RODRIGUEZ UND BASS 1985), mit einer anhaltenden Reihe von experimentellen Studien zur Dekomposition von Leichen unter definierten Bedingungen. Wegen der Nicht-Kontrollierbarkeit der vielfältigen Faktoren verbleibt oft nur die Kenntnis und Erfahrung des Untersuchers nach einer ausführlichen makroskopischen Inspektion, z. T. ergänzt um mikroskopische oder Laborverfahren unter Kenntnis aller Auffindungsumstände und -gegebenheiten. Aber auch dann sind Fehlbestimmungen bei der Liegezeit bis zu mehreren hundert Prozent keine Seltenheit.

In den letzten Jahrzehnten erfuhren Radionuklide eine besondere Aufmerksamkeit bei der Liegezeitbestimmung. Denn strenggenommen erfüllt nur der radioaktive Zerfall die Voraussetzungen für ein absolutes Datierungsverfahren, da er nach dem Tod eines Organismus unabhängig von abiotischen und biotischen, sowie kulturellen Umwelteinflüssen ist (ausgenommen eventuell von Kontamination aus dem Liegemilieu). Alle anderen biochemischen und physikalischen Verfahren müssen dagegen als wesentlich ungenauere Datierungsmethoden angesehen werden, beispielhaft seien hier nur der Abbau von Kollagen und Fluoreszenz-Verfahren genannt. Denn sie werden in unterschiedlichem, aber nie zu vernachlässigendem Umfang von den biotischen und abiotischen Liegebedingungen beein-

flusst. Daraus ergibt sich, dass die Reaktionsgeschwindigkeit nur ungenügend mit der kalendarischen Zeit korreliert und im Vergleich zu den Bedingungen, unter denen die Methode entwickelt wurde, interpretiert werden muss.

Um ein Radionuklid aber tatsächlich für Datierungszwecke nutzen zu können, sollten weitere Voraussetzungen erfüllt sein (SWIFT ET AL. 2001):

- Es sollte mit einfachen (preiswerten) analystischen Methoden nachweisbar sein
- Es sollte eine biologische Funktion erfüllen, sodass es im Gewebe eingebaut wird
- Beziehungsweise sollte es als Austauschpartner eines anderen Elementes in einem konstanten Verhältnis im Gewebe auftreten, z. B. Radio-Strontium und -Kalium zu Kalzium (^{90}Sr, ^{40}K zu Ca) oder Radiocarbon zu normalem Kohlenstoff (^{14}C zu ^{12}C). Dazu ist es notwendig,
  - Dass das Radionuklid in einer zeitlich und räumlich konstanten Konzentration im Ausgangsreservoir vorliegt,
  - Nur auf einem (Stoffwechsel)Weg in den menschlichen Körper gelangt und
  - Dass die Stoffwechselvorgänge während der Lebenszeit des Individuums nicht modifizierend auf dieses Verhältnis einwirken.
- Die Halbwertzeit sollte im Bereich der interessierenden Zeitskala liegen (< 40 Jahre).

Diese sehr allgemeinen Voraussetzungen erfüllt Radioncarbon (^{14}C) nur zu einem gewissen Teil. Denn die Halbwertzeit (HWZ) liegt mit 5730 ± 40 Jahren deutlich über der rechtsmedizinisch interessierenden Zeitskala. Auch kann von einer Konstanz des Radionuklids im Ausgangsreservoir, der Atmosphäre, nicht ausgegangen werden. Denn nicht zuletzt haben Aktivitäten des Menschen in den Kohlenstoffzyklus der Erde nachhaltig eingegriffen über den *Suess- oder Industriealisierungs-Effekt* (Kap. II 2.3.1), relativ langsam und kontinuierlich seit etwa 1850 und daher mit geringer Relevanz für Datierungszwecke, und über den *Kernwaffen-Effekt* (Kap. II 2.3.2), kurzfristig und radikal und damit eine deutliche Markierung für Datierungszwecke hinterlassend.

Bereits in den 50er, 60er Jahren wurde die ^{14}C-Methode als Hilfe bei Datierungsproblemen in der Rechtsmedizin diskutiert (SCHMITZ 1957, SPECHT UND BERG 1958, LOHMANN 1962), jedoch konnte damals der Atombomben-Effekt noch nicht genutzt werden. Aber gerade die Kombination von großer und damit für die Gegenwart zu vernachlässigender HWZ und dem Kernwaffen-Effekt sollte eine Anwendung dieser etablierten Methode in der Forensik ermöglichen. Dabei geht es jedoch nicht um die Beurteilung des voranschreitenden radioaktiven Zerfalls, sondern um den Vergleich der im Knochengewebe

gemessenen Konzentration an ^{14}C mit dem vorhandenen Angebot in der Atmosphäre als Ausgangsreservoir.

Mit dem Eingreifen des Menschen in den ^{14}C-Haushalt der Erde mit dem SUESS- bzw. Kernwaffen-Effekt ist bereits jetzt und aus rein methodischen Gründen eine problemlose Unterscheidung von Knochenfunden möglich in *historisch* (bis 1650, radioaktiver Zerfall), *prämodern* (zwischen 1650 und 1950; DEVRIES-Effekt, SUESS-Effekt) bzw. *modern* (nach 1950; Kernwaffen-Effekt). Desweiteren gehen TAYLOR ET AL. (1989) davon aus, mit Hilfe des ^{14}C aus den Kernwaffen-Explosionen Individuen mit einem Sterbejahr vor 1950, zwischen 1950 und 1965 und nach 1965 unterscheiden zu können. Letztere Annahme ist nicht unproblematisch und führt direkt zu der Fragestellung in dieser Arbeit. Aber allein die allgemeine Unterscheidung zwischen historisch, prämodern und modern stellt bei den skizzierten Problemen der Liegezeitbestimmung für isolierte Skelettfunde einen Zugewinn dar. Daher kann nur irritiert zur Kenntnis genommen werden, dass, obwohl TAYLOR ET AL. bereits 1989 dazu eine Arbeit am richtigen Ort, im *Journal of Forensic Sciences*, veröffentlichten, diese Möglichkeit keine breite Übernahme in die forensische Routineuntersuchung fand.

Desweiteren wurde der Kernwaffen-Effekt bereits für die Datierung von Whisky (WALTON ET AL. 1967), Wein (L'ORANGE UND ZIMEN 1968c, 1969a, b, ZIMEN 1972/73) und anderen alkoholischen Getränken (SCHÖNHOFER 1989) genutzt, zur Beschreibung des Wachstumsverhaltens von Gallensteinen (DRUFFEL UND MOK 1983), der Datierung von Pelzen (GEYH 2001) und zur Bestimmung der Stoffwechseltempi in verschiedenen menschlichen Geweben, z. B. auch im Knochengewebe, herangezogen (BROECKER UND OLSON 1960, LIBBY ET AL. 1964, STENHOUSE UND BAXTER 1977 b, 1979, NYDAL ET AL. 1971, L'ORANGE UND ZIMEN 1968a, b, WILD ET AL. 2000).

Obwohl diese Arbeiten dazu ermutigen, die ^{14}C-Methode erneut für die Liegezeitbestimmung und zwar über die durch TAYLOR ET AL. (1989) dargestellte Anwendung hinaus zu überprüfen, wurde anhand dieser Veröffentlichungen gleichzeitig deutlich, dass eine Übernahme der bisherigen Interpretationsmodelle für diese erweiterte Anwendung nicht ausreicht. Das Problem liegt vorrangig darin begründet, dass es sich beim Menschen um einen langlebigen Organismus handelt, bei dem es unter der individuell unterschiedlich langen Lebenszeit zu einer Vermischung der – entsprechend dem unterschiedlichen Angebot in der Atmosphäre aufgenommenen – unterschiedlichen Mengen von ^{14}C und zwar in Ab-

hängigkeit von ‚Stoffwechselvorgängen' in jedem einzelnen Gewebe kommt. In den Arbeiten zur ^{14}C-Methode selbst wurde nur eine sehr unzureichende Vorstellung dazu entwickelt, was unter diesen ‚Stoffwechselvorgängen' im Knochen zu verstehen ist, und in welcher Geschwindigkeit sich diese Prozesse vollziehen.

Entsprechend schnell wurde deutlich, dass für eine erfolgreiche Erarbeitung einer Methode zur Kurzzeitdatierung von Knochenfunden mit Hilfe von ^{14}C mehr als nur die Beprobung einer geeigneten, umfangreichen Stichprobe notwendig ist. Vielmehr mussten in einem ersten Schritt die methodischen Grundlagen dieses Vorhabens neu erarbeitet werden.

Aus diesem Grund wird dieser Arbeit das umfangreiche Kapitel II vorangestellt. In diesem wird die Literatur zur Radiocarbonmethode (Kap. II 2), zum Nachweis von Radiocarbon und Radiostrontium im Knochen (Kap. II 3), zur Benennung und zur ersten Quantifizierung physiologischer Prozesse im Knochengewebe (Kap. II 4 und II 5) kritisch beurteilt. Diese Kritik bezieht auch die eigene Weiterverarbeitung von Literaturdaten mit ein und berücksichtigt im gelegentlichen Vorgriff auch Ergebnisse dieser Arbeit. Wichtige Aspekte werden in nachfolgenden Kapiteln an notwendiger Stelle wiederholt bzw. es werden Querverweise gesetzt.

Unter Berücksichtigung des vorgefundenen Forschungsstandes erfolgt in Kapitel III die Formulierung der Aufgabenstellung für die vorliegende Arbeit. Das verwendete Material und die eingesetzten Methoden werden in Kapitel IV beschrieben. Die Ergebnisse werden in Kapitel V dargestellt und in Kapitel VI diskutiert. Diese Diskussion erfolgt im Gegensatz zu Kapitel II in jedem einzelnen Abschnitt jedoch sehr eng an den jeweiligen Voraussetzungen bzw. den eigenen Ergebnissen. Eine abschließende Diskussion und Methodenkritik des eigenen Datierungs-Modells für den Zeitraum zwischen 1865 und 2028 findet sich in Kapitel VI 3.3 und eine Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte dieser Arbeit in Kapitel VII. Den Kern der vorliegenden Arbeit stellen somit die Kapitel III bis VII dar.

Den Kapiteln II (Kritische Beurteilung der Grundlagen), IV (Material und Methoden), V (Ergebnisse) und VI (Diskussion) sind detailierte Inhaltsverzeichnisse vorangestellt, welche in Ergänzung zum Verzeichnis auf Seite III eine gute Orientierung ermöglichen sollen. Aus dem gleichen Grund sind den umfangreichen Kapiteln ebenfalls eine Einführung voran- bzw. sind Schlussfolgerungen nachgestellt.

Kapitel II

Kritische Beurteilung der Grundlagen

Inhaltsverzeichnis

II		Kritische Beurteilung der Grundlagen	9
II	1	Einführung	11
II	2	Die Radiocarbon-Methode	12
II	2.1	Einführung	12
II	2.2	LIBBYs Modell und seine Modifikationen	12
II	2.2.1	Die korrigierte Halbwertzeit für ^{14}C	14
II	2.2.2	DE VRIES-Effekt: Säkulare Variation und ihre Dendrokorrektur	14
II	2.2.3	Der globale Radiocarbonzyklus und Reservoir-Effekte	16
II	2.2.4	Isotopenfraktionierung	18
II	2.2.5	Kontamination	19
II	2.3	Anthropogen bedingte Veränderungen der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre	20
II	2.3.1	Der Industrialisierungs- oder SUESS-Effekt	21
II	2.3.2	Der Kernwaffen-Effekt	21
II	2.4	Die ^{14}C-Kurve in der Atmosphäre von 1860 bis 1996 (2028)	22
II	3	Der Nachweis von ^{14}C und ^{90}Sr in rezenten Knochen	25
II	3.1	Einführung	25
II	3.2	Die Radiocarbon-Methode (^{14}C) und die mittlere Verweilzeit des Kohlenstoffs im Knochenkollagen	26
II	3.3	Die Radiostrontium-Methode (^{90}Sr) und die mittlere Verweilzeit des Strontiums im Knochenapatit	36
II	3.4	Schlussfolgerungen	42
II	4	Die qualitative Bestimmung des Stoffwechsels im Knochen: Benennung der biologischen Prozesse	44
II	4.1	Einführung	44
II	4.2	Knochenwachstum und ‚baseline growth'	47
II	4.2.1	Desmale und (en)chondrale Ossifikation	48
II	4.2.2	Längenwachstum	49
II	4.2.3	Dickenwachstum	50
II	4.3	Knochenmodellierung und Knochendrift	50
II	4.4	Knochenumbildung	58
II	4.4.1	Der Umbildungsprozess oder ARF-Zyklus eines Osteons	60
II	4.4.2	Unterscheidung der Gewebeschichten in Bezug auf die Knochenbilanz	63
II	4.4.3	Knochenbilanz und Knochenumsatz	66
II	4.4.4	Histologische Sterbealtersbestimmung, Osteonendichte und ‚missing osteons'	68
II	4.4.5	Knochenbilanz und Belastung des Knochens	71
II	4.5	Schlussfolgerungen	74

II	5	Die Quantifizierung des Stoffwechsels im Knochen: Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ und die jährliche Austauschrate	76
II	5.1	Einführung	76
II	5.2	Die hierarchische Ordnung der Knochenmerkmale	79
II	5.3	Direkte und indirekte Verfahren zur Bestimmung der Skelettmasse und die schwierige Bestimmung der Knochendichte	85
II	5.4	Die Einflussgrößen auf die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ und die Umbaurate	95
II	5.4.1	Einführung	95
II	5.4.2	Der Einfluss des Geschlechts	96
II	5.4.3	Der Einfluss des Alters	100
II	5.4.4	Der Einfluss des Gewebealters	105
II	5.4.5	Der Einfluss der Konstitution (Skelettproportionen) und Skelettregion	107
II	5.4.6	Der Einfluss der Rasse / geographischen Region	112
II	5.4.7	Der Einfluss sozioökonomischer Faktoren	122
II	5.5	Korrekturwert und Umbaurate als Grundlage für eine jährliche Austauschrate $1/t_C$ von ^{14}C im Knochengewebe	128
II	5.5.1	Der Korrekturwert zur Skelettmasse-Änderung	128
II	5.5.3	Die jährliche Austauschrate $1/t_C$ von ^{14}C im Knochenkollagen	139
II	5.6	Schlussfolgerungen	142

II 1 Einführung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die Entwicklung einer Methode zur Kurzzeitdatierung (Liegezeitbestimmung) von humanem Knochengewebe mit Hilfe von ^{14}C in einem Literaturüberblick erarbeitet und kritisch beurteilt. Dieser fällt, dem Anliegen der vorliegenden Arbeit entsprechend, umfangreich aus. Denn die im Knochengewebe selbst gemessenen ^{14}C-Konzentrationen müssen erst interpretiert werden, da sie für sich allein zu einer differenzierten Liegezeitbestimmung nicht geeignet sind. Die wesentliche Quelle der Kritik sind eigene Daten und Verarbeitungen von Literaturwerten. Somit wird die Literatur hier nicht nur zitiert, sondern im Vorgriff auf eigene Ergebnisse (Kap. V) diskutiert.

Zuerst wird in Kapitel II 2 die Radiocarbon-Methode (^{14}C-Methode) mit ihren Möglichkeiten und Begrenzungen, aber auch mit den sich aus den Aktivitäten des Menschen ergebenden neuen Anwendungen beschrieben. In Kapitel II 3 werden nachfolgend die Arbeiten kritisch besprochen, bei denen unter Nutzung des Kernwaffen-Effektes die ^{14}C-Methode zur Kurzzeitdatierung für menschliche Gewebe bereits angewendet wurde. Da die in diesen Arbeiten vorgestellten Modelle zur Interpretation der gemessenen ^{14}C-Konzentrationen im Knochen als nicht ausreichend angesehen werden, wurde bei der methodisch verwandten Radiostrontium-Methode (^{90}Sr-Methode) nach weiterreichenden Erklärungsansätzen gesucht. Die dort vorgefundenen Vorstellungen führen weg von den in der Literatur zur ^{14}C-Methode vorgefundenen eher ‚physikalischen' Erklärungsmodellen, die von einer mittleren Verweilzeit des Kohlenstoffs im Knochengewebe ausgehen, hin zu eher ‚biologischen' Erklärungsmodellen, die den Kohlenstoff-Stoffwechsel im Gewebe selbst berücksichtigen. Im nachfolgenden Kapitel II 4 werden die biologischen Prozesse qualitativ benannt, die den Kohlenstoff-Stoffwechsel im Knochen erfassen. In Kapitel II 5 wird der Versuch unternommen, diese Prozesse ausreichend zu quantifizieren. Da dafür jedoch aus der Literatur keine Angaben direkt gewonnen werden konnten, wurde die verfügbare Literatur kritisch daraufhin gesichtet, ob und wie die im Rahmen dieser Arbeit benötigten Angaben gewonnen werden können. In diesem Zusammenhang war es einerseits notwendig, die Knochenmerkmale hierarchisch zu ordnen, und andererseits die in der Literatur angewendeten Methoden vor allem zur Bestimmung der Skelettmasse auf ihre Aussagekraft hin zu beurteilen und wichtige Einflussgrößen auf die Entwicklung der Skelettmasse und deren Umbau zu erarbeiten.

II 2 Die Radiocarbon-Methode

II 2.1 Einführung

In den nachfolgenden Abschnitten finden sich allgemeine Ausführungen zur ^{14}C- oder Radiocarbon-Methode, soweit diese für die hier vorgesehene Anwendung der Kurzzeitdatierung von Knochenmaterial eine Bedeutung haben bzw. diese zur Abgrenzung gegenüber der *„klassischen“*, eher im archäologischen Umfeld zu findenden Methode geeignet sind. Es werden ihre Fehlerquellen und Unschärfen kurz beschrieben und es wird beurteilt, ob und wie methodisch bedingte Messfehler bei allen nachfolgenden Schritten beachtet werden müssen. Einen schnellen und ausreichenden Überblick zu dieser Methode erhält man ebenfalls über „web-info radiocarbon“ unter www.c14dating.com. Diese Seiten sind vernetzt, z. B. mit dem Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC, http://cdiac.esd.ornl.gov/) des Oak Ridge National Laboratory in Oak Ridge, Tennessee, welches zum US-amerikanischen Energie-Ministerium gehört und über das auch ^{14}C-Daten aus Europa online zur Verfügung stehen.

II 2.2 LIBBYs Modell und seine Modifikationen

Radiokohlenstoff (^{14}C) ist eines von drei Isotopen des Kohlenstoffs. Prozentual verhalten sich die Anteile von ^{12}C **:** ^{13}C **:** ^{14}C wie 98,9 **:** 1,1 : 1 x 10^{-10} (LIBBY 1969, TAYLOR 1978, KATZENBERG 1992). ^{14}C entsteht natürlich durch kosmische Strahlung in den höheren Schichten der Atmosphäre (Stratosphäre) aus Stickstoff. Durch die sofortige Oxydation eines Großteils des Radiocarbons zu Kohlendioxid ($^{14}CO_2$) wird dieses dem Gleichgewicht aus Entstehung und Zerfall von ^{14}C entzogen. Jährlich entstehen derart ca. 80 t $^{14}CO_2$.

Als $^{14}CO_2$ nimmt Radiokohlenstoff am globalen Kohlenstoffzyklus teil. Zwischen den einzelnen Reservoiren: Atmosphäre, Biosphäre, Detritus (totes organisches Material, Produkt eines zellulären Zerfalls) und Boden, Oberflächenwasser der Ozeane, mittleres und tiefes Wasser der Ozeane, Lithosphäre stellt sich ein Gleichgewicht ein. LIBBY ging in

seinem Modell davon aus, dass dieses Gleichgewicht über die letzten 10 bis 20 000 Jahre bestand (LIBBY ET AL. 1949, LIBBY 1952, 1969, BOWMAN 1990). Seine Modellbedingungen lassen sich zu vier Punkten zusammenfassen:

(1) Es besteht eine konstante Produktions-, eine konstante und schnelle Vermischungs-, Austausch- und Umwandlungsrate von Radiocarbon

(2) Die verschiedenen Reservoire waren und sind über die Zeit konstant groß. Sie besitzen somit eine konstante Aufnahme- und Speicherfähigkeit von (Radio) Kohlenstoff

(3) Die Konzentration von ^{14}C ist innerhalb eines Reservoirs überall gleich groß

(4) Der Tod eines Organismus und das Ende seines Kohlenstoffaustausches mit der Umgebung fallen zusammen.

Da in der Atmosphäre und allen nachfolgenden Reservoiren die ^{14}C-Konzentration immer, also z. B. auch während der gesamten Lebensspanne eines Organismus, als konstant angenommen wird, haben folglich physiologische Prozesse kaum einen Einfluss auf die im Gewebe nachgewiesene Konzentration. Diese beträgt beim Tod des Organismus 100 % der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre. Unter diesen Modellbedingungen muss die in abgestorbenen Organismen messbare ^{14}C-Konzentration eine Funktion ihres physikalischen Alters darstellen, welches Radiocarbonjahren entspricht und in Kalenderjahren vor heute bzw. before prensent, d. h. vor 1950 (v.h., bp, BP), angegeben wird. Das Jahr 1950 wurde per definitionem als Bezugsjahr festgelegt: In diesem Jahr beträgt die ^{14}C-Konzentration einer Substanz bezogen auf einen Standard 100 % (seit 1960 NBS-Oxalsäure-Standard, GEYH 1983). Organismen mit einem Sterbejahr vor 1950 zeigen somit eine Konzentration unter 100 %. Die Differenz zwischen gemessener Konzentration und 100 % ist dabei abhängig vom radioaktiven Zerfall. Organismen mit einem Sterbejahr nach 1950 sollten danach per definitionem immer eine Konzentration über 100 % haben.

II 2.2.1 Die korrigierte Halbwertzeit für ^{14}C

LIBBY (1952) ging in seinem Modell von einer Hlabwertzeit (HWZ) von 5568 ± 30 Jahren aus. Bei der HWZ handelt es sich um die Zeitspanne, die statistisch gesehen verstreicht, bis sich die Menge eines bestimmten radioaktiven Isotops halbiert hat, indem sich diese in andere Atome umwandelt. 1962 wurde auf der 5. Radiocarbon-Konferenz die physikalische HWZ auf 5730 ± 40 Jahre korrigiert (GODWIN 1962). Beide Daten differieren um ca. 3 % (TAYLOR 1980, 1982) bzw. 3,5 % (LIBBY 1969), wobei mit Hilfe der unkorrigierten HWZ zu niedrige Alter berechnet werden (unkorrigiertes Alter x 1,03 entspricht korrigiertem oder echtem Alter). Die sich ergebende Differenz ist jedoch statistisch nicht signifikant, wenn man die methodischen sowie lang- bzw. kurzfristigen Veränderungen der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre berücksichtigt, wie diese nachfolgend dargelegt werden.

Diese Korrektur hat für die hier angestrebte forensische Kurzzeitdatierung keine Bedeutung, da die Datierung nicht über die Konzentrationsabnahme von ^{14}C entsprechend dem radioaktiven Zerfall erfolgt, sondern über den Vergleich der im Gewebe vorgefundenen ^{14}C-Konzentration mit der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre von 1860 bis 2028 (Abb. 1).

II 2.2.2 DE VRIES-Effekt: Säkulare Variation und ihre Dendrokorrektur

Zu Beginn der 50er Jahre konnte man anhand der Datierung altersbekannter archäologischer Funde noch von einer Konstanz der ^{14}C-Konzentration in allen ^{14}C-Reservoiren und damit von einer Übereinstimmung von Radiocarbon- und Kalenderjahren ausgehen (LIBBY ET AL. 1949, LIBBY 1952). Ende der 50er Jahre zeigte die ^{14}C-Datierung von Baumringen der letzten 300 Jahre allerdings Schwankungen im ^{14}C-Haushalt auf (DE VRIES 1958, WILLIS ET AL. 1960). Dieser Nachweis konnte erbracht werden, weil:

- Bäume in gemäßigten Klimazonen jährlich Wachstumsringe anlagern
- Diese durch ihre Wachstumsrate Klimaverhältnisse konservieren und ebenso ^{14}C-Konzentrationen der Atmosphäre eines bestimmten Jahres widerspiegeln
- Zwischen den Wachstumsringen verschiedener Jahre kein Isotopenaustausch stattfindet.

Seitdem wurden mehrere ^{14}C-Kurven an Baumringen verschiedener Arten erarbeitet. Diese verdeutlichen z. B., dass:

- Für den Zeitraum von 0 bis 1950 unserer Zeit die Abweichungen zwischen Radiocarbon- und Kalenderjahren weniger als ± 200 Jahren betragen
- Für den Zeitraum von 7300 vor unserer Zeit (v. u. Z; v. Chr. – vor Christus, BC – before Christ) bis zum Jahre Null die Abweichungen von ± 800 auf 0 Jahre abfallen.

Ursachen dieser Schwankungen sind kurz- und längerfristige Veränderungen des erdmagnetischen Feldes und der Intensität der Sonnenflecken (GEYH 1983, SUESS 1986, DAMON 1982, 1988, CREER 1988, BOWMAN 1990). Die Schwankungen der atmosphärischen ^{14}C-Konzentrationen werden heute allgemein, und nicht nur für die letzten 300 Jahre, als DE-VRIES-Effekt bzw. als säkulare Variation bezeichnet.

Im Jahr 1985 einigte man sich anlässlich der 12. Internationalen Radiocarbon-Tagung (RADIOCARBON 28/1986) auf die dendro-korrigierten ^{14}C-Kurven der Laboratorien in Seattle und Belfast als Eichkurven. Mit dieser Übereinkunft wird der enorme Fortschritt bei der Anwendung der ^{14}C-Methode deutlich, denn Messungen an verschiedenen Baumspezies verschiedener Standorte ergaben im Vergleich der Messergebnisse verschiedener Laboratorien nur geringe Unterschiede, auch wenn diese Kurven nachfolgend geringfügige Korrekturen erfuhren (7TH INTERNATIONAL AMS CONFERENCE, RADIOCARBON 38/1996). Diese dendro-geeichten ^{14}C-Kurven wurden anhand dekadisch bzw. bidekadisch zusammengefasster Baumringe erarbeitet. Für die Zuordnung organischer Substanzen mit einjährigem (Gräser) bzw. nur wenige Jahre (Haustiere) währender Lebensdauer sind diese Kurven ungeeignet. Hier muss auf genauere Vergleichskurven zurückgegriffen werden (RADIOCARBON 28/1986).

Die geeichten ^{14}C-Werte ergeben eine charakteristische Zackenkurve und verdeutlichen, dass Erwartungen an eine Übereinstimmung von bekanntem Alter und gemessenem ^{14}C-Alter auf wenige Jahre nicht erfüllt werden können. Dies betrifft vor allem die stark gewundenen Abschnitte der dendro-geeichten ^{14}C-Kurve. Zur Illustration des Problems sollen zwei Beispiele genügen: Für den in der Archäologie wichtigen Übergang von der Hallstatt- zur Latène-Kultur in Europa in der Zeit von 900 bis 500 v. u. Z. kann nur ein Radiocabon-Alter von 2580 ± 100 Jahren (STUIVER UND PEARSON 1986, p. 823) bzw. 2480 ± 100 Jahre (STUIVER UND BECKER 1986) angegeben werden. Ähnliches gilt auch für die

prä-moderne Periode von 1650 bis 1950. Für diesen Zeitraum kann nur ein Durchschnittsalter von 150 ± 50 Jahren (TAYLOR ET AL. 1989) bzw. von 120 ± 20 Jahren (STUIVER UND PEARSON 1986, p. 822) bzw. von 130 Jahren angegeben werden, wobei letzteres dem Jahr 1820 entspricht (STUIVER 1982, fig. 5 p. 11).

Im Rahmen dieser Arbeit ergibt sich daraus ein durchaus zu beachtendes Problem. Denn nach der Rechtsauffassung in der Bundesrepublik Deutschland verjährt Mord nicht. Überreste von Opfern aus prä-moderner Zeit liegen daher durchaus im kriminologisch-juristischen Interesse. Mit Hilfe der klassischen Radiocarbonmethode lassen sich diese jedoch nur unzureichend zeitlich zuordnen. Weiterhin ergeben sich Probleme bei der Abgrenzung von modernen Knochenproben (per definitionem mit einem Sterbedatum nach 1950) beim Vergleich der im Gewebe gemessenen ^{14}C-Konzentration zu der in der Atmosphäre nachgewiesenen Konzentration (Industrialisierungseffekt, hier Kap. II 2.3.1).

II 2.2.3 Der globale Radiocarbonzyklus und Reservoir-Effekte

Es wurde weiterhin deutlich, dass sich ^{14}C-Alter von Proben aus verschiedenen Reservoiren (z. B. Biosphäre, Ozeane) nicht problemlos korrelieren lassen und zwar unabhängig von den Schwankungen bei der ^{14}C-Entstehung und deren Dendro-Korrektur. Als Ursache ist hier das unterschiedliche Tempo des direkten und indirekten Kohlenstoffaustausches mit der Atmosphäre zu benennen. Je langsamer und je geringer dieser Austausch ausfällt, um so höher erscheint das ^{14}C-Alter, wenn man es unkritisch auf dendrogeeichte ^{14}C-Werte bezieht. Reservoir-Effekte treten u. a. im Vergleich zwischen Biosphäre und Ozeanen, zwischen Nord- und Südhalbkugel oder zwischen Festland und Insel auf, wobei für Proben aus den Ozeanen, von der Südhalbkugel und von Inseln die ^{14}C-Alter höher (älter) erscheinen. Bei Kenntnis der Herkunft der Probe lässt sich oft eine Alterskorrektur vornehmen (TAYLOR 1978, GEYH 1983, BOWMAN 1990). Diese Korrektur orientiert sich allerdings an Mittelwerten von Rezentproben: Reservoir-Effekte variieren in der Realität aber kleinräumig und oft unkontrollierbar. Zum Beispiel führt der Ausstoß von Kohlendioxid (CO_2) aus fossilen Brennstoffen in den Wintermonaten der gemäßigten Klimazone zu einer Verringerung der messbaren ^{14}C-Konzentration um bis zu 0,5 % (LEVIN UND HESSHAIMER 2000, S. 78). Da in dieser Zone in diesen Monaten kaum ein Aufbau von

Nahrungsmitteln (mit Ausnahme in Gewächshäusern) erfolgt, hat dies wohl kaum einen Einfluss auf die ^{14}C-Menge, die dort lebende Menschen über die Nahrung zu sich nehmen (vgl. hier Kap. II 2.3.1 und II 2.4).

Der Mensch als Kosmopolit und Omnivor nutzt die unterschiedlichsten Nahrungsquellen. Primär werden diese durch die jeweiligen natürlichen Ressorcen bestimmt. Außenkontakte (Handel), kulturell-technischer Fortschritt (Ackerbau, Gewächshäuser, genetisch manipulierte Lebensmittel) erweitern das Nahrungsangebot, religiöse Traditionen schränken dieses z. T. wieder ein (Verbot bestimmter Speisen). Im modernen Europa bestimmen dagegen viel eher Nahrungsmittelindustrie und individuelle Entscheidungen als kulturelle Traditionen die Essgewohnheiten, z. B. was den Anteil pflanzlicher und frischer Nahrungsmittel betrifft. Die Herkunft der Nahrung – und damit der Rerservoir-Effekt – nehmen also Einfluss auf die ^{14}C-Konzentration im Knochen (siehe hier auch Kap. II 3.2). Entsprechende Hinweise finden sich bei L'ORANGE UND ZIMEN (1968a, b), HARKNESS UND WALTON (1972), STENHOUSE UND BAXTER (1976, 1977a, b), BEAVAN-ATHFIELD UND SPARKS (2001) und BEAVAN-ATHFIELD ET AL. (2001). Der Mensch ist folglich Endglied verschiedenster Nahrungsketten. Wie diese im Individualfall zusammengesetzt war, kann nachträglich und vor allem für Skelettfunde kaum mehr bestimmt werden. Allerdings lassen sich hochspezialisierte Essgewohnheiten (SCHOENINGER 1989: Fischesser, Vegetarier), aber auch der Anteil von C4-Pflanzen (besonders Mais, VOGEL UND VAN DER MERWE 1977, VAN DER MERWE 1982) in der Nahrung über den sogenannten Effekt der Isotopenfraktionierung anhand des δ^{13}C-Wertes erkennen und entsprechend alterskorrigieren.

Ein Reservoir-Effekt ganz anderer Art deutet sich bei der Aufbereitung des Knochenkollagens durch unterschiedliche Methoden an, da dadurch vermutlich unterschiedlich alte Kollagenfraktionen aus dem Gewebe herausgelöst werden. Dies führt – aber nur bei Proben, die dem Kernwaffen-Effekt ausgesetzt waren – zu Unterschieden bei der gemessenen ^{14}C-Konzentration und hat damit erhebliche Relevanz für diese Arbeit (WILD ET AL. 2000).

II 2.2.4 Isotopenfraktionierung

Isotopenfraktionierung entsteht bei leichten Elementen durch die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Isotope. Bei jedem physikalischen, chemischen und physiologischen Prozess bewirkt dies eine Bevorzugung der leichteren Isotope: In der aufnehmenden Substanz kommt es im Vergleich zur abgebenden Substanz zu einer geringfügigen Anreicherung der leichteren Isotope. Für (fast) jede organische Substanz und Karbonate wurde das Verhältnis der stabilen Isotope ^{13}C **:** ^{12}C bezogen auf einen Standard bestimmt (*VPDB-Standard*: Belemnitella americana aus der Peedee-Formation in South Carolina; TAYLOR 1978, GEYH 1983, BOWMAN 1990). Dieses Verhältnis ($\delta^{13}C$) wird massenspektrometrisch nach abgeschlossener Probenaufbereitung bei jeder ^{14}C-Datierung bestimmt. Der so relativ zum Standard ermittelte $\delta^{13}C$-Wert wird schließlich noch auf den Durchschnittswert von Holz, das sind -25 ‰, korrigiert. Für $\delta^{13}C$ ergibt sich daraus ein Quotient in Promille:

Formel 1: $$\mathbf{\delta^{13}C = ((^{13}C/^{12}C)_{Proben} / (^{13}C/^{12}C)_{Standard} - 1) \times 1000\ ‰}$$

Auf Grundlage dieser Berechnungen werden Veränderungen bei der Isotopenfraktionierung erkennbar. Dabei ist es uninteressant, worin die Ursachen liegen. Sie können u. a. in der physikalisch-chemischen Aufbereitung, in der Entstehung oder Lagerung einer Probe oder im Reservoir-Effekt begründet sein (TAYLOR 1978, GEYH 1983, BOWMAN 1990).

Der $\delta^{13}C$-Wert gibt auch Auskunft über Veränderungen im ^{14}C-Gehalt der Probe. Dabei betragen die Veränderungen des $\delta^{14}C$-Wertes ($^{14}C/^{12}C$) das Doppelte der $\delta^{13}C$-Differenz. Das ergibt sich als Konsequenz aus der doppelt so großen Massedifferenz von ^{14}C zu ^{12}C im Vergleich von ^{13}C zu ^{12}C. Diese Beziehung zwischen $\delta^{13}C$ und $\delta^{14}C$ ermöglicht es, eine Abweichung bei der Isotopenfraktionierung bei der ^{14}C-Methode zu berücksichtigen. Das normalisierte $\delta^{14}C$ wird als $\Delta^{14}C$ bezeichnet. Durch spezialisiertes Nahrungsverhalten können sich geänderte $\delta^{13}C$-Werte bis zu 7 ‰ ergeben, was bei einem gemessenen ^{14}C-Alter von 0 Jahren zur einer Korrektur um 112 Jahre führt, wie sich mit nachfolgender Formel 2 in Annäherung berechnen lässt. Dies soll an dieser Stelle auch für das Verständnis der Isotopenfraktionierung und der $\delta^{13}C$-Korrektur ausreichen (BOWMAN 1990, ursprüngliche Formel STUIVER UND ROBINSON 1974, vereinfacht STUIVER UND POLACH 1977):

Formel 2: $\mathbf{t_C - t_m = 16 \times (\delta^{13}C + 25) \times Jahre}$

t_m - gemessenes ^{14}C-Alter
t_C - $\delta^{13}C$-korrigiertes ^{14}C-Alter
wobei gilt: $\delta^{13}C$ < -25, Probe wird jünger
$\delta^{13}C$ > -25, Probe wird älter

II 2.2.5 Kontamination

Kontamination (hier für jegliche Beimengung probenfremden Kohlenstoffs oder Austausch von probeneigenem mit fremdem Kohlenstoff) ist eine viel diskutierte Ursache für die Verfälschung von Proben unter Lagerungsbedingungen. Eine Unterscheidung zwischen den zwei theoretisch möglichen, aber gegensätzlichen Abläufen:

(1) Von Beginn an und kontinuierlich fortlaufend bzw.
(2) Verzögert einsetzend und dann fortlaufend

ist mit Hilfe der Radiocarbon-Methode nicht möglich. Auch Untersuchungen zur Dekompositionsgeschwindigkeit in verschiedenen Liegemilieus geben eher Auskunft über den zehrenden bzw. konservierenden Einfluss der Umgebung als über den prinzipiellen Charakter des Kontaminationsprozesses.

Je poröser eine Substanz ist, um so anfälliger ist sie für Kontamination. Knochen gehört zu diesen Substanzen und LIBBY (1952) schloss ursprünglich eine Datierung dieser Probengruppe sogar aus. Denn trockener Kochen besteht zu ca. 70 % aus anorganischer Substanz (Apatit), zu ca. 25 bis 27 % aus Kollagen und zu 3 bis 5 % aus weiteren organischen Bestandteilen (kürzere Proteine, Fette). Eine Kontamination der anorganischen Fraktion (Apatit) wird durch die Struktur des Knochens begünstigt. Während der Dekomposition des Knochens kann es hier durch einfachen Ionenaustausch (HERRMAN UND NEWESELY 1982, HENDERSON 1987) zu mehr oder weniger deutlichen Veränderungen kommen.

Erst nachdem BERGER ET AL. 1964 eine Methode zur Bestimmung von Radiocarbon im Knochenkollagen vorstellten und diese Methode nachfolgend eine Verbesserung erfuhr, gilt Knochen als zuverlässiges Probenmaterial. Denn Kollagen ist, wenn vorhanden, relativ unbeeinflusst von Kontamination. Es wird eher abgebaut als verändert (HEDGES UND WALLACE

1980, NELSON ET AL. 1986, KATZENBERG 1992). Zudem vollziehen sich Abbau und Kontamination in der organischen Fraktion ungleich langsamer als in der anorganischen. Um den Umfang eventueller Kontamination abschätzen zu können, ist es jedoch sinnvoll:

- Mehrere Fraktionen einer Probe zu datieren
- Zum Vergleich mit dem Fund assoziierte organische Materialien zu beproben
- Die bei der Probenaufbereitung als fremd herausgelösten Bestandteile zu datieren, um aus dem Unterschied der Messergebnisse von Kollagen und „Beimischungen“ auf den Umfang und die Richtung der Kontamination schließen zu können.

Die Beimengung älteren Radiocarbons bewirkt unabhängig vom wirklichen Alter der Probe pro Prozent ein „Altern” um ca. 80 Radiocarbon-Jahre. Dagegen bewirkt eine Beimengung jüngeren oder gar modernen Radiocarbons ein Jüngerwerden. Diese „Verjüngung” ist sehr stark vom wirklichen Alter der Probe abhängig: Je älter eine Probe ist, um so mehr wirken sich schon kleinste Beimengungen jüngeren/modernen ^{14}C aus (OLSSON 1974, POLACH 1975, TAYLOR 1978, BOWMAN 1990).

Wie sehr die Kontamination von den Lagerungsbedingungen abhängt, verdeutlichen verschiedene Arbeiten: So fanden GEYH UND GUHLICH (1974) eine gute Übereinstimmung zwischen anorganischer und organischer Knochenfraktion sowie assoziierten Huminsäuren, BERGER ET AL. (1964) und TAYLOR (1982) fanden eine gute Übereinstimmung von Knochenprobe und assoziierten organischen Proben, z. B. Holz. Demgegenüber fand TAYLOR (1978) Unterschiede bis zu 2000 Jahren zwischen anorganischer und organischer Knochenfraktion.

II 2.3 Anthropogen bedingte Veränderungen der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre

Neben den natürlichen Schwankungen des ^{14}C-Haushaltes lassen sich ab dem 19. Jahrhundert anthropogen bedingte Veränderungen der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre nachweisen. Es lassen sich hier als global wirksame Prozesse der *Industrialisierungs-* oder *SUESS-Effekt* sowie der *Kernwaffen-Effekt* und der regional begrenzte Einfluss von Kernkraftwerken benennen, wobei hier nur die ersten beiden Effekte betrachtet werden.

II 2.3.1 Der Industrialisierungs- oder SUESS-Effekt

Mit Beginn der Industrialisierung um 1850 setzte eine ständig zunehmende Emission ^{14}C-freien Kohlendioxids in die Atmosphäre ein. Ursache ist die Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Erdöl, Erdgas. Durch diese Emissionen wurde der annähernd stabile Kohlenstoffkreislauf nachhaltig gestört. Die Anreicherung der Luft und nachfolgend aller Kohlenstoff-Reservoire mit ^{14}C-freiem Kohlenstoff um jährlich ca. 0,03 % führt zu einem scheinbaren Altern rezenter Proben. So wurde 1950 ein ^{14}C-Wert von 97,3 % gemessen, was einem scheinbaren Alter von 250 Jahren vor 1950 entspricht. Dieser Effekt wurde zuerst durch SUESS (1955) erkannt und nachfolgend nach ihm benannt. Durch die seit 1960 übliche Verwendung des NBS-Oxalsäure-Standards bei der Standardisierung der ^{14}C-Messwerte wird diesem Effekt entgegengewirkt.

Neben der globalen Wirkung des SUESS-Effektes gibt es vor allem in den gemäßigten Klimazonen jahreszeitlich bedingte Schwankungen in der gemessenen ^{14}C-Konzentration der Atmosphäre bis zu 0,5 Prozentpunkten (LEVIN UND HESSHAIMER 2000), denn vor allem in den kalten Jahreszeiten werden gesteigert fossile Brennstoffe verbrannt und das ^{14}C-freie CO_2 „verdünnt“ regional das $^{14}CO_2$ der Atmosphäre. Einmal in die Atmosphäre gelangt, nimmt dieses CO_2 am globalen Kohlenstoffzyklus teil. Diese jahreszeitlich bedingten Schwankungen haben für die vorliegende Arbeit dahingehend eine Bedeutung, wenn Jahresdurchschnittswerte für die ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre zum Vergleich mit den ^{14}C-Messwerten herangezogen werden. Diese liegen somit unter den Werten während der natürlichen Vegetationszeit (Kap. II 2.4).

II 2.3.2 Der Kernwaffen-Effekt

Verursacht durch die oberirdischen A- und H-Bombentests von der Mitte der 40er Jahre bis zu deren Einstellung 1963 (SU, USA, GB) kam es zu einem Anstieg der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre. Im Jahr 1964 wurde ein Konzentrationsgipfel erreicht. Seitdem fällt die Kurve exponentiell. 1996 lag der gemessene Wert in der Atmosphäre bei ca.

110,4 pMC (*p*ercent *M*odern *C*arbon; LEVIN UND KROMER 1997; percent modern, entspricht 100 % + Δ^{14}C % seit 1950).

„After 1990, many of the extensive observational programs phased out as $^{14}CO_2$ approached a new quasi-natural equilibrium state. From 1982 onwards the globally decreasing $\Delta^{14}CO_2$ trend in fact almost exactly follows an exponential curve with a time constant of 18,70 ± 0,15 yr, thus changing from a decrease of about $\Delta^{14}CO_2$ = -13 ‰yr^{-1} in 1982 to about -4 ‰yr^{-1} in 1998 .... With the last atmospheric bomb test being conducted in 1980, and although much weaker underground tests are still performed, bomb ^{14}C homogenized in the troposphere and additional input from the stratosphere became negligible. “ (LEVIN UND HESSHAIMER 2000, S. 75).

Grundlage für die Abnahme des Radiocarbons ist dessen Eindringen entsprechend dem Kohlenstoffzyklus in die anderen Reservoire. Illustrativ für diesen Vorgang ist der Ausgleich der ^{14}C-Konzentrationen in der Atmosphäre zwischen Nord- und Südhalbkugel, wobei deren Konzentration bis heute nicht völlig identisch sind, nicht zuletzt wegen der geringeren Industrialisierung auf der Südhalbkugel und dem gegenläufigen Jahreszeitenwechsel.

II 2.4 Die ^{14}C-Kurve in der Atmosphäre von 1860 bis 1996 (2028)

Im Gegensatz zur klassischen ^{14}C-Methode erfolgt die Kurzzeit-Datierung über den Vergleich der gemessenen ^{14}C-Konzentration in der Substanz mit der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre in einem bestimmten Jahr. Daher ist es für die vorliegende Arbeit unbedingt notwendig, eine Verlaufskurve im Sinne einer Kalibrierungs-Kurve (WILD ET AL. 2000) für die ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre zu erstellen. Diese Kurve lässt sich anhand von Literaturdaten ausreichend genau zusammenstellen:

Ziel ist es, die Entwicklung der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre von 1860 bis 1996 (2028) auf der Nordhalbkugel und vorzugsweise für Europa lückenlos nachzuvollziehen. Die Untergrenze wird bestimmt durch das Geburtsjahr des ältesten identifizierten Individuums der vorliegenden Studie (1869, ID 1 Anhang 13). Die Obergrenze wird durch die verfügbaren ^{14}C-Daten definiert. Dieser Anspruch ist jedoch nur unter Kompromissen zu verwirklichen. So stellt die hier präsentierte ^{14}C-Kurve (Anhang 1, Abb. 1) eine Zusammenstellung von Werten verschiedener Quellen dar. Dieses Vorgehen ist jedoch akzeptabel, da

die Abweichungen in den Messwerten der einzelnen Quellen oft und vor allem für den Zeitraum vor 1950 unter dem methodisch bedingten Fehler von ca. 0,3 % lagen (Kap. II 2.2.1). Für den Zeitraum nach 1950 werden Werte aus Mitteleuropa bevorzugt, die durch die Arbeitsgruppe um MÜNNICH, LEVIN UND KROMER aus Heidelberg publiziert wurden und am besten die ^{14}C-Belastung in Europa beschreiben, und nicht auf die ebenfalls aus Europa (Norwegen) vorliegenden Werte (siehe: ftp://cdiac.ornl.gov/pub/ndp057/ndp057.pdf, NYDAL UND LÖVSETH 1996). Aber auch so stellt diese Kurve nur eine Näherung dar, von der es aus den bereits erläuterten Gründen zu groß- wie kleinräumig nicht kontrollierbaren Abweichungen kommt. Bei den Angaben werden aus der Literatur Durchschnittwerte für ein Jahr bzw. das Sommerhalbjahr ausgewählt und nicht die z. T. monatlich durchgeführten und über das Internet verfügbaren Einzelmesswerte herangezogen (für Vermunt bzw. für Schauinsland: ftp://cdiac.ornl.gov/pub/trends/co2/vermunt.c14 ; ..... /co2/schauinsland.c14). Auch werden die Werte von L'ORANGE UND ZIMEN (1969a) nicht verwendet, die für Weine gemessen wurden und für die Jahre 1953 bis 1966 jeweils etwas höhere ^{14}C-Werte liefern, als die zusammengestellte ^{14}C-Kurve der Atmosphäre. In Abbildung 1 wird von 1860 bis 1996 durch Literaturwerte (Anhang 1a) und ab 1997 durch Werte aus einer Berechnung von M. GEYH (Anhang 1b) gebildet:

- *1860 - 1954* (STUIVER UND BRAZIUNAS 1993), bei fehlender Angabe wurden gleichgesetzt: 1890,5 mit 1891; 1892,5 mit 1893 usw. bis 1910,5 mit 1911
  bzw. wurde zwischen vorangegangenem und nachfolgendem Jahr interpoliert und zwar für die Jahre 1890, 1892 usw. bis 1912 sowie 1946
- *1955 - 1958* (STENHOUSE UND BAXTER 1977a), Werte aus Diagramm fig. 1, p. 828, auf 0,5 % gerundet (entspricht auch STENHOUSE UND BAXTER 1979 fig. 1, p. 326)
- *1959 - 1976* (LEVIN ET AL. 1985, 1995), Wert für 1973 von 142,9 geändert auf 141,9 pMC, da Wert für „proposed clean air" nur 142,6 pMC beträgt
- *1977 - 1996* (LEVIN UND KROMER 1997, tbl. 2). Schauinsland (auf eine Dezimalstelle gerundet, Durchschnittswerte für die Messungen von Mai bis August)
- *(1930)1997 - 2028* (GEYH 1993, schriftliche Mitteilung).

Die hier dargestellte Kurve zeigt deutlich die stark veränderlichen ^{14}C-Konzentrationen in der Atmosphäre, die nachfolgend über sehr unterschiedliche Nahrungsketten in den menschlichen Körper gelangen und dort während der individuell unterschiedlich langen Lebensspanne „vermischt" werden. Diese ^{14}C-Kurve ist in dieser Arbeit als Kalibrierungs-Kurve verschiedenen Abbildungen hinterlegt. In Abbildung 1 ist sie für das gesamte Intervall von 1860 bis 2028 dargestellt.

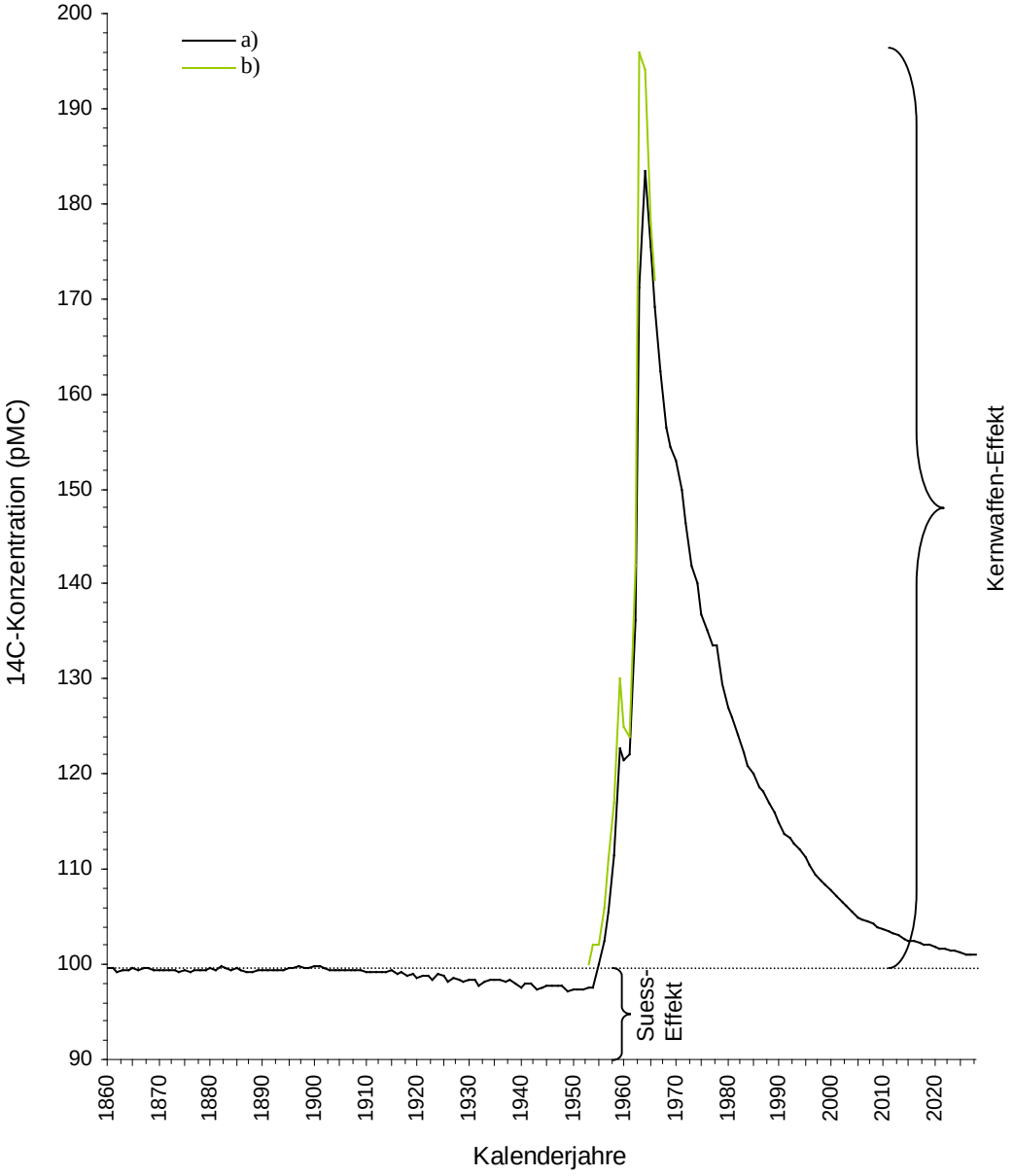


Abbildung 1: Die ^{14}C-Kurve der Atmosphäre (in pMC, percent Modern Carbon, entspricht 100 % + $\Delta^{14}C$ % seit 1950, Anhang 1)

a) 1860 – 1996 nach Literaturdaten von STUIVER UND BRAZIUNAS (1993), STENHOUSE UND BAXTER (1977A), LEVIN ET AL. (1985, 1995), LEVIN UND KROMER (1997).
1997 – 2028 nach GEYH (1993, schriftl. Mitteilung).

b) L'ORANGE UND ZIEMEN (1969a, Tab. 1 S291) mit nachfolgenden ^{14}C-Werten:
1953: 100, 1954: 102, 1955: 102, 1956: 106, 1957: 111, 1958: 117, 1959: 130, 1960: 125, 1961: 124, 1962: 142, 1963: 196, 1964: 194, 1965: 178, 1966: 172

II 3 Der Nachweis von ^{14}C und ^{90}Sr in rezenten Knochen

II 3.1 Einführung

In diesem Abschnitt wird diskutiert, inwieweit sich gesunder Knochen aus der Sicht der Radiocarbon-Methode (^{14}C) und im Vergleich zur Radiostrontium-Methode (^{90}Sr) als Datierungsmaterial für die forensische Osteologie eignet. Die Parallelisierung der gemessenen ^{14}C-Konzentration mit der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre ist bei kurzlebigen Organismen bzw. kurzzeitigen Prozessen problemlos. Dagegen entziehen sich vor allem bei langlebigen Organismen, wie z. B. dem Menschen, die gemessenen ^{14}C-Konzentrationen der einfachen Bewertung. Dies zu bewerkstelligen und die Ergebnisse zu Liegezeitbestimmung heranzuziehen, stellt das Ziel der vorliegenden Arbeit dar.

Knochen wird u. a. durch eine Verknüpfung extrazellulärer anorganischer (Apatit) und organischer (u. a. Kollagen) Substanzen gebildet. Diese sind eng mit der Funktion des jeweiligen Knochens verbunden. Grundlegend ist dies die Stütz- und Schutzfunktion und indirekt über das rote Knochenmark die der Blutbildung. Letztere beschränkt sich aber bei erwachsenen Individuen nur noch auf wenige Knochenregionen. Die Bedeutung des Kollagens liegt in der räumlichen Vorbildung des Knochens unter gleichzeitiger Wahrung einer begrenzten Elastizität. Apatit hat ebenfalls eine knochenverfestigende Funktion und ist darüber hinaus der Kalzium- und Mineralspeicher im menschlichen Körper. Wie bereits dargelegt (Kap. II 2.2.5), wird Kollagen als Probenmaterial für die ^{14}C-Bestimmung aus methodischen Gründen bevorzugt. Demgegenüber lässt sich mit der Radiostrontium-Methode der Apatit-Stoffwechsel beurteilen. Somit sind die Ergebnisse der Radiocarbon- bzw. der Radiostrontium-Methode nicht direkt vergleichbar. Doch wegen der engen Verknüpfung beider Knochenfraktionen ist zu erwarten, dass aus dem Strontium- also Apatit-Stoffwechsel wertvolle Hinweise für den Kohlenstoff- also Kollagen-Stoffwechsel gewonnen werden können.

II 3.2 Die Radiocarbon-Methode (^{14}C) und die mittlere Verweilzeit des Kohlenstoffs im Knochenkollagen

In den nachfolgend zitierten Arbeiten interessiert ausschließlich die mittlere Verweilzeit des Kohlenstoffs im Knochenkollagen t_C. Als durchschnittliche oder mittlere Verweilzeit wird die Zeit definiert, die zum Ersatz der Menge von Kohlestoff benötigt wird, aus der das Organ selbst besteht und ist damit sowohl von der Organgröße als auch von dem Umfang abhängig, wie dieser Austausch in einer definierten Zeiteinheit erfolgt. Daraus ergibt sich die jährliche Austausch- oder Stoffwechselrate als Reziproke der Verweilzeit $1/t_C$. Biologisch findet diese ihren Ausdruck in den Bildungs- und Umbauprozessen eines Organs, hier des Knochengewebes. Daneben finden sich Angaben zum Stoffwechsel als biologische Halbwertzeit (HWZ_{bio}), die sich als das 0,693fache der Verweilzeit errechnet (STENHOUSE UND BAXTER 1979, natürlicher Logarithmus von 2 (ln2) = 0,693). Bei der HWZ_{bio} handelt es sich um die Zeitspanne, in welcher der menschliche Körper/ein untersuchtes Organ die Hälfte eines aufgenommenen (radioaktiven) Stoffes wieder ausgeschieden hat.

"The turnover rate of bone collagen is not adequately documented. *STENHOUSE AND BAXTER (1979)* suggest a thirty-year period for complete replacement, *LIBBY ET AL. (1964)* suggest a period of about ten years, while *BUMSTED (1985)* suggests from two to ten years. While turnover studies have been carried out for various other forms of collagen, few, if any, have been done for bone collagen. We do know that bone collagen turns over slowly, likely requiring at least ten years for complete replacement. ... This phenomenon would negate the use of bone collagen for determinations of short-term seasonal or annual events. However, collagen or other stable proteins from tissues such as skin, hair, and nails may be useful for such studies since they are replaced much more rapidly." (CHISHOLM 1989, 20f).

Diese Zusammenfassung stellt die derzeitige Situation mit ihren Widersprüchlichkeiten sowie Unvollständigkeiten zutreffend dar: Die Schlussfolgerungen sind wegen der verkürzten Literaturauswahl fragwürdig, auch werden aufeinander aufbauende Arbeiten wie die von LIBBY ET AL. (1964) und STENHOUSE UND BAXTER (1979) unkritisch nebeneinander gestellt. Und ganz bestimmt lassen sich mit mehrjährigen oder gar langlebigen Organismen/ Geweben keine saisonalen Veränderungen dokumentieren (dazu auch BEAVAN-ATHFIELD UND SPARKS 2001, BEAVAN-ATHFIELDET AL. 2001). Doch ergeben sich daraus zwei im Rahmen dieser Arbeit interessierende Möglichkeiten:

(1) Fragen zum Stoffwechsel und damit auch zur Verweilzeit von Kohlenstoff in den einzelnen Knochengeweben können beantwortet werden

(2) Die Effekte des Atombombengipfels in der Atmosphäre lassen sich über den engen Zeitraum von 1960 bis 1990 hinaus nachweisen und ggf. interpretieren.

Weiterhin korrelieren von Wachstums- und Reifungsprozessen abhängige Stoffwechselvorgänge mit der artspezifisch definierten Lebensspanne eines Organismus. Beispielsweise wird bei der Skelettreifung des Menschen erst nach einem Jahr ein Stand erreicht, der dem eines neun Tage alten Hasens vergleichbar ist (HEIKEL 1960, SIMMONS 1976) bzw. sind Stoffwechselvorgänge mit Austauschzeiten von 2, 10 oder gar 30 Jahren für Labortiere mit relativ kurzer Lebensdauer unrealistisch. Weitere Besonderheiten des Menschen stellen der Eintritt in die Geschlechtsreife deutlich vor dem Abschluss des Wachstums, und auch des Skelettwachstums, sowie die auffallend lange post-reproduktive Lebensspanne dar. Aus experimentellen Tierstudien können sich somit nur bedingt Hinweise zur Geschwindigkeit des Kohlenstoff-Stoffwechsels beim Menschen ergeben und letztere werden bis zu einem Zigfachen unterschätzt (L'ORANGE UND ZIMEN 1968b). Entsprechende Arbeiten an Tieren werden daher hier nicht berücksichtigt, sondern nur Arbeiten, die humane Gewebeproben verwendeten. Gleichwohl können auch in kurzlebigen Tieren, wie z. B. Ratten, ^{14}C-Konzentrationen der Atmosphäre als ‚Mischung' bewahrt bleiben, die bis zu 30 bis 40 Jahre umfassen. Diese sind dabei vorrangig abhängig vom jeweiligen Nahrungsangebot und dokumentieren somit einen Reservoir-Effekt unabhängig von den Stoffwechselraten im Gewebe des Tieres selbst. Ein interessanter Hinweis findet sich dazu bei BEAVAN-ATHFIELD ET AL. (2001) und 2001 schreiben BEAVAN-ATHFIELD UND SPARKS:

„Biochemical fractions and tissues retain an isotopic memory of carbon in food at the time of synthesis, which is moderated by different rates of tissue turnover ... Unlike the fractionation effects upon stable isotopes in a food chain, ^{14}C levels above atmospheric are a function of time lags between initial photosynthesis and the time that vegetation was ingested by invertebrates, etc., and so on along a food chain. (S. 718) ...

The extremes of ^{14}C values observed also suggest that bone protein could be reflecting the mixture of ^{14}C signals spanning a time interval of up to 30-40 years. This effect is apparent only because of the rapidly changing bomb signal, and would not be easily observable in pre-bomb or older material." (S. 720).

Da Gewebe und Organe verschiedene Funktionen erfüllen, ist für diese auch mit unterschiedlichen Verweilzeiten zu rechnen (z. B. Blut sive Knochen, Kompakta sive Spongiosa). Neben dem Kohlenstoffaustausch mit der Umwelt (primäre Herkunft des Isotops) besteht

noch ein intra-individueller Austausch (sekundäre Herkunft des Isotops) zwischen und innerhalb der einzelnen Organe und Gewebe mit qualitativ recht unterschiedlichen Anteilen.

Mit der Radiocarbon-Methode, aber auch der Radiostrontium-Methode, ist die Herkunft einzelner Atome nicht zu ermitteln. Denn es wird nur der Effekt schwankender Konzentrationen festgestellt, die erst in einem weiteren Schritt in Beziehung zum Sterbealter bzw. zum Zeitpunkt der Probenentnahme und im Verhältnis zu einem nicht immer bekannten Zeitpunkt der Inkorporation Anhaltspunkte zur Austauschrate des betreffenden Isotops geben können. Bei der klassischen Radiocarbon-Methode spielt die primäre bzw. sekundäre Herkunft des Radionuklids auch keine Rolle, da ja während der gesamten Lebenszeit des Individuums von einer ausreichend konstanten ^{14}C-Konzentration in allen Reservoiren ausgegangen wird. Will man jedoch, wie in dieser Arbeit, sich ändernde ^{14}C-Konzentrationen im Ausgangsreservoir zu Datierungszwecken nutzen, nimmt ein intraindividueller Stoffwechsel Einfluss auf die Messergebnisse, denn es werden einerseits ‚ältere' Isotopen-Verhältnisse in Bezug auf die in einem bestimmten Kalenderjahr selbst vorliegende Konzentration in der Atmosphäre/Nahrung dem Stoffwechsel zugeführt, andererseits wurden diese ‚älteren' Isotopen-Verhältnisse bereits durch den Effekt der Isotopenfraktionierung (Kap. II 2.2.4) im Organismus modifiziert. Der sich im Gewebe vollziehende Stoffwechsel ist somit aktiver, als er sich anhand der gemessenen Isotopen-Verhältnisse darstellt. Somit lassen sich zwar die HWZ_{bio} und Verweilzeit t_C bestimmen, der Rückschluss auf die Austauschrate als $1/t_C$ ist bei einem hohen Anteil sekundären Radiocarbons problematisch (vgl. Kap. II 5.5). So ist z. B. im Vergleich zu Kollagen Apatit intraindividuellen und intraossealen Austauschprozessen stärker unterworfen bzw. sind diese durch die Kristallstruktur direkt vorgesehen (SMITH ET AL. 1983; Kap. VI 1 und VI 3).

BROECKER ET AL. (1959) bestimmten als Erste mit Hilfe des atombomben-induzierten Radiocarbons Stoffwechselraten in Weichgeweben des Menschen. Für die organische Fraktion aus Hartgeweben, also Knochen und Zähnen, gab es keine Aufbereitungsmethode und Apatit-Proben galten lange als unzuverlässiges Probenmaterial (Kap. II 2.2.5). Erst seit 1964 (BERGER ET AL.) kann Radiocarbon aus Knochenkollagen zur Beprobung genutzt werden und seitdem gilt auch Knochen als zuverlässiges Datierungsmaterial. Allerdings zeigt sich, dass die Methode der Kollagendarstellung einen nicht unwesentlichen Einfluss auf das Messergebnis haben kann (WILD ET AL. 2000), da durch diese unterschiedliche Kollagen-Fraktionen aus dem Knochen gelöst werden. Für die klassische Radiocarbon-Datierung haben diese Unterschiede jedoch keine Bedeutung.

Die konkreten Ergebnisse von BROECKER ET AL. (1959) besitzen heute keine Gültigkeit mehr, doch haben sie eine völlig neue Anwendung der Radiocarbon-Methode aufgezeigt und eine Reihe von Nachfolgearbeiten angeregt. Besonders in den 1960er und 1970er Jahren wurde versucht, die Verweilzeit von Kohlenstoff im Knochenkollagen zu ermitteln. In den 1980er Jahren wurde diese Frage fast nur noch im Rahmen von Arbeiten zur Nahrungsrekonstruktion mit Hilfe von ^{13}C diskutiert.

Zuerst ist die Arbeit von LIBBY ET AL. (1964) zu nennen. Die Autoren bezogen in ihre Studie auch zwei Proben aus Knorpelkollagen von jeweils 73jährigen Männern ein. Für beide Proben konnte keine Änderung der ^{14}C-Konzentration im Vergleich zu 1890 festgestellt werden:

> „The cartilage samples analyzed had incorporated essentially no C^{14} during the 10-year period in which the concentration of C^{14} in the atmosphere increased. Presumably, C^{14} will be found in the cartilage of younger subjects in whom active collagen synthesis is proceeding." (LIBBY ET AL. 1964, S. 1171).

Dies deutet auf eine mittlere Verweilzeit bei senilen Erwachsenen deutlich über 10 Jahre. CHISHOLM (1989, S. 20) zitiert die Ergebnisse dieser Arbeit somit nicht korrekt mit einer Verweilzeit von *„about ten years"*. Weitere Werte für Knorpelkollagen sind den Arbeiten von BERGER ET AL. (1965, 1966, 1967) zu entnehmen.

Weitere wichtige Arbeiten stellen die von L´ORANGE UND ZIMEN (1968a, b) dar. Im Jahr 1968(a) untersuchten sie elf Proben; acht von diesen stammten von Individuen mit einem Sterbealter zwischen 61 und 79 Jahren. Für diese senilen Individuen schließen sie unter den vereinfachten Bedingungen eines exponentiellen Isotopenaustausches auf eine HWZ_{bio} des Kohlenstoffs von 22 ± 2 Jahre im Knochenkollagen, was einer Verweilzeit t_C von ca. 32 Jahren oder einer Austauschrate $1/t_C$ von 3,13 % entspricht. Diese Annahme gilt für Menschen, *„deren stationäre Stoffwechselphase lange vor den Kernwaffenversuchen erreicht war."* (1968a, S. 492). Sie gehen dabei von einer Nahrung aus, die sich zu 70 % aus Kohlenhydraten (Getreide des Vorjahres) und zu 30 % aus anderen Lebensmitteln mit einem Alter von bis zu zwei und mehr Jahren zusammensetzt. Die Messwerte für die Proben einer 20- bzw. 30jährigen Frau erfahren keine Kommentierung. Ihre Werte sind deutlich erhöht gegenüber dem Durchschnittswert der senilen Individuen und deuten auf ein anderes, eben nicht stationäres Stoffwechselverhalten. 1969a untersuchten L'ORANGE UND ZIMEN 6 weitere Individuen, die bei ihrem Tod im Juni/Juli 1968 zwischen 56 und 88 Jahren waren

(Tab. 2 S. 293), sehr differenziert für Kollagen und Apatit jeweils getrennt für Spongiosa und Kompakta. Dabei wurde sowohl im Apatit als auch in der Spongiosa im Vergleich zum Kollagen bzw. zur Kompakta die jeweils höhere ^{14}C-Konzentration gemessen. Bei einer durchschnittlichen ^{14}C-Konzentration im Apatit von 123,7 ± 1,3 pMC ergab sich eine HWZ_{bio} von 10 ± 1 Jahre ($t_C \approx$ 14,5 Jahre, $1/t_C \approx$ 6,9 %) und für Kollagen mit einer durchschnittlichen ^{14}C-Konzentration aus den jeweiligen Mittelwerten von Spongiosa und Kompakta von 113,6 ± 1,3 pMC eine HWZ_{bio} von 18 ± 2 Jahren ($t_C \approx$ 26 Jahre, $1/t_C \approx$ 3,85 %).

HARKNESS UND WALTON bemühten sich ebenfalls in zwei Arbeiten (1969, 1972), die Stoffwechselprozesse beim Menschen mit Hilfe des Radiocarbons aus Atombombenversuchen aufzudecken. In ihrer zweiten Arbeit geben sie zudem ^{14}C-Konzentrationen einiger wichtiger Grundnahrungsmittel (z. B. Fleisch, Brot, Milch, Gemüse und Obst) an. Denn nur über diese tritt ja der Mensch mit dem Radiocarbon-Gehalt der Atmosphäre in Beziehung. Auch diese beiden Autoren stellen eine deutlich niedrige ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen im Vergleich zu Weichgeweben desselben Donors fest. Für sie ist anhand der ^{14}C-Konzentration im Knochen dieser um Jahre „älter“ als der restliche Körper. Eine weitere Schlussfolgerung ihrer Arbeit bleibt unverständlich, nicht zuletzt, weil dieser lediglich die Proben einer Frau zu Grunde liegen und Stoffwechselprozesse nicht diskutiert werden:

„ ... discrepancies between contemporary concentrations of "bomb ^{14}C" in the atmosphere and in human tissue cannot be attributed entirely to dietary modifications. It seems that the finite turnover time for carbon in the human body depends on ^{14}C concentrations in the environment.“ (HARKNESS UND WALTON 1972, S. 302).

Bereits 1965 veröffentlichten NYDAL UND LÖVSETH Ergebnisse u. a. zur Radiocarbon-Konzentration in der Nahrung und im Blut zweier Probanden. NYDAL ET AL. führten diesen Ansatz 1971 weiter. Unter Nutzung der Ergebnisse auch anderer Autoren wurde die durchschnittliche Verweilzeit im gesamten Körper des Menschen mit 10 Jahren angegeben, wobei Knorpelkollagen – siehe LIBBY ET AL. (1964) – alter Menschen als inaktiv beurteilt wird. Sie benennen drei Einflussfaktoren für die ^{14}C-Konzentration in den Geweben:

(1) Den Zeitraum zwischen Photosynthese und Verzehr der Pflanze
(2) Dem Anteil pflanzlicher Nahrung an der Gesamtnahrung
(3) Die Verweilzeit des Kohlenstoffs in den Geweben.

Von Bedeutung sind weiterhin die Arbeiten von STENHOUSE UND BAXTER aus den Jahren 1977 (a, b) und 1979. Sie gehen über eine Zusammenfassung der vorgenannten Arbeiten

hinaus. Neben einer Formel für die Belastung der Durchschnittsnahrung mit ^{14}C bieten sie für Erwachsene, also stationäre oder quasi stabile Gewebe, eine Formel zur Berechnung der ^{14}C-Konzentration von 1953 bis 1976 an. In diese geht in erster Annäherung auch die ^{14}C-Konzentration nach zwei linearen Wachstumsschüben von 0 bis 11 und von 11 bis 20 Jahren ein. Für diese zwei Zeitabschnitte wird ein zusätzlicher (gleichzeitiger) ^{14}C-Austausch im Modell vernachlässigt. Anhand ihres Modells schließen sie auf eine mittlere Verweilzeit von Kohlenstoff im Knochenkollagen erwachsener Individuen von mindestens 30 Jahren. Die Einbeziehung des unterschiedlichen Verhaltens wachsenden bzw. stationären Gewebes ist ein Ansatz, der bei der Beurteilung der eigenen Ergebnisse unbedingt zu berücksichtigen sein wird.

BUMSTED (1985) spricht dagegen auf S. 542 von einer Integrationszeit von Nahrungscarbon in das Knochenprotein von 2 bis 10 Jahren. Diese Annahme konkretisiert sie auf S. 544:

„Adult human bone provides a chemical record of approximately the last 10 years of life. ... Shorter time spans can be analyzed by taking advantage of our knowlege of bone growth and development. Several fractions of bone collagen can be extracted from relatively intact bone that have formed within weeks or months of death. Sites of active bone growth or repair provide contrast to the more stable and older bone regions."

Die Verwendung pathologisch veränderten (großräumig neugebildeten) Knochengewebes adulter Individuen für die Rekonstruktion von Durchschnittsnahrung ist sicherlich ein interessanter Ansatz. Für klassische Radiocarbon-Datierungen lässt sich dieser Ansatz auch diskutieren. Aber in pathologisch veränderten Geweben muss mit anderen Stoffwechselraten gerechnet werden. Und von diesen darf nicht auf eine durchschnittliche Verweilzeit von Kohlenstoff im Kollagen gesunden Knochens geschlossen werden. Das beabsichtigte Herauslösen unterschiedlich alter Kollagenfraktionen ist dagegen nicht mit dem unbeabsichtigten Ergebnissen bei WILD ET AL. (2000) zu verwechseln. Diese lösten durch verschiedene Aufbereitungsmethoden unterschiedlich alte Fraktionen aus der Knochenprobe, was zu deutlichen Unterschieden bei der Datierung führte. Im Endeffekt sind jedoch die gleichen biologisch-physiologischen Prozesse der Kollagenbildung dafür verantwortlich.

Der Vollständigkeit halber muss hier NIMNI (1991) zitiert werden. Er ordnet Knochen Geweben mit einer eher hohen Stoffwechselrate zu:

„Tissues (e.g., bone) which are involved in active remodeling are responsible for the major turnover, while other less dynamic tissues in the full-grown individual, (e.g., skin and tendons) might exhibit slow, almost negliglible, turnover." (NIMNI 1991, S. 568).

Diese Aussage kann nicht unwidersprochen zitiert werden. Haut – als äußere Abgrenzung des Menschen gegenüber der Umwelt – muss über den Stoffwechsel auf Umwelteinflüsse, z. T. in Form von Verletzungen, ständig und schnell reagieren. Es ist kaum vorstellbar, dass dies trotzdem zu einem vernachlässigbaren Austausch führen soll. Verglichen mit diesen Anforderungen ist Knochen relativ geringen extra- und intraindividuellen Einflüssen ausgesetzt und so lässt sich Knochenbildung regulär nur in geringem Umfang nachweisen (vgl. Kap. II 4.4 und Kap. II 5.5.2).

Eine noch kürzere HWZ_{bio} für ^{14}C im Knochen findet sich mit 40 Tagen im PSCHYREMBEL (2002, S. 877). Daraus errechnet sich eine Verweilzeit von ca. 58 Tagen und damit eine jährliche Austauschrate von ca. 630 %.

WILD ET AL. berichteten 2000 über den Versuch, anhand von verschiedenen Gewebeproben (Haar, Fett und Kollagen aus Knochen) die Liegezeit unter Verwendung des Programms INTCAL98 (PUCHEGGER ET AL. 2000) zu bestimmen, was eingeschränkt anhand der Fett- und Haarproben gelang und für Kollagenproben prinzipiell als nicht möglich diskutiert wird. Als Argumente wird von den Autoren die geringe Stoffwechselrate und das Fehlen eines allgemein akzeptierten Modells für den Stoffwechsel im Knochenkollagen angeführt. Gleichwohl vergleichen sie die gemessene ^{14}C-Konzentration im Gewebe direkt mit der in einem beliebigen Jahr gemessenen ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre im Sinne einer Referenz- bzw. Kalibrierungskurve. Das führte zu offensichtlichen Inplausibilitäten bei der Liegezeitbestimmung und reduziert den Menschen gleichzeitig auf eine „Einjahrespflanze“.

2001 veröffentlichte GEYH auf Grundlage der hier erst vorzustellenden Proben, die in seinem Labor beprobt, aber nicht freigegebenen wurden, seinen Artikel *‚Bomb Radiocarbon Dating of Animal Tissues and Hair‘*, ohne diesen mit der Ulmer Arbeitsgruppe zu besprechen oder auch nur anzuzeigen. Er verweist zwar auf einen in der Zusammenfassung publizierten Tagungsbeitrag von LUX UND RÖSING (1996), jedoch enthält dieser nicht die von ihm für seine Ausführungen herangezogenen Angaben zu den 48 Kollagenproben. Sein Artikel spiegelt vielmehr den Stand der bis zum Jahr 1995 durch die Ulmer Arbeitsgruppe offen mit M. GEYH geführten Diskussion wider. Er schreibt:

„Recent human bones cannot be dated with a constant precision. Despite an incomplete understandig of the process of incorporation of ^{14}C into human bones, the present dating technique is still more precise than most estimates by geriatric experts, for conventional ^{14}C dating follows that ^{14}C dates of bone collagen represent the years of the termination of puberty rather than those of death. (GEYH 2001, S. 723) ...

The burial time can, however, seldom be estimated with a precision of less than three years and may be as large as several decades. The assumption by LUX AND RÖSING (1996) that the precision is a constant ± 2,5 years is misleading. It is also open to question whether the dating precision increases with the number of ^{14}C analyses of bones from the same individual (LUX AND RÖSING 1996). In any case, the bomb ^{14}C dating method is also applicable for the first decades of the twentieth century. " (GEYH 2001, S. 726f).

GEYH (2001) berücksichtigt bei seinen Ausführungen nicht, dass sich die angegebene Präzision aus der Stichprobe herleitete, für die die Lebensdaten der einzelnen Individiuen eben bekannt waren und sich diese zudem in Bezug auf das Geburtsjahr und nicht auf das Sterbejahr errechnete und die, wie noch nachfolgend dargelegt werden wird, dynamische Modellvorstellungen berücksichtigte. Das zugrundeliegende PC-Programm wurde zu diesem Zeitpunkt bewusst nicht veröffentlicht, da es noch zu viele Manipulationsmöglichkeiten enthielt, die – in fremder Hand – zu nicht verantwortbaren Interpretationen führen könnten. In der eigenen forensischen Routine wurde zu diesem Zeitpunkt bereits für nicht identifizierte Knochenproben mit wesentlich größeren Präzisionsgrenzen gearbeitet, z. B. bei einer Präzision von 68 % mit ± 6 Jahren und bei einer Präzision von 99,72 % mit entsprechenden ± 18 Jahren. In seiner Arbeit geht GEYH (2001) dagegen von einer konstanten Austauschrate von 5 % bis zu einem Alter von 19 Jahren (‚*the end of puberty*') aus, der sich eine im Erwachsenenalter kontante Austauschrate von 1,5 % anschließt, was einer mittleren Verweilzeit von ca. 67 Jahren entspricht (vgl. Kap. VI 1.2).

Vorsichtiger formulieren dagegen LYNNERUP ET AL. (2005) ihre Ergebnisse. Sie diskutieren in ihrer Arbeit 11 forensische Fälle aus Dänemark (1963 bis 2001) und ordnen diese wie TAYLOR ET AL. (1989) 3 Perioden zu (I: <1650, II: 1650-1955, III: >1955). Daneben erwähnen sie unter Bezugnahme auf GEYH (2001) und WILD ET AL. (2000) eine Datierungsgenauigkeit für menschliche Gewebe mit Hilfe der ^{14}C-Methode auf ein Jahr. Gleichzeitig wechseln sie in ihrer Arbeit recht unverkrampft zwischen den Begriffen Gewebealter, chronologisches Alter, Sterbejahr, Sterbealter – was die Aussagen schwer nachprüfbar bzw. interpretierbar macht (vgl. Kap. II 5.4.3, II 5.4.4, V 1.3.3, VI 1.3.3, VI 3.2.6).

Die mit Hilfe der ^{14}C-Methode in der Literatur berichteten mittleren Verweilzeiten für Kohlenstoff im Kollagen liegen somit zwischen 2 bzw. 10 und 30 Jahren. Die Messwerte aus verschiedenen Arbeiten legen für mature bzw. senile Individuen sogar noch höhere Verweilzeiten nahe. Allen vorgenannten Autoren ist gemeinsam, dass sie sich bei der Interpretation der Messwerte auf das Sterbejahr des jeweiligen Menschen bzw. auf den Zeit-

punkt der Probenentnahme beziehen. Das entspricht dem Vorgehen in der klassischen Radiocarbon-Methode und ist auch insofern verständlich, weil die Probe erst ab diesem Zeitpunkt zur Verfügung steht. In Abbildung 2 wurden unter Verwendung einer Darstellung von STENHOUSE UND BAXTER (1979) die hier besprochenen und bis zum Jahr 1980 gewonnenen Knochen- und Kollagenproben (mit Ausnahme der Daten von L'ORANGE UND ZIMEN 1969a), mit ihren ^{14}C-Konzentrationen in Bezug zu der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre sowie den drei Kurven für die mittlere Verweilzeiten für Kohlenstoff im Knochen von 10, 20 und 30 Jahren dargestellt. Anhand dieser Abbildung werden zwei Aspekte deutlich:

(1) Die bisherigen Modelle beschreiben nur sehr ungenügend die Datensituation (einschließlich der Ausführungen von GEYH 2001)

(2) Die ^{14}C-Methode erscheint dennoch für eine Kurzzeitdatierung geeignet, da sich die Messwerte recht differenziert der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre zuordnen.

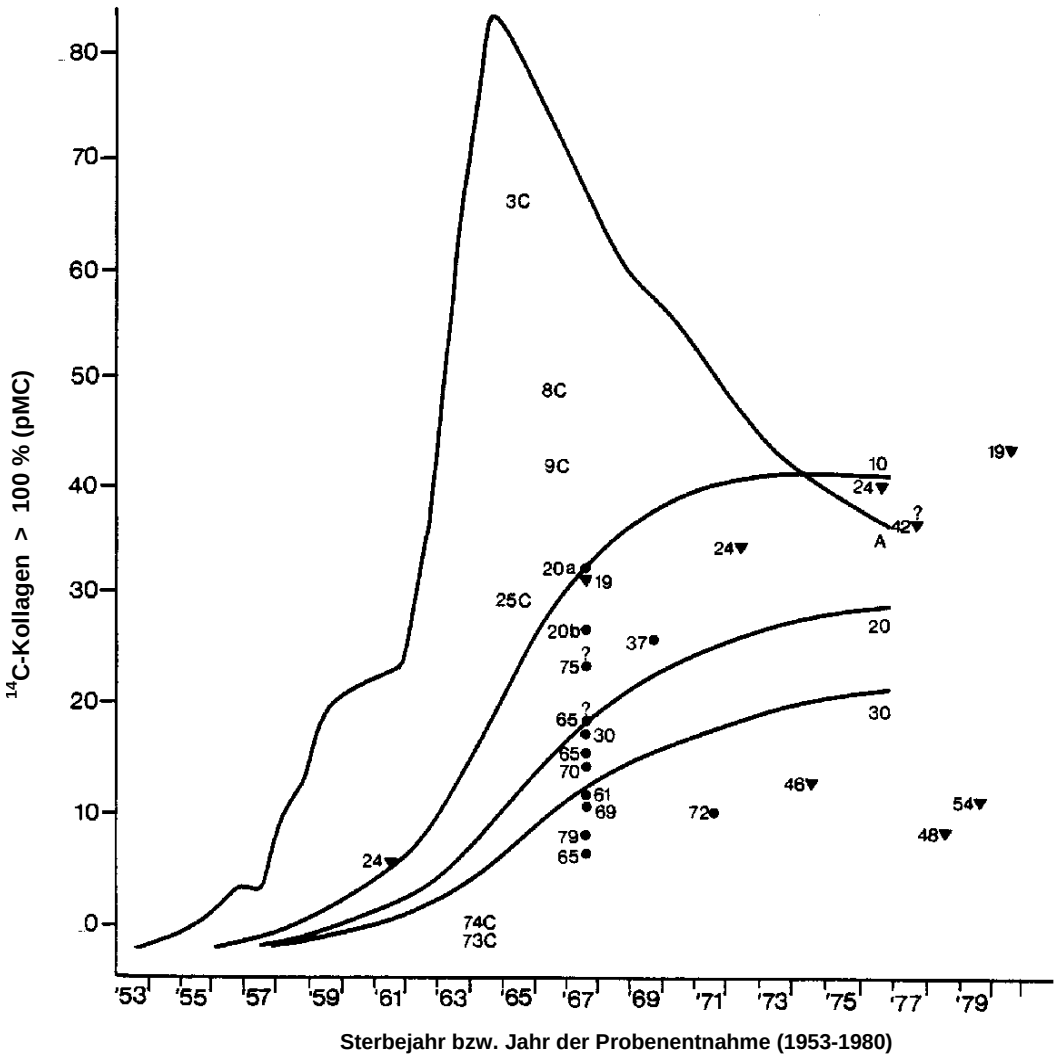


Abbildung 2: Darstellung der im Sterbejahr bzw. Jahr der Probenentnahme im Knochenkollagen und Knorpel gemessenen ^{14}C-Konzentration im Vergleich zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre sowie Kurven für eine mittlere Verweilzeit des Kollagens von 10, 20 bzw. 30 Jahren bis 1976 unter Verwendung der Darstellung von STENHOUSE UND BAXTER (1979) und ergänzt um Werte von LIBBY ET AL. (1964), L'ORANGE UND ZIMEN (1968a) und eigene Proben bis 1980 in percent Modern (pMC = 100 % + $\Delta^{14}C$ % seit 1950; Anhang 13).

Symbole für einzelne Messpunkte:
● weiblich, ▼ männlich, C Kollagen aus Knorpel (Cartilage), ? Geschlecht fraglich, (#) Lebensalter
Symbole an den Kurve:
A ^{14}C-Kurve der Atmosphäre; 10, 20, bzw. 30 mittlere Verweilzeit von Kohlenstoff im Knochen in Jahren

II 3.3 Die Radiostrontium-Methode (^{90}Sr) und die mittlere Verweilzeit des Strontiums im Knochenapatit

Es muss festgestellt werden, dass die Arbeiten über Radiostrontium bei der Interpretation der ^{14}C-Konzentrationen im humanen Knochengewebe wenig berücksichtigt wurden. Bei der innigen Verknüpfung von Apatit und Kollagen sind von diesen Arbeiten durchaus wertvolle Hinweise zu erwarten, zumal die unter Anwendung der Radiocarbon-Methode erarbeiteten Modelle zur Interpretation der Messergebnisse moderner Proben nicht genügen. Ziel dieses Abschnittes ist es jedoch nicht, eine Alternative zur ^{14}C-Methode in der speziellen forensischen Anwendung zu diskutieren, sondern Hinweise zur Interpretation entsprechender Werte unter Berücksichtigung des Stoffwechsels im Knochengewebe zu gewinnen. Für diese Anwendung sind die vorliegenden Arbeiten geeignet.

Strontium (Sr) ist ein Spurenelement. Im menschlichen Körper finden sich bis zu 99 % des vorhandenen Sr in den Knochen und im Zahnschmelz. Es ist ein Konkurrent zu Kalzium (Ca) und wird an dessen Stelle in vorgeformte Apatit-Kristalle eingebaut.

Wie bereits durch die Arbeit von L'ORANGE UND ZIMEN (1968a) angedeutet, müssen bei Knochenkollagen und -apatit unterschiedliche Austauschraten erwartet werden. Denn neben der knochenverfestigenden Funktion ist Apatit der größte Kalziumspeicher im menschlichen Körper. Bei Fehlernährung und Erkrankungen, die zu einer Veränderung des Kalziumspiegels im Blut führen, wird auf diesen Speicher zurückgegriffen. Diese Effekte sind im Nachhinein nicht oder nur in Ausnahmefällen am Knochen selbst festzustellen, modifizieren aber in nicht kalkulierbarer Weise den Stoffwechsel von Kalzium und damit Strontium im Knochen. Dieser Effekt ist geschlechtsunabhängig. Daneben kommt es bei Frauen über die Anzahl der Schwangerschaften und die Länge der Stillzeiten zu einem jeweils kurzzeitig stark veränderten Kalziumbedarf, der nachfolgend und unter normalen Bedingungen wieder ausgeglichen wird. GALLAGHER (1991) diskutiert sogar einen Knochenzuwachs bei häufiger Mutterschaft unter optimalen Ernährungsbedingungen.

Von den Isotopen des Strontiums besitzen ^{86}Sr und ^{87}Sr als stabile und ^{90}Sr als radioaktives Isotop größere Bedeutung. Die stabilen Isotope werden als Nahrungsindikatoren herangezogen (u. a. NELSON 1986, GRUPE 1986, SEALY ET AL. 1991, WOLFSPERGER 1992). Mit Hilfe des Radionuklids konnten dagegen grundsätzliche Aussagen zum Umbau im

Knochen gewonnen werden. Beide Forschungsrichtungen haben sich wiederholt gegenseitig ergänzt und korrigiert, so dass im Ergebnis wesentliche Momente des Strontium-Metabolismus als geklärt gelten (VAUGHAN 1975, NIELSEN 2004).

Die stabilen Isotope des Strontiums liegen im Boden in einem regional variierenden, aber zeitlich konstantem Verhältnis vor. Zusätzlich steht das Radionuklid in einem regional variierenden, dann aber ebenfalls konstanten Verhältnis zu den beiden stabilen Isotopen in Beziehung. Denn es kommt nicht natürlich vor, sondern ist ein Produkt der oberirdischen Kernwaffenversuche oder z. B. der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl. Es gelangt über die regional stark variierenden Niederschläge in einer entsprechend variierenden Konzentration in den Boden und von dort in die Nahrungsketten. Es zerfällt unter Emittierung von ß$^-$-Strahlung mit einer HWZ von ca. 27,7 Jahren zum Radionuklid Yttrium (^{90}Y), das eine HWZ von ca. 2,7 Tagen besitzt. Um die Gefährlichkeit für den Menschen abschätzen zu können, wurden in den 1950er und 1960er Jahren umfassende Studien durchgeführt. Über 10.000 Knochenproben wurden weltweit gesammelt und beprobt. Wesentliche Ergebnisse sind dem Tagungsband „*Strontium Metabolism*“, LENIHAN ET AL. (1967), zu entnehmen.

Der Mensch nimmt Strontium indirekt über die tierische und pflanzliche Nahrung oder direkt über das Trinkwasser auf. Für die Beurteilung einer Knochenprobe wäre somit die Kenntnis über die Herkunft der Nahrung des Spenders oder zumindest die Kenntnis seiner eigenen Herkunft oder seines (langjährigen) Lebensortes von Bedeutung. Dies stellt bei isolierten Knochenproben in der Rechtsmedizin regelmäßig ein nicht lösbares Problem dar und unterscheidet die ^{90}Sr-Methode ganz wesentlich von der ^{14}C-Methode. Die regionale Variabilität von ^{90}Sr und die unterschiedlichen Wege in den menschlichen Körper lassen ^{90}Sr daher nicht als globale Datierungsmethode für die forensische Anwendung als geeignet erscheinen (Kap. I, Kap. II 2.1). Obwohl der radioaktive Zerfall selbst nicht durch regionale Gegebenheiten beeinflusst wird, rücken die regionalen Unterschiede in der Ausgangskonzentration die ^{90}Sr-Methode nach eigener Auffassung deutlich in die Nähe der relativ datierenden Methoden. Schon aus diesen Gründen muss an dieser Stelle der Arbeit von NEIS ET AL. (2001) widersprochen werden, die diese Anwendung vorschlagen. Zusätzlich wirkt sich weiterhin die geringe HWZ modifizierend auf die im Knochengewebe nachweisbare Konzentration von ^{90}Sr unter einer Liegezeit aus, auch wenn gerade diese ^{90}Sr in die Nähe der von SWIFT ET AL. (2001) diskutierten ebenfalls artifiziellen Radionuklide Cäsium (^{137}Cs) sowie Plutonium (^{238}Pu und ^{239,240}Pu) rückt (Kap. I). Man wird sehr oft nicht unterscheiden

können, ob eine geringe ^{90}Sr-Konzentration im Gewebe auf einen vorangeschrittenen radioaktiven Zerfall oder auf eine geringe Ausgangsbelastung des Gewebes zurückzuführen ist.

Schwere Isotope, wie die des Strontiums, unterliegen im Gegensatz zum Kohlenstoff keiner biologischen Fraktionierung (SEALY ET AL. 1991). Das Verhältnis der stabilen Strontium-Isotope (Sr mit ^{86}Sr und ^{87}Sr) zu dem Radionuklid ^{90}Sr (^{90}Sr/Sr) ist, wie bereits erwähnt, dennoch nicht konstant. Neben den regionalen Unterschieden (BRYANT UND LOUTIT 1961, S. 19) lassen sich Konzentrationsunterschiede zwischen verschiedenen Knochen eines Skelettes durch unterschiedliche Umbauraten im jeweiligen Knochen erklären (RIVERA UND HARLEY 1965, S. 25). Des Weiteren bevorzugen die einzelnen Organismen in unterschiedlicher Weise eines der beiden sehr ähnlichen Elemente Kalzium bzw. Strontium. Zur Beurteilung dieser Eigenschaft definierten COMAR ET AL. (1957) die sogenannte *Observed Ratio (OR)* und KULP ET AL. (1960) einen Diskriminanzfaktor *k* als reziproke *OR* (Formel 3):

Formel 3:
$$\mathbf{OR = (Sr/Ca)_{Probe} / (Sr/Ca)_{Quelle}}$$
$$\mathbf{k = (Sr/Ca)_{Nahrung} / (Sr/Ca)_{Knochen}}$$

z. B. Probe: Knochen
Quelle: Nahrung, inklusive Trinkwasser

Für die Berechnung des Diskriminanzfaktors k als reziprokem OR sei noch auf die Arbeiten von COMAR (1967) und KNIZHNIKOV UND MAREI (1967) verwiesen. Neben der Schwierigkeit, die ^{90}Sr-Belastung bzw. Zusammensetzung einer „Durchschnittsnahrung“ zu definieren, ergibt sich beim Menschen zusätzlich das Problem einer altersabhängigen Fähigkeit, Strontium aufzunehmen. Diese Fähigkeit besteht in einer bevorzugten Aufnahme von Kalzium im Intestinaltrakt und gleichzeitig in einer bevorzugten Ausscheidung von Strontium über die Niere. So liegt die OR bei Neugeborenen bei 0,9 (GRUPE 1986, S. 34) bzw. bei 0,625 (BRYANT UND LOUTIT 1961), um dann über 0,5 im Alter von 2 Jahren auf 0,2 bis 0,25 im Erwachsenenalter abzusinken. Das heisst, dass in den ersten 2 Lebensjahren (Lj.) eine wesentlich geringere Fähigkeit zur Diskriminierung gegenüber Strontium besteht. Mit dem Ende dieses Lebensabschnittes werden dann schrittweise die im Erwachsenenskelett üblichen Werte erreicht. Gleichzeitig finden sich in der Literatur nachfolgende Angaben zur Sr/Ca-Konzentration (in µg Sr / g Ca):

- *Altersunabhängige* Konzentrationen von ca. 200 µg (Zusammenfassung bei PRICE ET AL. 1985, GRUPE 1986).
- *Altersabhängige* Konzentrationen mit einem Anstieg von der Geburt bis ins Senium von ca. 200 µg auf ca. 600 µg (PRICE ET AL. 1985);
  von ca. 200 µg bei Neonati, über 260 µg im Alter von 1 Jahr auf rund 320 µg im Erwachsenenalter (BRYANT UND LOUTIT 1961, S. 19f);
  mit regionalen Unterschieden zwischen 186 bis 292 µg bei Kindern zwischen 0 und 1 Jahr auf 254 bis 427 µg im Erwachsenenalter (RIVERA UND HARLEY 1965, S. 23)

Beide Ergebnisse sind nur möglich, wenn im Alter von 0 bis 2 Jahren eine mit Strontium weniger belastete Nahrung zugeführt wird als im gesamten späteren Leben. Besondere Bedeutung erhält hier das Stillen. Zwar enthält Kuhmilch vier- bis fünfmal mehr Kalzium als Muttermilch (ZUMKLEY UND SPIEKER 1988), gleichzeitig aber auch das Zehnfache an ^{90}Sr, hier als Anteil von Strontium insgesamt (BRYANT UND LOUTIT 1961, S. 24f). Darüber hinaus lässt sich jedoch kein grundsätzlich anderes Nahrungsverhalten von Kindern und Erwachsenen feststellen.

Die Zusammensetzung der über 10.000 weltweit gemessenen Knochenproben (LENIHAN ET AL. 1967) war nicht homogen. Es lagen Einzelknochen verschiedener Skelettregionen sowie ganze Skelette zur Beprobung vor. Bei Erwachsenenskeletten konnte im Gegensatz zu Kinderskeletten bis zu einem Alter von 4 oder gar 10 Jahren (BRYANT UND LOUTIT 1961, S. 17; FLETCHER ET AL. 1966) ein Konzentrationsunterschied für verschiedene Elemente eines Skelettes festgestellt werden. Es war daher notwendig, einen Korrekturfaktor für jedes Skelettelement in bezug auf das Gesamtskelett zu ermitteln (Tab. 1).

Tabelle 1: Korrekturfaktoren zur Berechnung der Stoffwechselaktivität in einem Einzelknochen bezogen auf das Gesamtskelett bei Erwachsenen, Literaturdaten.

Skelettelement	KULP ET AL. (1960)	BRYANT UND LOUTIT (1961)	RIVERA (1964)	MAREI ET AL. (1964)*
Wirbel	2,10 ± 0,10	2,40	1,83	1,72
Rippen	1,40 ± 0,10	1,10	-	-
Diaphysen	0,45 ± 0,02	-	0,70	0,41
Epiphysen (von Langknochen)	-	-	-	0,93

* Quelle zitiert nach Rivera 1967, Original nicht erreichbar

Intraindividuelle Unterschiede im Erwachsenenskelett lassen sich auf unterschiedliche Umbauraten in den Einzelknochen zurückführen. Ein Knochen weist im Vergleich zum

Gesamtskelett bei einem Korrekturfaktor > 1 einen erhöhten, bei einem Korrekturfaktor < 1 einen geringeren Stoffwechsel auf. Für das gesamte Skelett ergibt sich eine Austauschrate von 2 bis 3 % (KULP UND SCHULERT 1962). Für Einzelknochen ergeben sich Austauschraten von 1 % (Diaphysen der Langknochen) bis 8 % (Wirbel) (BRYANT UND LOUTIT 1961). Nach diesen Angaben besitzen Wirbel einen vier- bis achtfach so hohen Stoffwechsel wie Langknochen. Ähnliches gilt für die Rippen. Neben Brustbein, Beckenkamm und den Epiphysen der Langknochen sind dies die spongiosareichen Skelettelemente, und auch beim Erwachsenen sind es die Orte der Blutbildung. So konnten DEHOS ET AL. (1984) noch deutliche Unterschiede in der ^{90}Sr-Konzentration zwischen den Epiphysen und Abschnitten der Diaphyse eines Femurs (72jährige Frau, gestorben 1982) feststellen.

Für die Berechnung der ^{90}Sr-Konzentration im Skelett stehen weiterhin drei Modelle zur Verfügung. Wird für erwachsene Individuen eine gute Übereinkunft bei den Ergebnissen der verschiedenen Autoren festgestellt, ergeben sich gravierende Unterschiede bei den Berechnungen für die Knochen von Kindern und Jungendlichen (Zusammenfassung und Vergleich bei RIVERA 1967):

(1) KULP ET AL. (1957,1959, 1960), ECKELMANN ET AL. (1958) und KULP UND SCHULERT (1962) – nach grundsätzlichen Überlegungen von LANGHAM UND ANDERSON (1957) – setzen auch für Kinder die Austauschrate und den Diskriminanzfaktor als konstant voraus. Der altersabhängige Zuwachs wird korreliert mit dem jährlich variierenden Kalziumzuwachs im Skelett. Als Quelle für die Skelettreifung wurde MITCHELL ET AL. (1945) herangezogen.

(2) BRYANT UND LOUTIT (1961) und z. T. korrigiert in LOUTIT (1967) gehen dagegen von einer variierenden Austauschrate und einem variierenden Diskriminanzfaktor aus. Dabei steigt der Diskriminanzfaktor von 2,0 bis 2,8 auf einen im Erwachsenenalter konstanten Wert von 4,0. Die Austauschrate liegt im Alter von 0 bis 8 Jahren zwischen 50 und 60 %, um dann jährlich um 10 bis 20 % auf einen knochenspezifischen konstanten Erwachsenenwert zu sinken.

(3) RIVERA UND HARLEY (1965) und RIVERA (1967) führten eine Neuberechnung der beiden Faktoren konkret für Wirbel durch: Im Alter von 0 bis 16 Jahren steigt der Diskriminanzfaktor – allerdings nicht streng – von 2,8 auf 7,6 und die Austauschrate fällt von 50 auf 12 %, um dann wieder auf 24 % im 20. Lj. zu steigen. Bei der Berechnung beider Faktoren erfolgte ebenfalls ein Rückgriff auf die Arbeit von MITCHELL ET AL. (1945) zur Beurteilung der Skelettreifung, bzw. der Kalziumzunahme.

RIVERA (1967, S. 54) hat alle drei Modelle auf zwei konkrete Skelettserien (Wirbel) angewendet und die mit Hilfe dieser Modelle berechneten Werte mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen (Tab. 2).

Tabelle 2: Verhältnis der mit Hilfe von drei Modellen berechneten ^{90}Sr-Konzentrationen in Wirbeln zu den gemessenen Werten: $^{90}Sr_{berechnet}/^{90}Sr_{gemessen}$ (Literaturdaten, RIVERA 1967, S. 54).

Modell	New York	San Francisco	New York und San Francisco
KULP ET AL. (1957,1959, 1960)	0,93 ± 0,03	0,51 ± 0,02	0,86 ± 0,02
BRYANT UND LOUTIT (1961)	1,02 ± 0,03	0,57 ± 0,03	0,95 ± 0,03
RIVERA UND HARLEY(1965)	1,15 ± 0,03	0,63 ± 0,03	1,06 ± 0,03

Die deutliche Unterschätzung aller drei Modelle für die Serie aus San Francisco findet keine Erklärung. Das Modell von KULP ET AL. (1957, 1959, 1960) unterschätzt, das Modell von RIVERA UND HARLEY(1965) überschätzt die tatsächliche ^{90}Sr-Konzentration. Die Ansicht, dass das Modell von RIVERA UND HARLEY das besser geeignete sei, wird hier nicht geteilt. Obwohl KULP ET AL. bei einer konstanten Austauschrate und einem konstanten Diskriminanzfaktor aus biologischer Sicht eher von unzutreffenden Voraussetzungen ausgehen, werden auch mit diesem Modell ab dem 2. Lj. gute Schätzwerte im Vergleich zu den Messwerten erbracht (in Tab. 2 nicht explizit dargestellt, BRYANT UND LOUTIT 1961, P. 27).

BRYANT UND LOUTIT (1961) führen aus, dass anhand der Messungen und auch im Modell Austauschraten von 100 % in den ersten beiden Lj. möglich wären. Mit diesem Beispiel wird ein Problem aller drei Modelle verdeutlicht: Sobald eine Einflussgröße die Einlagerung von ^{90}Sr in den Knochen dominiert, wie hier die (früh)kindliche Skelettreifung, werden Fehlbestimmungen bei den anderen Einflussgrößen überdeckt und/oder ausgeglichen. Eine endgültige Entscheidung, welches der drei Modelle am besten die Prozesse im Knochen erfasst, muss an dieser Stelle aber nicht getroffen werden.

Ob es zudem zu einer langsamen Akkumulation von ^{90}Sr im Vergleich zu Sr im Apatit kommt, wurde in der Literatur (LENIHAN ET AL. 1967) diskutiert, jedoch nicht vollständig geklärt. In die Richtung einer Akkumulation im Sinne einer verringerten Abgabe von ^{90}Sr argumentieren auch DEHOS ET AL. (1984), die die deutlich höhere Konzentration des Radionuklides in den Epiphysen im Vergleich zur Diaphyse eines Femur nicht nur durch die Verschiedenheit des Gewebes (spongiosareich im Vergleich zur Kompakta) sehen.

Eine weitere Anwendung findet ^{90}Sr in der Audioradiographie. Längs- und Querschnitte durch Tierknochen (Hase), eine definierte Zeit nach einer einmaligen Injektion mit dem Radionuklid, erbrachten auch im Rahmen dieser Arbeit unbedingt zu berücksichtigende

Ergebnisse (SPIERS 1968). In *Längsschnitten* deutete sich ein Wiedereinbau von ^{90}Sr nach Abbau aus körper-/knocheneigenen Reservoiren an. So fand sich bei einem 5 bis 7 Wochen alten Hasen ^{90}Sr fast ausschließlich am (proximalen) Diaphysenende (Metaphyse). Sechs Monate später war dieses periostal am Diaphysenschaft konzentriert. Dies spricht für einen intraossealen Stoffwechsel, der mit Hilfe von Konzentrationsmessungen wie z. B. durch die der ^{90}Sr- und auch ^{14}C-Methode nicht erfasst werden kann (Kap. II 3.2). Weiterhin zeigten *Querschnitte* durch einen wachsenden Knochen ^{90}Sr-Konzentrationen proximal-endostal und distal-periostal. Die Vorstellung eines regelmäßigen periostalen Knochenaufbaus und eines endostalen Knochenabbaus ist mit diesem Befund unvereinbar, vielmehr wird hier eine *Knochendrift* unter Wachstumsbedingungen verdeutlicht. Diese Beobachtung steht in sehr guter Übereinkunft mit Tetrazyklinstudien von FROST (siehe hier Kap. II 4.3). *Querschnitte* durch erwachsenes Knochengewebe zeigen dagegen eine ungleichmäßige ^{90}Sr-Verteilung über die gesamte Fläche. Diese Beobachtung steht in guter Übereinkunft mit allgemeinen Umbauvorgängen im Knochen und der *Flexural Neutralization Theory* von FROST (hier Kap. II 4.4).

II 3.4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend wird festgestellt, dass Knorpel und Knochen (Kollagen bzw. Apatit) einen im Vergleich zu allen anderen Geweben relativ langsamen Stoffwechsel besitzen. Der Vergleich von Knorpel und Knochen ist hier zulässig, weil Knorpel ebenso wie Knochen eine Stützfunktion erfüllt und hierbei allenfalls flexibler auf Belastung reagiert. Gleichzeitig werden Knochen und Knorpel im Vergleich zu allen anderen Geweben am wenigstens durchblutet bzw. sind sie, da vorwiegend aus extrazellulären Substanzen bestehend, sogar fast vollständig von der Blutversorgung abgekoppelt (bradytroph; Knorpel: Versorgung hauptsächlich durch Diffusion). Der Vergleich von Apatit mit Kollagen erklärt sich aus ihrer Gemeinsamkeit als extrazelluläre Substanzen des Knochens. Die Ähnlichkeit ist jedoch eher in einer qualitativen als in der quantitativen Übereinstimmung zu sehen, wie es die etwa doppelt so hohe HWZ_{bio} von Apatit im Vergleich zu Kollagen anzeigt.

Als entscheidendes Ergebnis wird festgehalten, dass bei der Interpretation von nachgewiesenen Konzentrationsunterschieden eines Radionuklids im Knochengewebe „physika-

lische“ Modellansätze, wie sich diese vorzugsweise in der Literatur zur ^{14}C-Methode finden, nicht ausreichen. Vielmehr lassen sich inter- und intraindividuelle Konzentrationsunterschiede sowohl für ^{90}Sr als auch ^{14}C hauptsächlich zurückführen auf:

(1) Die (regional und/oder) zeitlich unterschiedliche Belastung der (Durchschnitts-) Nahrung mit dem Radionuklid

(2) Stoffwechselvorgänge im Knochen, die ihren Ausdruck in der Verweilzeit oder deren Umkehrwert, der Austauschrate, finden. Diese werden durch einen sekundären, weil erneuten Einbau des Radionuklids durch diese Methoden selbst aber eher über- (Verweilzeit) bzw. unterschätzt (Austauschrate)

(3) Den gleichzeitig und unabhängig vom Umbau stattfindenden Zuwachs von Skelett- bzw. Knochenmasse.

Gleichzeitig erfährt die erneute, optimistische Zuwendung zur ^{14}C-Methode bereits an dieser Stelle eine bedeutsame Einschränkung. Rein äußerlich präsentiert sich die „forensische“ Anwendung der ^{14}C-Methode zur Liegezeitbestimmung von Knochen als absolut datierende *physikalische* Methode. Doch dieser Anspruch kann nicht aufrecht erhalten werden. Da der radioaktive Zerfall von ^{14}C bei der Kurzzeitdatierung keine Bedeutung hat, kann auch dessen Charakter nicht in Anspruch genommen werden. Und im Gegensatz zu den bisherigen und sehr erfolgreichen „forensischen“ Anwendungen der Methode, z. B. bei der Datierung von Whisky (Kap. 2.3.2), ist der Mensch eben keine „Einjahrespflanze“. Vielmehr müssen bei den Erklärungsversuchen biologische Prozesse (Punkt (2) und (3) der obigen Aufzählung) in den Vordergrund treten. Denn nur über diese erfolgt der Einbau von ^{14}C in den Knochen. Damit rückt diese Arbeit in einen biologischen Kontext. Dieser Zugang wurde bei der Sichtung der Arbeiten zur ^{90}Sr-Methode deutlich (Kap. II 3.3). Das Fehlen entsprechender bzw. konsequent verfolgter biologischer Modellansätze in der Literatur zur ^{14}C-Methode erklärt die beschriebenen und sehr unterschiedlichen, weil „physikalischen“ und damit auch einfacher modellierbaren Vorstellungen vom Kohlenstoffaustausch im Knochengewebe (Kap. II 3.2). Das heisst aber auch, dass die hier verfolgte Methode um so besser zur Liegezeitbestimmung von Knochen geeignet sein wird, je genauer die zugrundeliegenden biologischen Prozesse benannt, gegeneinander abgegrenzt und modelliert werden können. Im Gegensatz zu etablierten relativ datierenden Methoden der Liegezeitbestimmung handelt es sich dennoch um eine absolut datierende, aber eben *biologische* Methode, auf die postmortale Einflüsse während der Dekompensation des Leichnams keinen Einfluss nehmen.

II 4 Die qualitative Bestimmung des Stoffwechsels im Knochen: Benennung der biologischen Prozesse

II 4.1 Einführung

Die unterschiedlichen Blickrichtungen und Fragestellungen auf bzw. zu Knochen führte vor allem in den letzten Jahrzehnten zu einer Weiterentwicklung von und zu einer Aufspaltung in zahlreiche Teildisziplinen mit einer unüberschaubaren Flut von Publikationen. FROST (1998) vergleicht die bestehende Situation in den *„Skelettwissenschaften“* mit einem modernen „Turm zu Babel“, wobei er vor allem die zu häufig fehlende Interdisziplinarität bei sich gleichzeitig herausbildenden, sich im Gebrauch spezifischer Termini widersprechenden Fachsprachen kritisiert (beispielhaft seien hier die Begriffe Knochen, Dichte und Knochenbildung genannt). SEEMAN (2001a) beklagt, TS ELLIOT aus „*The Rock*“ zitierend, den Verlust von Weisheit im Wissen, welches wiederum droht, in Informationen verloren zu gehen oder wähnt sich gar in auf einer Odyssee im Weltraum. Vielleicht ist es nur so zu verstehen, dass HENRY ET AL. (2001) mit nachfolgenden Erkenntnissen aufwarten, die einen Anthropologen oder Mediziner nicht überraschen sollten:

„We conclude that (a) higher bone formation in children compared to mature adults is due to the effects of pubertal growth; (b) the higher bone formation and resorption in boys and young adult men compared to their female counterparts is due their later skeletal maturity; (c) higher bone resorption in older women compared to mature adults is due to the effects of the menopause. This pattern of bone modeling and remodeling emphasises the need for age- and gender specific reference ranges.“

Ungeachtet der einleitenden Kritik existiert jedoch mittlerweile ein ausreichend gute Vorstellung über die ‚*Strukturhierarchie*‘ (KNESE 1979) bzw. „*intermediary organization of the skeleton*“ (FROST 1983b) und die alters- und geschlechtsabhängige Beziehung zwischen Knochenaufbau und -abbau. Die meisten der nachfolgend zitierten Arbeiten profitieren von den technischen Möglichkeiten moderner Forschung. Seit Beginn der 80er Jahre hält ein enormer Zuwachs an Erkenntnissen an. Die differenzierten Aufgaben der einzelnen Zelltypen im Knochengewebe sind annähernd bekannt. Im Interesse der Forschung stehen nunmehr die Prozesse der Steuerung und Regulation jenseits der Zellgrenzen: Die Signalübertragung u. a. mit Hilfe von Hormonen, Wachstumsfaktoren und durch direkten Zell-Zell-Kontakt sowie der lokalen Beeinflussung genetischer Prädispositionen und der Wechselwirkung zwischen den einzelnen Faktoren (HILL UND ORTH 1998). Einen guten Überblick zum Stand der Dinge gewinnt man in den Arbeiten von KARSENTY, MARIANI UND

MARTIN, HELMS UND SCHNEIDER, KRONENBERG, BOYLE ET AL., ZELSZER UND OLSEN sowie HARADA UND RODAN (alle NATURE 423, 2003).

Nach ORTNER (1976), KNESE (1979) bzw. FROST (1983b, 1985, 1986) lassen sich verschiedene Regulations- bzw. Hierarchie-Ebenen im Skelett festlegen (hier nach FROST 1985, tbl. 4, p. 82):

(1) Skelettebene: Das gesamte Skelettsystem
(2) Organebene: Der einzelne Knochen
(3) Gewebeebene mit
    a) *Oberer Ebene*: Z. B. periostale, (intra)kortikale, kortikal-endostale und trabekulare Knochenschicht der Diaphysen; lokale Beeinflussung von Knochenaufbau und Knochenabbau, Reparaturmechanismen, Homöostase; Auswirkungen über Monate und im Zentimeterbereich nachweisbar
    b) *Mittlerer Ebene*: Z. B. Struktureinheiten wie das Osteon oder *Basic multicellular unit* (BMU); Grundlagen von Knochenaufbau und Knochenabbau; Auswirkungen über Wochen und im Millimeterbereich nachweisbar
    c) *Unterer Ebene*: Z. B. Geflecht-, Lamellen- oder Osteonenknochen; Gewebebildung; Auswirkungen über Tage und im Mikrometerbereich nachweisbar
(4) Zellebene: Die einzelnen Zellen.

Ziel dieses (Kap. II 4) und des nachfolgenden Abschnittes (Kap. II 5) ist es, die Verweilzeit von Kohlenstoff im Knochen besser abschätzen zu können, als es mit der Radiocarbon-Methode bisher gelang (Kap. II 3.2). Daher stehen im Mittelpunkt der nachfolgenden Betrachtungen Prozesse auf dem Gewebeniveau des gesunden Knochens und ihre Manifestation auf dem Skelett- bzw. Organniveau. Es interessiert nicht, wie diese Prozesse auf der Zellebene oder jenseits davon auf der Ebene von Mikro- und Ultrastrukturen vermittelt werden. In diesem Sinn ist auch die Auswahl der nachfolgenden Literatur zu verstehen, die nicht zwingend dem modernsten Trend der Forschungen auf diesen Gebieten folgt.

Neben den Grundvoraussetzungen (‚*baseline conditions*') mit den genetischen, hormonellen, biochemischen und nahrungsabhängigen Einflüssen und der Homöostase (nicht nur im Knochen selbst) und ihren Wechselwirkungen wird vor allem der biomechanischen Belastung eine Schlüsselrolle bei der Bildung und Erhaltung von Knochengewebe sowie seiner Makro- und Mikroarchitektur beigemessen. Auf die mechanische Belastung werden 20 bis 40 % der Knochenmasse eines gesunden Individuums zurückgeführt (ANDERSON 2000). Allerdings gelten noch viele Fragen zur Adaptation des Knochengewebes an diese Beanspruchung wie auch an die anderen Einflussfaktoren als unbeantwortet.

Die makro- und mikroskopischen Strukturveränderungen im Knochen sind das Ergebnis von *Knochenwachstum* (*growth*, Kap. II 4.2), *Knochenmodellierung* (*modeling*, Kap. II 4.3) und *Knochenumbildung* (*remodeling*, Kap. II 4.4). Diese Unterscheidung hat sich vor allem im englischsprachigen Schrifttum weitestgehend durchgesetzt. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich vorwiegend auf Knochenkompakta. Sie bildet ca. 80 % der Skelettmasse und ist damit auch das bevorzugte Probenmaterial bei der Radiocarbon-Datierung. Rückschlüsse auf grundlegende Prozesse in der Spongiosa sind jedoch möglich. Eine Beschreibung dieser komplexen, sich überlagernden und in ihren Effekten ergänzenden bzw. auslöschenden Prozesse findet sich für beide Gewebearten z. B. bei PARFITT ET AL. (2000) anhand von histologischen Präparaten aus dem Beckenkamm gesunder Individuen in einem Alter zwischen dem 1,5. bis 23. Jahr.

Die Strukturveränderungen lassen sich dabei auf die Aktivitäten von *Osteoblasten* und *Osteoklasten* (knochenbildenden und -abbauenden Zellen) zurückführen. Diese Zellen sind im Knochen in Kohorten an konkreten Orten und zu bestimmten Zeiten aktiv. Bei diesen Zellen spricht JAWORSKI (1984) etwas sperrig vom *„Effector Organ of Lamellar Bone Turnover Systems: EO LBTS“*. Ein (Sekundär)*Osteon* stellt somit nur eine spezielle Form dieses Effektor-Organs dar. Die Anordnung der Osteoblasten im Gewebe bestimmt den Aufbau des gebildeten Knochens als Geflecht-, Lamellen- oder Osteonenknochen. Die Osteoblasten scheiden die extrazellulären Substanzen aus. Diese besteht aus organischen Bestandteilen, von denen wiederum mehr als 90 % aus Typ I Kollagenfasern bestehen (TEITELBAUM 2000) und aus anorganischem Apatit, welches sich zwischen den Fasern als Interfibrillarsubstanz findet und zu ca. zwei Dritteln das Knochengewicht bildet (HILL UND ORTH 1998).

Ein großes Problem stellt dar, dass sich die Knochenbildung und -umbildung weitestgehend einer Beurteilung *in vivo* entzieht. Interindividuelle Einflussgrößen (z. B. Alter, Geschlecht, Rasse, sozioökonomischer Status) und intraindividuelle Unterschiede (z. B. Kompakta vs. Spongiosa, Rumpfskelett vs. Extremitätenknochen vs. Schädel) führen dazu, dass für diese Prozesse bisher keine allgemein akzeptierten Modelle entwickelt werden konnten (SEEMAN 1997, SEEMAN 1998). Zudem verhalten sich Knochenzellen *in vitro* nur bedingt wie in vivo. Nicht- oder nur geringinvasive Methoden lassen sich immer noch zu schlecht reproduzieren (POWER 1998, SEEMAN 2001a). Trotz dieser Beschränkungen wird hier der Versuch unternommen, *Knochenwachstum, -modellierung* und *-umbildung* zu beschreiben und zu definieren, wie diese in der vorliegenden Arbeit verwendet werden.

II 4.2 Knochenwachstum und ‚baseline growth'

Knochenwachstum (*growth*) ist ein irreversibler Prozess, der intrauterin einsetzt und seinen weitestgehenden Abschluss ca. in der Mitte des 3. Lebensjahrzehnts (Ljz.) erfährt. Es findet an peri- und endostalen Knochenoberflächen bzw. an Knochen-Knorpelgrenzen statt. Danach kommt es nur noch in sehr geringem Umfang zu Knochenwachstum an peri- und seltener an endostalen Oberflächen der Knochenkompakta bzw. an der Oberfläche von Knochenbälkchen im Zusammenhang mit Modellierungsprozessen (siehe Kap. II 4.3). Unter pathologischen Bedingungen kann es jedoch bis ins hohe Alter immer wieder zu wachstumsähnlichen Prozessen kommen (z. B. Bruchkallus, Tumoren).

Wachstum führt zu einer Zunahme von Zellen und extra- bzw. interzellularer sowie interfibrillarer Substanz (KNESE 1979). Es beruht auf der alleinigen Aktivität knochenbildender Zellen, den Osteoblasten. Einfaches, ungesteuertes Wachstum führt zu unorganisiertem Gewebe. Diese Form des Wachstums findet sich im lebenden Organismus allerdings fast ausschließlich in krankem Knochengewebe als Geflechtknochen, z. B. bei Knochentumoren oder bei dauerhafter Überlastung des Knochens (BURR ET AL. 1989, FROST 1997, 2001). Unter physiologischen Bedingungen ist neugebildeter Knochen (*Primärknochen*) somit strukturiert.

Das ‚*baseline growth*' findet sich nach FROST als alleinige Form des Wachstums nur in den ersten postnatalen Lebensmonaten und bleibt nur ausnahmsweise, z. B. in von Geburt an paralysierten Gliedmaßen, erhalten und konserviert dann die perinatale Form des Knochens. Grundlage dafür sind Wachstum und Reifung des gesamten Organismus und die Homöostase.

> „Evidence drawn from the „natural experiments" observed in clinical practice (Frost, 1948-1989) shows that, depending on the feature in question, from 40%-80% of the normal adult skeletal architecture depends on baseline conditions and activities and the remainder reflects added mechanical usage (MU) effects ..." (FROST 1990a, p. 424).

Primärknochen ist seiner Struktur nach *Lamellen*- und deutlich seltener *Geflechtknochen*, nie *Osteonenknochen*. Dieser Knochen lässt sich nach seiner Funktion und Lokalisation sehr allgemein in *Kompakta* und *Spongiosa* unterscheiden (siehe Kap. II 4.4.2), wobei es regelmäßig zu Übergängen zwischen diesen Geweben kommt durch eine Trabekularisierung

von Knochenkompakta bzw. einer Umwandlung von Spongiosa in Kompakta („*cancelization of cortex*“ bzw. „*compaction of trabeculae into cortex*“: RECKER ET AL. 2003; für letztere findet sich bei ENLOW 1976 der Begriff ‚*compacted-coase-cancellous bone*‘). BURR (2004) unterscheidet im Bereich der freien Gelenke noch ‚*subchondral cortical bone*‘ und ‚*subchondral trabecular bone*‘ sowie ‚*calcified cartilage*‘, welche jeweils unterschiedlich auf Wachstums- und Reifungsprozesse reagieren. SIMMONS UND GRYNPAS (1990) ordnen den verknöcherten Knorpel dem ‚*chondroid bone*‘ (CB) zu, der eine Mittelstellung zwischen Knorpel und Knochen einnimmt und sich in Tumoren und Frakturkallus (CB I), in verknöcherten Sehnen und im Trachealknorpel (CB II) sowie als „*piscine [fischig] chondroid bone*“ (CB III) nachweisen lässt und damit unter normalen Wachstumsbedingungen nicht gebildet wird.

Es lassen sich beim Knochenwachstum (*en-do-)chondrale Ossifikation, Längen-* und *Dickenwachstum* unterscheiden. Diese drei Wachstumsformen bilden zugleich die Grundlage der Knochenmodellierung (Kap. II 4.3).

II 4.2.1 Desmale und (en)chondrale Ossifikation

Durch direkte oder desmale Ossifikation entstehen Bindegewebsknochen. Diese Form der Knochenbildung findet sich vorrangig bei den Schädelknochen des Neurocraniums. Dabei wandeln sich, sehr vereinfacht, Mesenchymzellen direkt in Osteoblasten. Diese bauen Knochengewebe direkt im embryonalen Bindegewebe auf.

Die meisten Knochen entstehen jedoch als Ersatzknochen aus einer knorpligen Vorstufe und somit durch indirekte oder chondrale Ossifikation. Sehr vereinfacht werden Mesenchymzellen zu Chondroblasten, die eine knorplige Vorstufe des Knochens im Bindegewebe aufbauen. In das Gebiet des knorpelig vorgebildeten Knochens wandern später Osteoblasten ein. Dabei ist die perichondrale (später periostale) von der en(do)chondralen Ossifikation zu unterscheiden. Bei der perichondralen/periostalen Ossifikation wird auf das bereits vorhandene Gewebe Knochen in Form einer Manchette aufgelagert. Diese Form der Knochenbildung ähnelt somit der desmalen Ossifikation. Bei der en(do)chondralen Ossifikation findet in Grenzbereichen des Knorpels der Aufbau von Knochensubstanz statt. Osteoblasten werden über einsprossende Blutgefäße herangeführt und sondern in Bereichen sich degene-

rierenden Knorpels (Blasenknorpel mit Eröffnungszonen und Verkalkungen) Knochensubstanz ab, wobei teilweise Knorpelsubstanz ummantelt und erst in späteren Umbauzyklen des Knochens abgebaut wird (SCHIEBLER 1996, dort Kap. 10.4).

Die en(do)chondrale Form der Knochenbildung erhält sich bei allen mit Knorpel überzogenen Knochenflächen. Diese wachsen durch Knorpelwachstum mit anschließender enchondraler Ossifikation: Der hyaline Knorpel wächst und die unteren Schichten verknöchern. Dadurch wächst der darunter liegende Knochen und kopiert die Form des darüberliegenden Knorpels, wie z. B. bei Patella und anderen Sesambeinen, Hand- und Fußwurzelknochen, Epiphysen, der Linea aspera und des Margo interossea (FROST 1990a, b, vgl. Kap. II 4.3.2). Knorpel ist zudem eine der wichtigsten Driftbarrieren.

II 4.2.2 Längenwachstum

Das Längenwachstum findet ebenfalls durch enchondrale Ossifikation der Metaphyse statt. Durch die schrittweise Verknöcherung der unteren Schichten der Metaphyse wächst der Knochen in die Länge (zum Wachstum von hyalinem Knorpel siehe FROST 1979 und 1990a).

Der Längenzuwachs ist an proximaler bzw. distaler Metaphyse von Langknochen nur in Annäherung gleich groß (ANDERSON UND GREEN 1948; MARESH 1955, 1970; MAAT 1984). Zum Beispiel werden nur etwa 43 % der Diaphysenlänge der Tibia in Bezug auf das Foramen nutricium an der distalen Metaphyse aufgebaut. Dies kann ein Hinweis auf die nicht genau mittige Lage des primären Ossifikationszentrums in der Diaphyse (MAAT 1984) sein. Es kann aber auch auf unterschiedliche mechanische Belastung beider Metaphysen und damit unterschiedliche Wachstumsreize hinweisen (Kap. II 4.3, FROST 1990a, b).

II 4.2.3 Dickenwachstum

Dickenwachstum erfolgt durch periostalen Knochenaufbau und endostalen Knochenabbau. Diese Form findet sich regelmäßig und überall nur im perinatalen Knochengewebe. Durch dieses Wachstum wird die äußere Form des perinatalen Knochens erhalten, wobei sich der Knochendurchmesser deutlich, der Kompaktadurchmesser aber nur unwesentlich erhöht (FROST 1987a). Während der Ontogenese werden – zwar seltener – auch endostaler Knochenaufbau und periostaler Knochenabbau beobachtet (Kap. II 5.5.1).

Die Möglichkeit einer Aktivierung von Osteoklasten an der endostalen (seltener periostalen) Knochenoberfläche zeigt auf, dass es sich bei dem Dickenwachstum nicht mehr um einen reinen Wachstumsprozess handelt. Vielmehr wird hiermit der Übergang zur *Knochenmodellierung* erreicht.

II 4.3 Knochenmodellierung und Knochendrift

Unter *Knochenmodellierung* (*modeling*) wird die Gestaltung der transversalen und longitudinalen Makroarchitektur des Knochens verstanden. Es kommt dabei zu einer Vergrößerung des Außen- und des Markhöhlendurchmessers, einer mehr oder weniger deutlichen Zunahme der Kompaktastärke und weniger der Knochenlänge sowie zu einer Veränderung der Gestalt des Knochens. Diese Veränderungen beruhen auf den Aktivitäten von Osteoblasten und Osteoklasten, die über einen längeren Zeitraum und räumlich voneinander getrennt an der peri- und/oder endostalen Knochenoberfläche aktiv sind. Der neugebildete Knochen ist ebenfalls Lamellen- bzw. selten Geflechtknochen, nie Osteonenknochen.

Knochenmodellierung ist zwar nur auf der Grundlage von Wachstumsprozessen möglich, dennoch ist diese und sind die damit verbundenen Veränderungen in der Makroarchitektur des Knochens als Folge einer sich ändernden biomechanischen Beanspruchung zu verstehen. Diese Annahme lässt sich auf WOLFF (1892) zurückführen und wird von FROST und nachfolgend auch anderen Autoren als „*WOLFF'S Gesetz*“ bezeichnet. Eine theoretische

Untermauerung erfolgte aber erst in den letzten Jahrzehnten. Die wesentlichen Momente dieser komplexen Vorgänge werden durch Theorien von FROST beschrieben (FROST 2001, 2003). Wenn diese auch nicht unwidersprochen sind (BERTRAM UND SWARTZ 1991, TURNER 1999, 2000, dagegen FROST 2000), lassen sich mit diesen grundsätzliche Knochenmodellierungs- aber auch Umbildungsprozesse (Kap. II 4.4) erklären, wobei die Mechanismen auf der Zellebene oder jenseits davon, z. B. der Mechanotransduction durch TURNER UND ROBLING (2004), weiterhin und kontrovers diskutiert werden.

Aber, Knochenwachstum und Knochenmodellierung dürfen nicht als Gegensätze verstanden werden. Vielmehr ist nachvollziehbar, dass die Knochenentwicklung gerade in verstärkten Wachstumsphasen durch normale biomechanische Belastung und darüber hinausgehende körperliche Aktivitäten beeinflusst wird. So wird z. B. zunehmend als wirksamste Osteoporose-Prophylaxe eine gezielte Erhöhung der Knochenmasse durch sportliche Aktivitäten besonders ab dem präpuberalen Alter bis zum Wachstumsabschluss ca. zur Mitte des 3. Ljz. gesehen (SEEMAN 1998, ANDERSON 2000, GUSTAVSSON ET AL. 2003), wobei die Effekte von Ausdauersport und Kraftraining wohl nicht gleichwertig sind (WALLACE ET AL. 2000). Allerdings beruhen diese Schlussfolgerungen auf epidemiologischen Kohorten- bzw. Fall-Kontroll-Studien, die eher zur Hypothesengenerierung als zu deren Testung geeignet sind (KARLSSON ET AL. 2001) oder wurden aus Tierexperimenten abgeleitet (z. B. ROBLING ET AL 2002). Unabhängig davon wird während der Zeit des prä- und puberalen Wachstumsschubes ca. die Hälfte der gesamten Skelettmasse aufgebaut (PARFITT 1994b) und PARFITT formuliert dort weiter:

„... an increased incidence of fracture during the adolescent growth spurt is the inescapable consequence of an appropriate level of physical activity, and is the price that has to be paid in order to maximize bone accumulation during growth and minimize fracture risk in old age." (P. 394).

Im Gegensatz zum Dickenwachstum unter Wachstumsbedingungen mit periostalem Knochenaufbau und endostalem Knochenabbau lassen sich bei der Knochenmodellierung auch periostaler Knochenabbau und endostaler Knochenaufbau nachweisen. Gleichzeitig kann es, muss es *lokal* aber nicht zu einem Anwachsen der Knochenmasse und -festigkeit kommen. *Global* kommt es dagegen aber bis zum 3. Ljz. unter den Prozessen der Knochenmodellierung immer zu einer Zunahme der Knochenmasse und -festigkeit (FROST 1997), im maturen und senilen Lebensalter immer und besonders deutlich bei postmenopausalen Frauen zu einer Abnahme der Knochenmasse (AHLBORG ET AL. 2003, RECKER ET AL. 2003).

Bei der Knochenmodellierung lässt sich häufig ein Driften des Knochens (*Knochendrift*) durch die umgebenden Weichgewebe bezogen auf Fixpunkte, z. B. je einem an der proximalen bzw. distalen Epiphyse, feststellen. Da Epiphysen von Knorpel umgeben sind und dieser als Driftbarriere wirkt, wachsen diese durch enchondrale Ossifikation und driften damit nicht. Es lässt sich eine osteoklastische (Knochenabbau, *bone resorption*) von einer osteoblastischen (Knochenneubildung, *bone formation*) Drift unterscheiden. Für die entsprechenden Prozesse im trabekularen Knochengewebe prägte FROST (1990C) den Begriff *minimodeling*. Ein Nachweis dieses Prozesses gelang aber erst 2003 (KOBAYASHI ET AL.) bei 21 von 34 Biopsie-Proben aus dem Beckenkämmen von im Durchschnitt 58,4 Jahre alten Erwachsenen, wobei entsprechende Prozesse nur für ca. 2 % der gesamten Knochenoberfläche erkennbar waren.

„The absolute and relative movement of the periosteal and endosteal surfaces produced by bone formation and bone resorption during growth and aging determine the size, mass, geometry and architecture of the skeleton, and, so its strength." (SEEMAN 2001a, p. 4583).

Die Aktivität von Osteoblasten (aus Mesenchymzellen, HARADA UND RODAN 2003) und Osteoklasten (zur Monozyten/Makrophagen-Linie gehörend, BOYLE ET AL. 2003) unterliegen unterschiedlichen, nur unvollständig verstandenen Steuerungsmechanismen und ihre Aktivitäten sind nur relativ gering korreliert (r = 0,47, AHLBORG ET AL. 2003). Wie nach dem Abschluss des eigentlichen Körper- und Skelettwachstums die annähernde Konstanz der Skelettmasse während der Reproduktionsphase aufrecht gehalten wird, ist derzeit ungeklärt (KARSENTY 2000).

Mit den Beobachtungen zur Knochendrift stimmen die Ergebnisse der Audioradiographie mit Hilfe von ^{90}Sr gut überein, die erhöhte ^{90}Sr-Konzentrationen proximal-endostal und distal-periostal erbrachten (Kap II 3.3). Entsprechende Beobachtungen lassen sich nach FROST auch beim Vergleich eines gesunden und eines von Geburt an gelähmten Beines eines ansonsten gesunden Kindes festhalten. Eine Bestätigung für Drift lässt sich weiterhin auch aus dem Bereich der Skelettanthropologie anführen. So ist der Abstand von hypermineralisierten Linien (diese deuten – ähnlich wie Harrislinien für das Längenwachstum – für das Dickenwachstum Phasen geringerer Knochenneubildung an, ENLOW 1963, JOWSEY 1973, PANKOVITCH ET AL. 1974) zur periostalen Generallamelle bzw. zu weiteren Linien im Knochenquerschnitt nicht konstant. Im Femur, beispielsweise, ist dieser Abstand auf der

lateralen Seite des Knochens am größten und verdeutlicht somit die laterale Drift des Femurs (DANIELMEYER 1994, Abb. 18 S. 22).

Knochenmodellierung setzt zwischen dem 6. und 12. Lebensmonat mit dem Krabbel- und Lauflernalter ein und endet weitestgehend mit der Skelettreife in der Mitte des 3. Ljz.. Darüberhinaus hält jedoch dieser Prozess lebenslang sowohl im trabekularem Knochengewebe (KOBAYASHI ET AL. 2003) als auch in der Kompakta von Röhrenknochen an. Dabei kommt es zu einem geringen, meist periostalen Knochenzuwachs bei gleichzeitigem, meist endostalem Knochenabbau, wobei ein deutlicher Sexualdimorphismus erkennbar wird (SEEMAN 2001a, b, AHLBORG ET AL. 2003, vgl. Kap. II 5.5.1).

Während den ersten 3 Ljz. nimmt die auf den Knochen einwirkende Belastung über das Zwanzigfache zu. Dennoch erreicht die im gesunden Knochen selbst messbare Beanspruchung durch Verformung des Knochens in jedem Alter (und auch bei verschiedenen Säugetieren) nur etwa 10 bis maximal 50 % der Belastung, bei der Knochen zerstört werden würde. RUBIN (1984) spricht von einer „*safety margin to failure*“ und bezeichnet dies als evolutiv entstandene „*dynamic strain similarity*“. FROST (1982, 1987b, 1990c) spricht von einem über ‚*Minimum Effective Strain (MES)*‘ gesteuertes Rückkopplungssystem. Durch diese wird ein „*optimal strain environment for each specific location of the skeleton*“ (RUBIN 1984, S. 11) geschaffen.

Die Knochenfestigkeit wird von seiner Makro- und Mikroarchitektur, der Masse und der Dichte des Knochens bestimmt, welche wiederum zu beschreibbaren Eigenschaften wie Steifigkeit, Dehnbarkeit und der Fähigkeit zur elastischen und plastischen Verformung führt. Diese sind weitestgehend unabhängig von Alter, Geschlecht, Spezies und den meisten Krankheiten (FROST 1997, KANNUS ET AL. 1996). Da Knochen ein Kompositmaterial ist, lassen sich diese Eigenschaften jedoch nicht durch einfache Parameter beschreiben. Mit anderen Worten: Knochen lässt sich als ein dynamisches System beschreiben, welches auf mechanische Belastung adaptiv reagiert, wobei negative Rückkopplungseffekte wirksam werden. Knochen besitzt gegenüber einer Belastung eine ‚*physiologische Toleranz*‘. Das heisst, erst wenn eine Belastungs-Grenze im Knochen erreicht und überschritten wird, werden adaptive Modellierungs-Prozesse (es entsteht Lamellenknochen) induziert und bei anhaltender Überbelastung wird die Bildung unorganisierten Knochengewebes (es entsteht Geflechtknochen) induziert. Gleichzeitig wird bei Unterschreitung einer Untergrenze

Knochen umgebildet bzw. abgebaut (Kap. II 4.4; Minimum Effektive Strain (MES) und *Mechanostat Theory*, FROST 1983a, 1987a, 2000).

Besondere Bedeutung wird bei der Beanspruchung des Knochens dessen Verbiegung zugeschrieben. Biegung ist als einseitige Dehnung mit gleichzeitiger Volumen- und Gestaltänderung zu verstehen. Zur Verbiegung des Knochens kommt es unter physiologischer Belastung häufig in Verbindung mit Druckkräften, was zu einer Veränderung der physiologischen Krümmung des Knochens führt. Damit werden im Knochen sowohl im Längs- als auch im Querschnitt stark variierende Spannungen hervorgerufen, die diesen stark beanspruchen. FROST sah nun in der Verbiegung des Knochens die Ursache für das Überschreiten des ‚Minimum Effektive Strain (MES)' (*Flexural Neutralization Theory*; FROST 1964, 1987a): Beim Überschreiten des MES kommt es zu einer Drift des Knochens in Richtung der konkaven Beugeseite. FROST spricht von einem *‚concave-tending facing'* (CTF; Abb. 3).

FROST publizierte 1990 (a-d) vier Arbeiten zur strukturellen Anspassung des Skeletts an mechanischen Gebrauch (*SATMU*: *Skeletal Struktural Adaptations to Mechanical Usage*). Mit diesen Arbeiten stellte er in modifizierter Form seine Theorien wiederholt zur Diskussion und schließt erstmals umfassend Knorpel als Skelettbestandteil in diese mit ein.

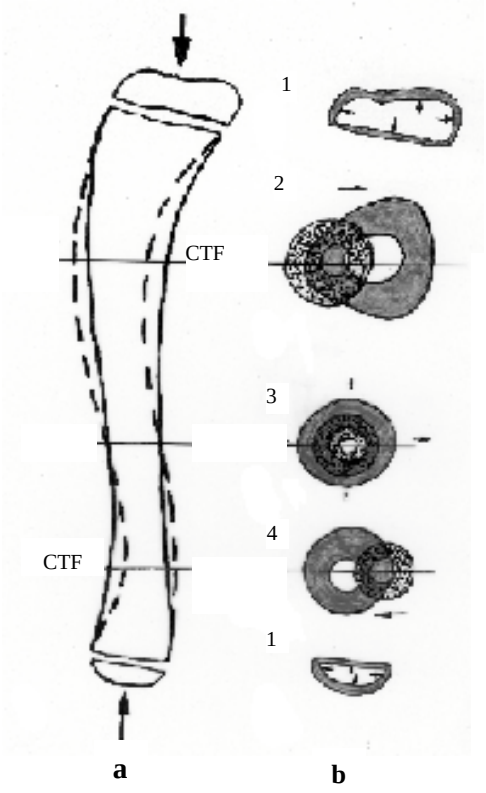


Abbildung 3:

Knochenmodellierung bei mechanischer Belastung.
Knochen verändert (- - -) unter Belastung (Druck: ↓) seine physiologische Kurvatur (—) und es kommt in Längsrichtung des Knochens zu verschiedenen Formen von Knochenwachstum, -bildung und Drift bezogen auf Fixpunkte an den beiden Epiphysen in Richtung des concave-tending facing (CTF) (nach FROST 1987a),
a) Längsschnitt durch Tibia
b) 5 Querschnitte
gepunktet: alter Knochen,
grau: neuer Knochen.

‚Wann' Knochenmodellierung sattfindet, ist danach allein vom Überschreiten des ‚Minimum Effektive Strain (MES)' abhängig. Der Festpunkt (setpoint) oder MES liegt etwa bei 2000 Mikrostrain (µE) ± 30 % (FROST 1990b) bzw. 1000 µE (FROST 1997). Die Beanspruchung wird dabei über ein Zeitintervall gemittelt, so dass nicht eine einzige Spannungsspitze zur Knochenmodellierung führt. In dieser Durchschnittsbeanspruchung werden Größe, Frequenz, Ausbreitung und Dauer aller einwirkenden Kräfte im Sinne einer *‚loading history'* berücksichtigt (FROST 1990d). Dabei scheint die Größe einer Belastung bedeutsamer als ihre Frequenz zu sein (Knochenmasse eines Gewichthebers ist größer als die eines Marathon-Läufers, Beispiel nach FROST 1982) und verdeutlicht den wohl allgemein gültigen Unterschied zwischen Kraft- und Ausdauersport (WALLACE ET AL. 2000). Veränderungen in der mechanischen Beanspruchung werden den Erfordernissen im Knochen angeglichen und daraus ergibt sich der Anteil von Knochenaufbau und -abbau in einem bestimmten Punkt.

Knochenmodellierung funktioniert als An-Aus-An-System, wobei die *Driftrichtung* (osteoklastische oder osteoblastische Drift) über den Drift-Operator Γ bestimmt wird, dem Produkt aus Endbelastungs-Operator α und dem (lokalen) Beanspruchungs-Operator β. Diese beiden Operatoren bestimmen das ‚Wo' und ‚Wie' der Knochenbildung. Für α und β wird in diesem An-Aus-An-System nur zwischen +1, 0 und -1 unterschieden (Tab. 3):

Tabelle 3: Bestimmung des Drift-Operators Γ als Produkt von Endbelastungs-Operator α und (lokalem) Beanspruchungs-Operator β: Γ = α x β. (nach FROST 1990 b-d)

	Endbelastungs-Operator α	**(lokaler) Beanspruchungs-Operator β**	**Drift-Operator Γ**
+ 1	wiederholte Zugbelastung	wiederholte Zugbelastung oder convexe Verbiegung	osteoblastische Drift/ Knochenneubildung
0	-	keine Belastung oder Verbiegung	-
- 1	wiederholte Druckbelastung oder keine Belastung	wiederholte Druckbelastung oder concave Verbiegung	osteoklastische Drift/ Knochenabbau

In Abbildung 4 wird gezeigt, wie beim Überschreiten des MES durch Druck auf einen Langknochen die sich lokal ändernden Kräfte zu einer osteoklastischen bzw. osteoblastischen Drift führen. Ausgehend von der jeweiligen Kompaktamitte nehmen Zug- bzw. Druckkräfte in Richtung auf die periostale bzw. endostale Knochenoberfläche zu oder es kommt zu einer konkaven bzw. konvexen Verformung bzw. zu einer Verstärkung der physiologischen Kurvatur des Knochens unter der Belastung. Aus der multiplikativen Verknü-

pfung des Endbelastungs- und des Beanspruchungs Operators ergibt sich dann die an der jeweiligen Oberfläche stattfindende Modellierung des Knochens. Diese führt in Richtung des ‚*concave tending facing*'(CTF) schrittweise zu einer Verringerung der Verformung des Knochens unter dieser Belastung, was gleichbedeutend mit einer Verringerung der Beanspruchung des Knochens ist. Der Knochen ist nachfolgend an seine physiologische Beanspruchung besser angepasst und es kommt zu einer Optimierung zwischen Festigkeit und Knochenmasse. Diese erfolgt über eine Funktion der dritten (FROST 2001) bzw. vierten Potenz (SEEMAN 2001a) für den Abstand der Knochenmasse zur zentralen Längsachse des Knochens. Auf diese Weise wird bei Langknochen die Steifigkeit vor der Biegsamkeit optimiert.

„The mineralized mass of bone within the periosteal envelope of the long bones ist modeled into hollow cylinders with splayed ends containing trabecular bone. These structures are architectural masterpieces of minimalism, created using the least amount of material needed for optimum function – lightness for speed, strength for loading – ensuring the organism can find dinner, rather than be dinner." (SEEMAN 2001a, p. 4577).

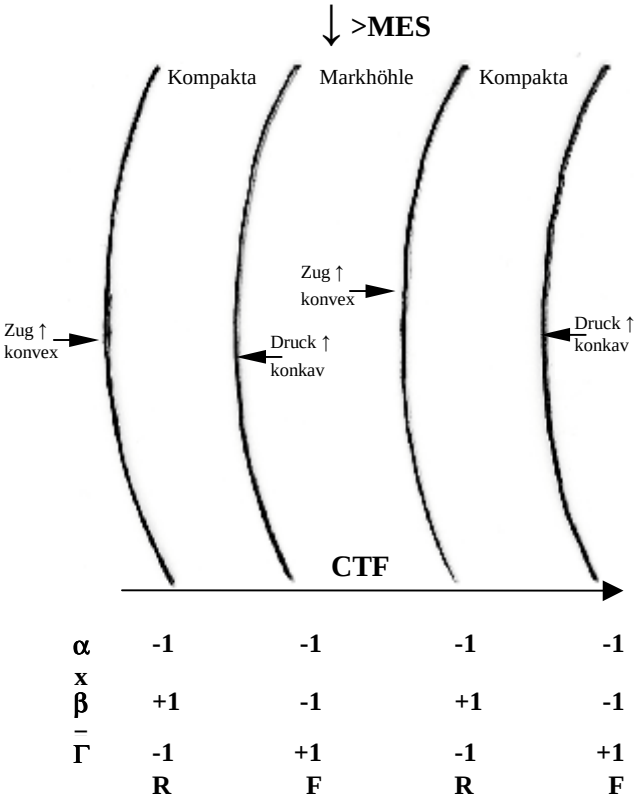


Abbildung 4:
Drift eines Langknochens bei Überschreitung des MES (Minimum Effective Strain), bei wiederholter Druckbelastung in Richtung des CTF (concave tending facing) nach FROST 1990c.

Endbelastungs-Operator α,
Beanspruchungs-Operator β,
Drift-Operator Γ,
R Resorption, osteoklastische Drift,
F Formation, osteoblastische Drift,
↑ Anstieg/Zunahme der Belastung.

Von runden Knochenquerschnitten abweichende Formen, z. B. elliptisch beim Femur oder dreieckig bei der Tibia, erklären sich ebenfalls aus diesen Überlegungen (Abb. $3b_2$). Diese Querschnittsformen entstehen, wenn die einwirkenden Kräfte zu einer Belastung mit bevorzugter Verbiegung des Knochens in eine Richtung führen. Zum Beispiel ist bei einem elliptischen Querschnitt der größere Durchmesser parallel zu dieser bevorzugten Verbiegerichtung und die Kompakta ist wegen einer exzentrischen Markhöhle auf der konkaven Beugeseite stärker.

Abschließend soll an dieser Stelle noch einmal erwähnt werden, dass anhand dieser Überlegungen nur die Knochenmodellierung zusätzlich zum ‚baseline growth' erfasst wird. Dieser Hinweis ist wichtig, denn nur aus dem Zusammenwirken von ‚baseline growth' und mechanischer Beanspruchung erklärt sich das Wachstumsverhalten auch annähernd gerader Knochenabschnitte, z. B. des Metacarpus II (Abb. $3b_3$, vgl. auch Kap. VI 2.2.2). Durch das ‚baseline growth' kommt es periostal zum Knochenaufbau und endostal zum Knochenabbau. Gleichzeitig wird unter mechanischer Belastung durch Druck der periostale Knochenaufbau verstärkt und dem endostalen Knochenabbau bis hin zu einem Stillstand entgegengewirkt, so dass es zu einer deutlichen Zunahme der Kompaktastärke kommt.

Mechanische Belastung und Knochenform sowie Kompaktastärke stehen somit in enger Beziehung. Die evolutiv nachweisbare Verrundung der Knochendurchmesser, z. B. beim Femur, und die Reduktion der Knochen- oder Kompaktamasse führt RUFF (1992) erstmals anhand nordamerikanischer Skelettserien in einem Umkehrschluss auf veränderte und zwar abnehmende mechanische Belastung zurück. Auch LIEBERMAN (1996) sieht die evolutiv zu beobachtende Reduktion der Schädelknochen beim Menschen eher in einer allgemeinen Abnahme der körperlichen Aktivität und damit einhergehend in einer allgemeinen Abnahme eines systemisch gesteuerten kortikalen Knochenwachstums als in einer Veränderung des Genoms. Vielleicht findet sich eine Erklärung dafür auch in dem aufgedeckten Zusammenhang von Körperfett und Knochenmasse, wobei das in den Fettzellen produzierte Leptin zentral über den Hypothalamus hemmend auf die Knochenneubildung wirkt (DUCY ET AL. 2000, HABERLAND ET AL. 2001, REID 2002, HARADA UND RODAN 2003, HAMRICK 2004, ELEFTERIOU ET AL. 2004). Damit ließe sich über einen Regulationsmechanismus ein schon lange beobachteter Zusammenhang zwischen Reproduktionsfähigkeit, Körper- und Skelettmasse sinnvoll erklären.

II 4.4 Knochenumbildung

Im Erwachsenen-Skelett findet kein einfaches Knochenwachstum mehr statt und Prozesse der Knochenmodellierung sind weitestgehend ineffektiv, auch wenn sich bis ins hohe Alter eine geringe Drift mit meist periostaler Knochenneubildung und meist endostalem Knochenabbau an den Trabekeln, Röhrenknochen und z. B. Rippen erhält. Darüberhinaus kann bei bestimmten pathologischen Prozessen, z. B. nach Frakturen oder bei Tumoren, ein erneutes Wachstum beobachtet werden, ohne dass Driftmechanismen wirksam werden (‚*repair*' oder ‚*renewed modeling*') bzw. diese anschließend zur Korrektur von unphysiologisch verheilten Knochenbrüchen einsetzen, wobei diese nicht mehr so effektiv wie im Kindes- und Jugendalter sind.

Während des Umbildungsprozesses wird die entfernte Knochenmasse nur in einem balancierten Verhältnis ersetzt, welches von der jeweiligen Knochenschicht und damit ganz spezifischen Anforderungen abhängig ist. Bis jetzt besteht jedoch keine Klarheit, wie diese Balance erreicht wird (KARSENTY 2000, 2003) und ist auch nur in Ansätzen über den aufgedeckten Wirkmechanismus von Leptin über den Hypothalamus angedeutet.

Knochenumbildung (*remodeling*) ist somit neben geringer Knochenmodellierung der Prozess, mit dem ab Erreichen der maximalen Skelettmasse zur Mitte des 3. Ljz. diese längstens bis zum Ende der Fortpflanzungsfähigkeit annähernd konstant gehalten und nachfolgend reduziert wird. Die Angaben zum beobachtbaren Masseverlust unterscheiden sich zwar je nach Autor und verwendeter Methode, dieser wird jedoch für Männer im Vergleich zu Frauen und für Knochenkompakta im Vergleich zur Spongiosa immer als geringer angegeben. Darüberhinaus erfolgt durch Umbildungsprozesse sehr effektiv die Anpassung des Knochens an seine vielfältigen Aufgaben als Kalzium- und Mineralspeicher bzw. seine generelle Einbindung in den Stoffwechsel sowie, neben der geringen Knochendrift, die Anpassung an seine mechanische Beanspruchung.

Knochenumbildung ist nur bei langlebigen Tieren, aber dann wie beim Menschen bereits in den ersten Lj., zu beobachten (CHOW ET AL. 1993, Vergleich zwischen Ratten- und Menschenknochen). Knochenumbildung bezieht sich nur auf *Sekundärknochen*, sowohl auf seine Bildung aus *Primärknochen* als auch auf die ständigen Umbildungsprozesse im Sekundärknochen.

Knochenwachstum und -modellierung beruhen auf den langanhaltenden und lokal deutlich voneinander getrennten Aktivitäten von Osteoklasten (TEITELBAUM 2000, BOYLE ET AL. 2003) und -blasten (DUCY ET AL. 2000B, HARADA UND RODAN 2003). Im Gegensatz dazu erfolgt Knochenumbildung durch die als Kopplung (‚*coupling*') bezeichnete kurzzeitige und lokal aufeinanderfolgende Aktivität von Osteoklasten und -blasten. Die genauen Mechanismen der Kopplung sind noch weitestgehend ungeklärt. Es lässt sich jedoch anhand von *Zementlinien* feststellen, die den Übergang von einer Aktivität der Osteoklasten zu einer Aktivität von Osteoblasten markieren. Alle am Prozess der Knochenumbildung beteiligten Zellen bilden im semimikroskopischen Bereich nachweisbare, räumlich begrenzte Strukturen, die *Havers'schen Osteone*. Bei diesen finden sich sehr charakteristisch zwiebelschalenartig angeordnete Lamellen um den mittig liegenden *Havers'schen Kanal*. In der englischsprachigen Literatur finden sich dafür die Termini ‚*basic multicellular unit*' (BMU), ‚*bone remodeling unit*' (BRU) und ‚*osteonal remodeling unit*' (ORU) bzw. wird das Ergebnis einer Knochenumbildung als ‚*bone structural unit*' (BSU) bezeichnet. In der Knochenkompakta entspricht dies einem *Osteon*, in der Spongiosa entsteht ein *Trabekular-* oder *Hemi-Osteon* (PARFITT 1994a). Osteone sind nur eine spezielle Form des ‚*Effector Organ of Lamellar Bone Turnover Systems*' (EO LBTS, JAWORSKI 1984). Sie beeinflussen nachhaltig die Mikrostruktur und -architektur des Knochens. Sekundärknochen ist somit *Osteonenknochen*.

Im Gegensatz zu Knochenwachstum und Knochenmodellierung sind die Steuerungsmechanismen für Knochenumbildung wesentlich komplexer und schwieriger zu erfassen. Diese Fragen können zur Zeit weder durch ein Studium isolierter Zellen noch des intakten Knochens befriedigend beantwortet werden. In vitro entsteht kein Osteonenknochen, in vivo sind die Prozesse zu komplex und entziehen sich noch einer allgemein akzeptierten Interpretation. Diese erfolgen derzeit auf der Grundlage von mehr oder weniger akzeptierten Modellen, z. B. auf der Basis von FROST'S ‚*Skeletal intermediary organization*' (1986). Sah FROST bereits Anfang der 1990er Jahren einen Durchbruch für seine Theorien, verneint PARFITT (1994a) dies bedauernd:

„Writers of introductions and editorials in the bone field commonly indulge in a great deal of mutual back slapping. So much progress has been made, they imply, that final answers must be just around the corner. The truth, rarely admitted, is that we still have only fragmentary understanding, at the cellular and molecular levels, of the most important features of bone remodeling in vivo." (S. 282).

Dieses Fazit muss und soll hier zur Kenntnis genommen werden, weil es auch heute noch seine Gültigkeit hat (HILL UND ORTH 1998, KARSENTY 2000). Für diese Arbeit hat es keine negative Auswirkung, denn es interessiert „nur“ die Manifestation und ausreichende quantitative Beschreibung dieser Prozesse auf der Gewebe- bzw. Organebene. Und für dieses Anliegen ist der gegenwärtige Forschungsstand ausreichend.

II 4.4.1 Der Umbildungsprozess oder ARF-Zyklus eines Osteons

Der Bildungs- oder Umbildungsprozess eines Osteons wird auch als *ARF-Zyklus* (Aktivierung, Resorption und Prozessumkehr, Formation) bezeichnet. Ein Zyklus unterbricht den Ruhezustand des Knochens im semimikroskopischen Bereich. In diesem Ruhezustand befinden sich etwa 80 % des Gesamtskelettes, d. h., ca. 75 % der Spongiosa und ca. 95 % der Kompakta (PARFITT 1984, 1994a). Je nachdem, ob der Ruhezustand als eigenes Stadium des Umbildungsprozesses im Knochen betrachtet wird, handelt es sich bei dem ARF-Zyklus um einen Drei- bzw. Fünf-Stadien-Zyklus.

Zwischen dem Zeitpunkt der Aktivierung und der Vollendung eines Osteons liegen durchschnittlich 120 Tage, die sogenannte Sigma-Zeit (σ), wobei auf Resorption und Prozessumkehrung (σ_r) 2 bis 3 Wochen (HARADA UND RODAN 2003) bzw. 30 Tage bis 90 Tage auf die Formation (σ_f) entfallen (FROST 1963, MARTIN UND BURR 1989, GALLAGHER 1991, PARFITT 1991). In der Arbeit von FROST (1969) deutete sich jedoch eine Altersabhängigkeit von σ_f an. Sie liegt zwischen 47 und 109 Tagen bzw. 0,13 bis 0,3 Jahren für ein Lebensalter zwischen 0 und 89 Jahren. In entsprechende Richtung weisen auch Untersuchungen von SEDLIN ET AL. (1963), die in der Nähe aktiver Osteoklasten bis zu 50 % aktive Osteoblasten bei Kindern nachweisen konnten. Diese Nachbarschaft der beiden Zelltypen geht mit voranschreitendem Alter auf 10 % zurück. Gleichzeitig gibt es Hinweise darauf, dass Osteoklasten und deren Vorläufer die Aktivität von Osteoblasten und Knochenbelegzellen modulieren und deren Rückzug veranlassen (PEREZ-AMODIO ET AL. 2004).

Unter Aktivierung ist im Knochengewebe der Übergang aus dem Zustand der Ruhe in den Zustand der Resorption und Prozessumkehr zu verstehen. Nach PARFITT (1984) erfolgt ca. alle 10 Sekunden irgendwo im Skelett die Aktivierung eines (Hemi)Osteons. Diese Zeit

wird variiert durch Alter, Geschlecht, Metabolismus (z. B. gesund oder krank) des Individuums und der jeweiligen Knochenschicht (*periostal, (intra)kortikal, endostal, trabekular*). Allerdings findet sich auch eine Kritik des Begriffes Aktivierung (PARFITT 1994, 1995). Denn bisher gibt es keine Hinweise, dass inaktive Osteoklasten im Knochen – eine Voraussetzung für direkte Aktivierung – überhaupt existieren.

Die Aktivitäten der Osteoklasten lassen sich anhand der entstehenden Resorptionsräume, den *Howship'schen Lakunen*, mikroskopisch nachweisen. Ihre Aktivität bestimmt die *Erosionstiefe* eines Umbildungsprozesses. Bei hoher Vergrößerung und im polarisierten Licht lassen sich unter dem Mikroskop zwei Typen von Resorptionsräumen unterscheiden (JAWORSKI ET AL. 1972, PARFITT 1993):

(1) Flach und klein (wurstartig, ‚*sausage-shaped*', im Längsschnitt): Durchmesser ca. 65 µm, Länge ca. 222 µm; es lassen sich weder Osteoklasten noch Osteoblasten nachweisen

(2) Tief und groß (konisch im Längsschnitt): Durchmesser ca. 188 µm, Länge ca. 409 µm; es lassen sich Osteoklasten und Osteoblasten nachweisen, sie zeigen eine Zementlinie und werden schrittweise wieder verfüllt.

Nach PARFITT (1993) überwiegen Resorptionsräume der ersten Form. Er sieht in diesen abgebrochene oder längerfristig unterbrochene Umbildungsprozesse. Diese Räume bleiben bis zum nächsten Umbildungsprozess an dieser Stelle unverfüllt und sind eine Ursache für die zunehmende Porosität des Knochens. JAWORSKI ET AL. (1972) führen zur Unterscheidung zusätzlich die Lokalisation der wurstartigen Resorptionsräume in inaktiven bzw. alten *Havers'schen Kanälen* an. Im mikroskopischen Längsschnitt ist eine Unterscheidung unproblematisch, bei Querschnitten kann es zur Verwechslung mit dem noch nicht mit einer Zementschicht ausgekleideten Ende eines konischen Resorptionsraumes kommen.

An der Entstehung eines Resorptionsraumes in der Größe eines vollständigen Osteons ist durchschnittlich eine Osteoklastengeneration beteiligt. Osteoklasten haben somit eine Lebensdauer von ca. 120 Tagen. Jedoch haben die Kerne dieser großen, vielkernigen Zellen nur eine durchschnittliche Lebensdauer von 16 Tagen und werden schrittweise ersetzt (PARFITT 1995). Wie die Größe, Form und Tiefe des Resorptionsraumes oder die Erosionstiefe kontrolliert wird, ist zur Zeit immer noch unklar. PARFITT (2000) sieht eine mögliche Erklärung in den Blutgefäßen (die er bis zu deren genauen Beschreibung als Kapillaren bezeichnen möchte), die in den entstehenden Resporptionsraum hineinwachsen und die selten länger als ca. 400 µm sind (JAWORSKI ET AL. 1972). Bereits bei einer Erosionstiefe von

100 µm in der Kompakta und von 60 µm in der Spongiosa setzt schrittweise die Prozessumkehr ein. Am Rand des Resorptionsraumes wird eine *Umkehr-* oder *Zementlinie* synthetisiert. Zement ist hochmineralisiert, besitzt kein oder nur sehr wenig Kollagen und präpariert die Knochenoberfläche für die Knochenneubildung durch Osteoblasten.

Eine Sonderform stellen *Typ II-Osteone* dar. Sie weisen eine zweite Zementlinie innerhalb des Osteons auf, wobei diese nicht der Ausrichtung der zwiebelschalenartig angeordneten Lamellen eines Osteons folgt. Diese wird als Hinweis auf eine Unterbrechung der Resorptionsphase innerhalb des Osteons verstanden (JAWORSKI ET AL. 1972, STOUT 1992).

An der mit einer Zementlinie vorbereiteten alten Oberfläche beginnen Osteoblasten mit der Knochenneubildung. Osteoblasten bestimmen die *Walldicke* neugebildeten Knochens. Sie sondern eine hauptsächlich aus Kollagen bestehende interzellulare Substanz, das Osteoid, ab. Durch die Osteoblasten wird gleichzeitig die einige Tage verzögert einsetzende Mineralisierung zwischen den Kollagenfasern in der Interzellular-Substanz gesteuert. Apatit ist der Hauptbestandteil dieser Interfibrillar-Substanz.

Die Knochenneubildung schreitet durch aufeinanderfolgende Wellen von Osteoblasten von außen nach innen und in Resorptionsrichtung voran. Die Abfolge mehrerer Osteoblastengenerationen bei der Formation eines Osteons führt zu seinem typischen, zwiebelschalenartigen Aufbau. Einige Osteoblasten sterben ab, ihre Lebensdauer beträgt zwischen 10 und 120 Tagen. Andere bilden sich zu *Osteozyten* oder den Knochenbelegzellen (‚*lining cells*') um und überleben mehrere Jahre bzw. Jahrzehnte. Belegzellen bilden die äußere Zellschicht eines Osteons, die Osteozyten liegen dagegen in den Osteozytenhöhlen und sind konzentrisch um den Havers'schen Kanal angeordnet. Beide Zelltypen sind über *Canaliculi*, kleinste Kanälchen, miteinander verbunden.

Eine Sonderform stellt ein Osteon mit einer Unterbrechungs-Linie dar (‚*arrest line*'), die sogenannten *Doppelzonenosteone*. Diese Linie besteht ebenfalls aus Zement. Sie weist auf eine Unterbrechung der Formationsphase hin und ist den Harris-Linien (im Längsschnitt) oder auch den hypermineralisierten Linien (im Querschnitt) beim Wachstum von Langknochen vergleichbar (STOUT UND SIMMONS 1979). Diese Osteone sind von Typ II-Osteonen unterscheidbar, da die Unterbrechungs-Linie dünner und glatter ist und den Lamellenverlauf des Osteons nicht stört.

Auch nach Abschluss der Osteonen-Formation schreitet die Mineralisierung voran. In nachfolgend nicht umgebauten Knochengewebe kann dieser Prozess bis zu 20 Jahre andauern, wobei es zu einer Karbonatsubstitution für Phosphat kommt (CO_3^{2-}/PO_4^{3-}, AKKUS ET AL. 2003). Diese Mineralisierung setzt eine reife Interzellular-Substanz voraus, also endgültig ausgerichtete und vernetzte Kollagenfasern. Man kann somit zwischen initialer (primärer) und terminaler (sekundärer) Mineralisierung unterscheiden. Ob diese auf verschiedenen Steuerungsmechanismen beruhen, ist noch nicht geklärt. Jedenfalls kommt es während der terminalen Mineralisation nicht mehr zu einer Einlagerung von Tetrazyklinen, einem Marker für Knochenneubildung im Apatit.

II 4.4.2 Unterscheidung der Gewebeschichten in Bezug auf die Knochenbilanz

Es ist nicht ausreichend, z. B. mit KNEISSEL (1993) die deutlich höhere Stoffwechselaktivität in der Spongiosa, die sich u. a. sowohl mit der ^{90}Sr- als auch mit der ^{14}C-Methode nachweisen ließ (Kap. II 3, Kap. V 1.3), allein auf ihre im Vergleich zur Kompakta deutlich größere Oberfläche bei gleichem Außenvolumen zurückzuführen. Osteone werden nicht nur an der äußeren Knochenoberfläche, sondern innerhalb des Knochens auch an den Wänden bestehender Havers'scher und der „inneren" Oberfläche von Volkmann-Kanälen aktiviert. Die Oberfläche ist somit vor allem bei der Kompakta wesentlich größer, als sie sich anhand des Außenvolumens berechnen lässt. Die unterschiedlichen Stoffwechselraten ergeben sich vorrangig aus der unterschiedlichen Funktion von Spongiosa und Kompakta und wohl auch aus der unterschiedlichen Nähe zum roten Knochenmark (PARFITT 2000, S. 321). Die Gegenüberstellung von *‚mechanical and metabolic bone'* durch PARFITT (1995) erfasst durchaus die grundlegenden funktionalen Momente. Diese Klassifizierung darf jedoch nicht als absolute Gegenüberstellung verstanden werden. Denn Knochenkompakta ist gleichzeitig Mineral-/Kalziumspeicher und Spongiosa erfüllt ebenso eine Stützfunktion. Mit der unterschiedlichen Funktion beider Gewebearten steht jedoch die Anzahl von

(1) Zellen pro Fläche im Zusammenhang. Bereits FLANAGAN UND NICHOLS (1965) konnten für gemischten Knochen (Spongiosa und Kompakta) eine ca. vierfache Menge von Zellen anhand der extrahierten DNS im Vergleich zur Kompakta nachweisen. Die DNS-Menge ist zudem mit dem Alter des Donors negativ korreliert.

(2) Aktiven Osteoblasten pro Fläche im Zusammenhang. Nach DODDS ET AL. (1989) finden sich in der Spongiosa ca. doppelt so viele Osteoblasten auf einem Quadratmillimeter wie in der Kompakta. Gleichzeitig konnten diese Autoren nachweisen, dass Osteoblasten der Kompakta stoffwechselaktiver als Osteoblasten der Spongiosa sind.
Ein entsprechender Nachweis gelang auch SHIH ET AL. (1993): Es wurden keine signifikanten Unterschiede in der Stoffwechselaktivität pro Osteoblast und Gewebe von Frauen in Abhängigkeit vom Alter (prä- und postmenopausal) und gesund bzw. krank (nicht bzw. an Osteoporose erkrankt) festgestellt. Die dennoch nachweisbare Verschiebung in der Knochenbilanz zu Ungunsten von Knochenneubildung wird demnach in der abnehmenden Anzahl aktivierter Osteoblasten pro Osteon gesehen.

Es muss somit streng zwischen Zell- und Gewebeaktivität unterschieden werden. Eine ungenaue Terminologie kann nicht zur Problemlösung beitragen. Ähnliche Unschärfen finden sich bei der Verwendung der Begriffe „Knochen“ (Gewebe oder Organ) und „Knochendichte“ (siehe auch Kap. II 5.3), aber auch „Knochenbildung“ (KARSENTY 2000).

Bei der Bildung eines Osteons besteht also eine Beziehung zwischen den Aktivitäten von Osteoklasten (Erosionstiefe) und Osteoblasten (Walldicke), deren Aktivitäten gekoppelt und balanciert sind. Bei einem gesunden Individuum stellt sich ein annäherndes Gleichgewicht ein, jedoch ist die Differenz von Erosionstiefe ρ_r und Walldicke ρ_f fast überall von Null verschieden und kann durch die Knochenbilanz eines Osteons ρ (Rho) beschrieben werden (FROST 1990d). Diese stellt den Nettogewinn bzw. -verlust pro vollständigem Osteon oder BMU dar und wird in mm³ gemessen. Anhand dieser Differenz lassen sich im Gegensatz zu der ‚einfachen‘ Gegenüberstellung von Kompakta und Spongiosa vier Knochenzonen oder -schichten unterscheiden: Eine *periostale*, eine *(intra)kortikale*, eine *endostal-kortikale* sowie eine *trabekulare* Knochenschicht. Diese Einteilung geht nach FROST (1983b) auf SEDLIN (1964) zurück und erlangte allgemeine Akzeptanz. Sie werden nachfolgend als Gewebe, entsprechend der Hierarchie-Ebene 3a nach FROST (1985, siehe hier Kap. II 4.1) betrachtet.

Neben der Einteilung in vier Knochenschichten findet sich auch eine Zusammenfassung in zwei Knochenzonen. Dabei werden Schichten mit einem Überwiegen des Knochenabbaus (endokortikal, trabekular) oder einem Gleichgewicht zwischen Knochenabbau und -aufbau (intrakortikal) zur *endostealen* Knochenzone zusammengefasst und der *periostealen* Knochenzone mit einem Überwiegen der Knochenneubildung gegenübergestellt. An den inneren und äußeren Oberflächen dieser (zwei oder vier) Knochenschichten werden die (Um)Bildungsprozesse aktiviert (SEEMAN 1997), wobei, wie aus Tierexperimenten

abgeleitet werden muss, die Regulationsmechanismen zwischen den einzelnen Schichten unklar sind.

„Together these various mouse mutant strains indicate that the two *functions*, formation and resorption, are regulated independently of each other. This does not contradict the observation that early osteoblast progenitors produce secreted molecules required for osteoclast *differentiation*. ... If there is no cross regulation of bone formation by bone resorption and vice versa then how does the bone mass is maintained constant? We do not have a clear answer to this question yet, which is probably the most important challenge laying ahead in skeleton biology." (KARSENTY 2000, p. 88).

Knochenkompakta ist die einzige Knochenschicht, bei der die Resorption oder Erosionstiefe annähernd gleich der Formation oder Walldicke ist ($\rho_r \approx \rho_f$). Zwar ist für ein einzelnes Osteon die Resorption geringfügig größer als die nachfolgende Formation. Die Differenz umfasst den neugebildeten und nicht wieder verfüllten Havers'schen Kanal. Für die gesamte Knochenschicht wird dies jedoch dadurch ausgeglichen, dass alte Havers'sche Kanäle auch wieder verfüllt werden. Allerdings werden bei der Knochenbilanz nicht die abgebrochenen oder unterbrochenen Umbildungsprozesse berücksichtigt, wie sie sich in den wurstförmigen Resorptionsräumen, den Typ II-Osteonen oder Doppelzonenosteonen nachweisen lassen. Damit kann es trotz einer Ausgewogenheit zwischen Resorption und Formation auch in der Kompakta zu einem leichten Knochenverlust kommen (MARTIN 1985).

In der *endostal-kortikalen* und in der *trabekularen* Knochenschicht ist $\rho_r > \rho_f$. Damit kommt es im Erwachsenenalter zu einem stetigen, wenn auch geringfügigen Knochenabbau. Pro Osteon bzw. Hemi-Osteon kommt es nach FROST (1990d) zu einem Verlust von 0,003 mm³ ($\rho = \rho_r + \rho_f = -0{,}05\ mm^3 + 0{,}047\ mm^3$). Die Markhöhle expandiert unabängig von endostaler Knochendrift durch Resorption von Knochenmasse (SEEMAN 2001a), Spongiosabälkchen werden dünner.

Für *periostalen Knochen* ergibt sich eine lokale Knochenbilanz mit $\rho_r < \rho_f$. Damit kommt es auch während des gesamten Erwachsenenlebens zu einer stetigen, wenn auch geringfügigen Zunahme von Knochengewebe im Periostalbereich, zusätzlich zur Neubildung von Knochen an der periostalen Knochenoberfläche durch Drift (SEEMAN 2001a, b, 2003). Zusammen bewirken Knochenumbau und -neubildung auch im Alter eine Zunahme des Widerstandes der verbleibenden Knochenmasse gegenüber Biegekräften bis zu 30 % selbst bei Frauen, bei denen gleichzeitig eine Abnahme der Knochendichte bzw. Knochenmasse postmenopausal festzustellen ist (AHLBORG ET AL. 2003). Das hängt mit dem nunmehr größeren Abstand des Knochengewebes von der zentralen Achse des Knochens zusammen

und stellt einen rein physikalischen Effekt dar. Der Zugewinn (periostealen) Knochengewebes ist altersabhängig und unterliegt einem deutlichen Geschlechterunterschied (DUAN ET AL. 2001a, b, SEEMAN 2001b, SEEMAN 2003), wobei Männer sowohl im Rumpf- als auch Extremitätenskelett einen geringeren Knochenverlust aufweisen, weil sie bei ungefähr gleichgroßem endostealen Knochenabbau periosteal mehr Knochengewebe aufbauen.

II 4.4.3 Knochenbilanz und Knochenumsatz

Die Entwicklung der Knochenbilanz (ρ, Rho) eines Osteons lässt sich bei den geringen Abmessungen von ρ_r und ρ_f nur schwer in Längs- oder kombinierten Längs-/Querschnittsuntersuchungen erfassen. Interindividuelle Variabilität besonders in den absoluten Ausgangsmaßen und im Entwicklungstempo erschwert den direkten Nachweis (MARTIN 1985). Voraussetzung für viele der nachfolgenden Arbeiten und Theorien bildete die Entdeckung, dass Antibiotika der Tetrazyklin-Reihe fluoreszierende Eigenschaften besitzen (MILCH ET AL. 1957, HARRIS 1960, FROST 1969). Damit war die Möglichkeit gegeben, Knochenumbildung im menschlichen Gewebe (über Apatit) selbst darzustellen und für relativ kurze Zeiträume zu messen. Allerdings gibt es Hinweise (REEVE ET AL. 1983), dass mit dieser Methode die Stoffwechselrate zu hoch geschätzt wird. Andererseits waren die Ergebnisse auch in ungefärbten Knochenquerschnitten reproduzierbar (STOUT UND PAINE 1994, ORNTER 1975) und fanden sich bereits bei JOWSEY (1960).

Experimentell lässt sich ρ nur indirekt über die Entwicklung der Knochendurchmesser nachweisen, wobei d_T den Gesamtknochendurchmesser, d_M den Markhöhlendurchmesser (siehe Kap. VI 2.2.2) und in Analogie dazu d_S den Durchmesser eines Spongiosabälkchens bezeichnet. Die Entwicklung dieser drei Durchmesser beschreibt im eigentlichen Sinn die Bilanz des Knochens und seiner zwei Zonen bzw. vier Schichten. Diese Bilanz ist trotz der stetigen osteoblastischen Drift an der periostalen Knochenschicht bei Erwachsenen für den gesamten Knochen leicht negativ, wobei ρ_r und ρ_f dabei in einem Verhältnis von -20 zu +19 stehen. Im Erwachsenenalter kommt es damit im gesamten Knochen zu einem stetigen Masseverlust.

Die *Knochenbilanz B* (normalisiert auf das Knochenvolumen: $mm^3/mm^3/a$; normalisiert auf die Knochenoberfläche: $mm^3/mm^2/a$; Formel 4 a) berücksichtigt als Differenz sowohl

die abgebaute als auch die wieder neugebildete Knochenmenge aller in einem Jahr aktivierten Osteone und errechnet sich als Produkt aus Nettogewinn bzw. -verlust pro Osteon und der Anzahl von Osteonen, die pro Jahr auf einer Fläche von einem Quadratmillimeter hervorgehen (μ; in #/mm²/a). μ wird auch als *Aktivierungs-Rate* oder *-Funktion* einer Knochenschicht bezeichnet. Die Aktivierung von Osteonen ließ sich experimentell über die Markierung des Apatits während der initialen Mineralisierung mit Tetrazyklinen zu einem bestimmten Zeitpunkt beobachten. Von diesen Werten wurde dann auf die jährliche Aktivierungs-Rate geschlossen. B, μ und ρ beschreiben in ausreichendem Maß die Umbildung eines Knochens und seiner Schichten. Es soll aber hier noch einmal betont werden, dass die Phänomene der wurstartigen Resorptionsräume, der Typ II-Osteone und der Doppelzonenosteone damit nicht berücksichtigt werden können. Ihre Bedeutung korreliert mit ihrem Vorkommen im Verhältnis zu normalen Umbildungsprozessen. Zu diesem Problem liegen jedoch keine quantifizierenden oder quantifizierbaren Untersuchungen vor.

Zwar lässt sich Knochen(um)bildung prinzipiell anhand der Veränderung aller Knochenstrukturen qualitativ nachweisen (AMPRINO UND BAIRATI 1936, JOWSEY 1960), jedoch stellt deren empirische Bestimmung ein Problem dar: Knochenabbau kann im Knochen schwer und wenn, dann nur über einen langen Zeitraum, quantifiziert werden, dagegen lässt sich Knochenaufbau durch tetrazyklinmarkiertes Apatit bestimmen. Daraus ergibt sich der mit Hilfe der Aktivierungs-Funktion μ in Knochenquerschnitten bestimmbare *Knochenumsatz* v_t *(turnover,* Formel 4 b). Dieser bezieht sich im Gegensatz zur Knochenbilanz nur auf den neugebildeten Knochen.

Grundlage für beide Definitionen bilden die vielen Studien zur Knochenumbildung in Knochenkompakta. Da Kompakta ein annäherndes Gleichgewicht von ρ_r und ρ_f aufweist, entspricht hier pro Osteon das Volumen abgebauten Knochens V_r dem Volumen neugebildeten Knochens V_f. Der Umsatz im Knochen v_t (in mm³/mm³/a) entspricht danach dem Produkt aus dem Volumen V_r oder V_f und der Aktivierungs-Funktion μ.

Formel 4: a) $\mathbf{B = \rho \times \mu}$ oder $\mathbf{B = (\rho_r + \rho_f) \times \mu}$

b) $\mathbf{v_t = \mu \times V_f}$ oder $\mathbf{v_t = \mu \times V_r}$

II 4.4.4 Histologische Sterbealtersbestimmung, Osteonendichte und ‚missing osteons'

PARFITT (1983) definierte den Knochemumsatz als durchschnittlichen Knochenaufbau, gemittelt über das effektive Alter der Knochenkompakta (Gewebealter). Nach SEDLIN (1964) ist es gar ein Modellsystem zum Studium von Alterungsprozessen. Damit ergibt sich eine Berührung mit den histologischen Methoden zur Sterbealtersbestimmung. 1965 publizierte KERLEY eine Methode zur Sterbealtersbestimmung, die auf der Grundlage der Abnahme von Primärknochen bzw. Zunahme von Osteonen und Osteonenfragmenten beruhte. Unabhängig von der Korrektur seiner Arbeit (KERLEY UND UBELAKER 1978, STOUT UND GEHLERT 1982) und vom Vergleich mit anderen Methoden zur histologischen Sterbealtersbestimmung (BOUVIER UND UBELAKER 1977, UYTTERSCHAUT 1985, STOUT UND STANLEY 1991, STOUT 1992, ALCIATI ET AL. 1994, WALLIN ET AL. 1994, MAAT ET AL. 2003) sind folgende allgemeine Bemerkungen notwendig:

(1) Durch die ständige Knochenumbildung wird nicht nur Primärknochen schrittweise in Sekundärknochen umgebaut, sondern es werden bestehende Osteone durch nachfolgende Umbauprozesse teilweise (es entstehen die Osteonenfragmente) oder sogar ganz überlagert. Letzteres wird in keiner der oben genannten Arbeiten berücksichtigt.

(2) Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und chronologischem Alter des Individuums gesucht. In allen Altersbestimmungsmethoden wird somit und wenn auch nur indirekt vorausgesetzt, dass das untersuchte Knochengewebe mit der Geburt vorliegt (vgl. Kap. II 5.4.4). Längenwachstum und Knochendrift beim Dickenwachstum bewirken jedoch eine Abweichung von Gewebe- und Lebensalter des Individuums, z. B. „entsteht" das mittlere Drittel der 6. Rippe erst mit ca. 12,5 Jahren. Aber selbst bei Proben aus der Diaphysenmitte von Langknochen ist bei Erwachsenen mit einer Abweichung des Gewebealters von mehreren Jahren vom chronologischen Alter zu rechnen.

Allein diese beiden Tatsachen verdeutlichen, warum bei der histologischen Sterbealtersbestimmung mit relativ hohen Fehlerspannen von mindestens ± 10 Jahren gerechnet werden muss. Es ist interessant festzustellen, dass beide Aspekte bereits durch WU ET AL. (1970) benannt wurden. Er erkannte aus dem Vergleich von gemessenem (tetrazyklin-markierte Rippenproben) und berechnetem (nicht markierte Rippenproben) Knochenumsatz, dass die Osteonendichte unbedingt in Bezug zum Gewebealter betrachtet werden muss (Zusammenhang von Knochen- und Individualalter siehe auch CASTANET ET AL. 1993).

Die Osteonendichte (OD), bestimmt pro Quadratmillimeter, umfasst vollständige Osteonen (O_{St}) und deren Fragmente (O_{Fr}) und die sogenannten ‚*missing osteons*' (O_M).

FROST stellte 1987 (c, d) eine Möglichkeit zur Berechnung des durchschnittlichen Gewebealters sowie der ‚missing osteons' zur Diskussion. Durch STOUT UND PAINE (1994) fand der Algorithmus zur Berechnung der ausgelöschten Osteone eine Bestätigung. Wieviele Osteone maximal in einer definierten Fläche auftreten, ist von mehreren Faktoren abhängig. Vorrangig ist deren Fläche und das räumliche Zueinander der einzelnen Osteone zu nennen. Letzteres wird durch die lokal sehr unterschiedliche Kompaktadicke beeinflusst, wenn diese wie z. B. bei der Rippe weniger als einen Millimeter oder beim Femur ein Zigfaches davon beträgt. Durch den fortlaufenden Umbildungsprozess nähert sich die Zahl der nachweisbaren Osteone asymptotisch einer Obergrenze an. Bei Langknochenkompakta (Femur) werden ca. 50 Osteone und Fragmente gezählt, bei Rippenkompakta nur ca. 20 Osteone und Fragmente. Das heisst aber auch, dass beim Femur in der Fläche Fragmente dominieren, bei der Rippe dagegen vollständige Osteone. Und es heisst auch, dass Rippenkompakta nur ein Durchschnittsalter von 30 Jahren aufweist im Gegensatz zur Femur-Kompakta mit einem Durchschnittsalter von 55 Jahren. Gleichzeitig steigt mit zunehmendem Gewebealter die Wahrscheinlichkeit, dass durch Umbildung der Nachweis für ein Osteon vollständig ausgelöscht wird.

Die Zahl ausgelöschter Osteone steht im direkten Zusammenhang mit den nachgewiesenen Osteonen und Osteonenfragmenten. ‚Missing osteons' und die Osteonendichte geben an, wieviele Osteone über das gesamte Gewebealter hinweg gebildet wurden. Demzufolge kann die Osteonenakkumulation OD_{GA} auch in Abhängigkeit vom Gewebealter GA und einer in diesem Zeitraum durchschnittlichen jährlichen Osteonenbildungsrate oder Aktivierungsrate µ berechnet werden. Das Produkt aus Osteonenbildungsrate und durchschnittlicher Osteonenfläche A_{Ost} ergibt wiederum die Bildungs- oder Resorptionsrate bzw. den Umsatz im Knochenquerschnitt $v_{f,r,t}$ (f: Formation, r: Resorption, t: turnover).

Die Osteonenfläche sollte dabei individuell als Durchschnittswert von 25 vollständigen Osteonen ermittelt werden. Als Näherungwert für den Osteonendurchmesser im humanen Knochengewebe werden 0,2 mm bis 0,3 mm angegeben (200-400 µm bei SPIERS 1968; 225-325 µm, Ø 270 µm bei SEDLIN UND FROST 1963; 155-245 µm, Ø 187,5 µm bei JAWORSKI ET AL. 1972; 300 µm bei MARTIN UND BURR 1989; 200 µm bei FROST 1987c, PARFITT 1994). Bei der Annahme einer zirkulären Struktur errechnet sich daraus eine Fläche von durchschnittlich 0,031 bis 0,07 mm^2 (STOUT UND PAINE 1994, STOUT UND LUECK 1995) bzw. 0,037 mm^2 (WU ET AL. 1970). Bei einer durchschnittlichen Länge von 2 bis 6 mm (MARTIN

UND BURR 1989, PARFITT 1994) ergibt sich eine Volumen für ein Osteon von ca. 0,05 mm^3 (FROST 1990d).

Für historische Skelettserien konnten STOUT UND TEITELBAUM (1976) und STOUT UND LUECK (1995) anhand von Rippenproben keine unterschiedlichen Stoffwechselraten für Männer und Frauen nachweisen im Gegensatz zu MARTIN UND ARMELAGOS (1985), denen dies anhand von Femurproben gelang. In der letztgenannten Arbeit waren die höheren Umbauraten den Frauen zugeordnet und wurden von den Autoren im Zusammenhang mit den Belastungen durch Schwangerschaft und Stillzeit gesehen. Im Vergleich zu den Studien an Rippenproben muss dies keinen Widerspruch darstellen, wenn man die unterschiedliche Funktion der Skelettregionen berücksichtigt. Ob dieses Ergebnis auf moderne Gesellschaften zu übertragen ist oder ob dies überhaupt einen regelhaften Zusammenhang widerspiegelt, muss offen bleiben. Denn es findet sich in den Studien mit Rezentproben kein entsprechender Ansatz. Allerdings konnte GALLAGHER (1991) bei häufiger Mutterschaft sogar einen Knochenmassezuwachs nachweisen, was ebenfalls auf einen gesteigerten Stoffwechsel (wenigstens für Apatit) schließen lässt. BURR ET AL. (1990) konnten an einer historischen Skelettserie für Frauen eine durchschnittlich kleineren Durchmesser für den Havers'schen Kanal bzw. für Männer eine größere Osteonendichte für Femurkompakta nachweisen und führen beide Beobachtungen auf eine höhere körperliche Belastung zurück.

In Abhängigkeit von der Osteonendichte oder -akkumulation wird bei nicht markierten Proben ein über das gesamte Zeitintervall (entweder Lebensalter oder biologisches Alter bzw. Gewebealter) durchschnittlicher Knochenumsatz berechnet. Im Gegensatz dazu kann aus dem histologischen Befund tetrazyklin-markierter Gewebeproben weiterführend auf den jährlichen Knochenumsatz geschlossen werden, wenn die Bildungszeit eines Osteons – σ_f – berücksichtigt wird. Es wird dabei von den zu einem bestimmten Zeitpunkt im histologischen Querschnitt mit Tetrazyklin markierten Osteonen pro mm^2 auf die durchschnittliche Anzahl von Osteonen pro Jahr geschlossen. σ_f beeinflusst dabei direkt das Verhältnis zwischen tatsächlich beobachtetem und jährlichem Knochenumsatz. Zusammenfassend ergeben sich für Knochenkompakta folgende Formeln 5 a-f:

Formel 5:

a) $\mathbf{OD = O_{St} + O_{Fr}}$

b) $\mathbf{OD_{GA} = O_{St} + O_{Fr} + O_M}$

c) $\mathbf{\mu' = OD_{GA} / GA}$

d) $\mathbf{\mu'' = OD / GA}$

e) $\mathbf{\mu''' = \# / \sigma_f / a}$

f) $\mathbf{v_{f,r,t} = \mu \times A_{Ost} = \mu \times \frac{1}{4} \pi d^2_{Ost}}$ μ ist μ', μ'' oder μ'''

II 4.4.5 Knochenbilanz und Belastung des Knochens

Bei der Steuerung der Knochenumbildung lassen sich zwei Mechanismen unterscheiden (RECKER ET AL. 2003): Neben einem ‚*baseline remodeling*' (in Anlehnung an das ‚*baseline growth*' in Kap. II 4.2) wird Knochenumbildung durch mechanische Belastung, sowohl durch Unterbelastung als auch durch entstehende Mikrofrakturen bei normaler und vor allem hoher Belastung, induziert. Dies darf aber nicht als eine Gegenüberstellung von internen und externen Steuerungsmechanismen verstanden werden. Vielmehr überlagern und ergänzen sich diese. Nicht zuletzt wird Knochenumbildung z. B. inter- und intraindividuell beeinflusst durch Geschlecht, Alter, Stoffwechsel und Hormone, Ernährung, Gifte und Drogen.

Knochenumbildung im Sinne des ‚baseline remodeling' erfolgt auch in Knochen, die keiner mechanischen Belastung ausgesetzt sind (STOUT 1982). Zu diesen gehören bei ansonsten gesunden Individuen von Geburt an paralysierte Gliedmaßen, aber auch bei jedem Menschen das Calvarium und das Ethmoid (FROST 1990d). Anhand dieser Beispiele kann der Umfang von Knochenumbildung abgeschätzt werden, der nicht auf Belastung zurückzuführen ist. Dieser Anteil ist aber je nach Einbindung des Knochens in den Stoffwechsel (Kompakta sive Spongiosa, mechanical sive metabolic bone) verschieden (PARFITT 2000).

Unter normaler und hoher Belastung werden Primär- und Sekundärknochen einer ständigen Belastung aus Zug, Druck und damit Verbiegung ausgesetzt (dynamische Belastung). Unter diesen Bedingungen kommt es zu Ermüdungserscheinungen und es entstehen im Knochengewebe Mikrofrakturen. Durch die Umbildung von Primär- in Sekundärknochen und den ständigen Umbildungen im Sekundärknochen wird den Mikrofrakturen und somit einer vollständigen Zerstörung des Knochens entgegengewirkt. Etwa ein Drittel der Umbildungsaktivitäten lässt sich direkt auf die Beseitigung von Mikrofrakturen zurückführen. Ob dies gezielt oder eher zufällig bei der Knochenumbildung geschieht, lässt sich experimentell nicht eindeutig entscheiden (MARTIN UND BURR 1989, BURR 1993, PARFITT 1995). Mit steigender Zahl von Mikrofrakturen und steigender Osteonendichte nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass in einer Umbildungszone Osteon und Mikrofraktur zufällig assoziiert sind. Es besteht zudem keine Klarheit, wie die Einbindung eines Osteons in das Gewebe unterbrochen sein muss, damit es zu einer Aktivierung kommt. Klarheit besteht nur

insofern, dass mit wachsender Zahl von Mikrofrakturen eine zunehmende Knochenumbildung zu beobachten ist (BURR 1993, BURR ET AL. 1984, 1985, BURR UND MARTIN 1993).

"Secondary osteonal bone is a composite material in which high shear stresses at cement line boundaries increase the probability that cracks will develop. However, for various reasons related to point-specific stiffness variations, the orientation of osteons and their lamellae, and the weak cement line interface, these cracks do not grow quickly. This provides adequate time for repair of the microscopic damage, which may occur selectively in damaged regions. A picture is beginnig to emerge of osteonal bone as a relatively weak material with excellent fatigue and impact properties..." (MARTIN UND BURR 1989, S. 210).

Andererseits wird Knochenumbildung, die nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit der Beseitigung von Mikrofrakturen gesehen wird, durch mechanische Beanspruchung gehemmt und ist damit den Steuerungsmechanismen bei der Knochenmodellierung genau entgegengesetzt (Kap. II 4.3).

Diese Hemmung der Knochenumbildung entfällt eindeutig beim Unterschreiten eines ebenfalls existierenden unteren Schwellenwertes (‚*Minimum Effective Strain*', MES). Dieser MES liegt zwischen 50 und 100 Mikrosstrain (µE) und damit weit unter dem physiologisch normalen Wert. Ursache ist ein Missverhältnis von vorhandener Knochenmasse zu tatsächlicher Beanspruchung, es ist ein „Zuviel" an Knochenmasse vorhanden. Je geringer die mechanische Beanspruchung des Knochens über ein Zeitintervall entsprechend der ‚*loading history*' (COWIN 1988) ist, um so weniger kann die Hemmung aufrechterhalten werden. Durch das Wegfallen der Hemmung kommt es zu einer gesteigerten Knochenumbildung und damit zu einem Abbau von Knochenmasse.

Knochenabbau wird in der endostal-kortikalen oder trabekularen Knochenschicht mit ihrer bereits negativen Knochenbilanz erreicht, wenn es zu einer Erhöhung der Aktivierungs-Rate µ für Osteonen kommt. Diese kann auf das 2- bis 5fache ansteigen. Eine Aktivierungs-Obergrenze begrenzt jedoch µ auf ca. 10 Osteone, die pro Jahr auf einer Fläche von einem Quadratmillimeter aktiviert werden können (in #/mm²/a).

Bei einer ausgewogenen oder positiven Knochenbilanz, z. B. in der Periostalschicht, genügt eine Steigerung der Aktivierungs-Rate jedoch nicht, um über Knochenumbildung eine Reduktion von Knochenmasse herbeizuführen. Es käme im Gegenteil zu einem Anwachsen der Knochenmasse. Knochenabbau wird jedoch auch hier erreicht, wenn Einfluss auf den Nettogewinn oder -verlust ρ genommen wird. ρ wird je Osteon beeinflusst durch die Resorptions-Rate ρ_r und die Formations-Rate ρ_f. Beide Werte stellen keine Festbeträge dar,

sondern variieren zwischen einer von der mechanischen Beanspruchung abhängigen maximal resorbierbaren (R_r) bzw. formatierbaren (R_f) Knochenmenge.

Weitere, wenn auch nur kurzfristige Mechanismen zur Massereduktion bestehen in der Erhöhung der Aktivierungsrate μ. Denn bei jedem nicht abgeschlossenen Umbildungprozess ergibt sich der sogenannte *Umbildungs-Raum* V_{rs}, der den Anteil des Knochenvolumens beschreibt, der vorrübergehend während des Umbildungsprozesses fehlt. Bei seiner Berechnung wird dabei angenommen, dass alle im Aufbau befindlichen Osteone bereits zur Hälfte gebildet wurden. Zusätzlich ist der Umbildungs-Raum von der Zeit abhängig, die zum Durchlaufen eines ARF-Zyklus benötigt wird (σ-Zeit; Formel 6):

Formel 6: $$\mathbf{V_{rs} = \mu \times \tfrac{1}{2} V_f \times \sigma}$$

Die *Osteonen-Bildungszeit* oder σ liegt im Durchschnitt bei drei bis vier Monaten. Bei Verlängerung von σ, z. B. durch eine Unterbrechung des ARF-Zyklus während oder nach erfolgter Resorption (Typ II-Osteone, Doppelzonenosteone), kommt es ebenfalls zu einer Massereduktion.

Alle vorgenannten Mechanismen stellen ein sehr effektives System zur Massereduktion dar. Bei einem Zusammenwirken der Faktoren kann es z. B. in drei bis vier Monaten zu einem 40%igen Abbau von Spongiosa kommen. MARTIN (1985) versuchte in einer Modellrechnung nachzuweisen, dass ein Ungleichgewicht zwischen Resorption und Formation von nur -0,0000933 mm³ pro mm³ und Tag zu einer Reduktion von Hunde-Kortex um 34 % in 10 Jahren führt. Ohne dass MARTIN dieses Ungleichgewicht auf einzelne Ursachen oder Steuerungsmechanismen zurückführt, verdeutlicht auch dieses Beispiel, wie effektiv Knochenumbildung Masseabbau bewirken kann.

II 4.5 Schlussfolgerungen

Knochen ist ein hochkomplexes Gewebe mit voneinander abgrenzbaren Struktur- oder Hierarchie-Ebenen. Auf jeder dieser Ebenen werden unterschiedliche Regulationsmechanismen wirksam. In ihrem Zusammenspiel bewirken diese, das Knochen als Kompositmaterial aus extrazellulären anorganischen und organischen Substanzen und Gewebestrukturen im Sinne eines negativen Rückkopplungssystems dynamisch auf seine vielfältigen Aufgaben reagieren kann.

Antworten für eine bessere Beschreibung der Ausstauschprozesse von Kohlenstoff im Knochen fanden sich auf der Organ- und Gewebe-Ebene. Als wichtige Prozesse müssen dabei Knochenwachstum, -modellierung und -umbildung genannt und voneinander abgegrenzt werden. Alle drei Prozessen sind genetisch vorprogrammiert und bestimmen Größe, Form und Funktionsfähigkeit des Knochens (‚*baseline conditions*' mit ‚*baseline growth*' und ‚*baseline remodeling*'). Darüberhinaus reagiert Knochen über Modellierung- und Umbildungsprozesse adaptiv auf extra- und intraindividuelle Einflussfaktoren, wobei ein Ausgleich zwischen den genetisch vorgegebenen Strukturen des Knochens, seiner mechanischen Belastung, hier ausführlicher dargestellt, und anderen, nichtmechanischen Anforderungen erzielt wird. Dabei ist es im Sinne dieser Arbeit unerheblich, dass über die einzelnen Steuerungsmechanismen auf der Zellebene und darunter auf der Ebene der Mikro- und Ultra-Strukturen z. T. kontrovers diskutiert wird.

Knochenwachstum, -modellierung und -umbildung tragen in unterschiedlichem Umfang zum Auf- und Abbau von Knochengewebe und damit Knochenmasse bei und sind vorrangig vom Lebensalter abhängig. Geschlechtsunterschiede werden mit der beginnenden Pubertät deutlich und bleiben bis zum Senium erhalten. Nachfolgend werden beispielhaft für Knochenkompakta in Tabelle 4 die Prozesse des Knochenwachstums, der -modellierung und -umbildung noch einmal zusammgestellt und die daraus jeweils resultierenden Gewebearten, die beteiligten Zellen und die semi-makroskopisch nachweisbaren Störungen dieser Prozesse genannt.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Prozesse für Knochenkompakta, die zu Aufbau und Abbau von Knochenmasse führen, mit den jeweils resultierenden Gewebearten, den beteiligten Knochenzellen und den semimakroskopisch nachweisbaren Störungen dieser Prozesse.
(CB Chondroblasten, OB Osteoblasten, OK Osteoklasten, Ljz. Lebensjahrzehnt)

Prozess			Gewebeart	Lokalisation: Zellen	Störungen
Knochenaufbau	Knochenwachstum: ‚baseline growth', adaptiv bis 3. Ljz. (60-80%)	En(do)chondrale Ossifikation und Längenwachstum; Massezuwachs	compacted-coase-cancellous bone	Enchondral: CB und OB	Harris-Linien
		Dickenwachstum: Konservierung der perinatalen Form; geringer Massezuwachs	Primärknochen: Lamellen-, seltener Geflechtknochen (bei Überbelastung regelmäßig)	Periostal: OB Endostal: OK	Hypermineralisierte Linien
Knochenaufbau und -abbau	Knochenmodellierung, Drift, bis 3. Ljz. (20-40%), gering lebenslang	Veränderung der Form; global Massezuwachs			Hypermineralisierte Linien, ‚renewed modeling' und ‚repair' auch nach dem 3. Ljz.
				Spezifische Aktivierung der OB und OK getrennt an peri- und endostaler Oberfläche	
	Knochenumbau: ‚baseline remodeling' und adaptiv	ARF-Zyklus; global Masseabbau	Sekundärknochen: Osteonenknochen (periostale Schicht, Kompakta, endostale Schicht)	OK und OB, zeitlich aufeinanderfolgend in Osteonen (Kopplung, ‚coupling')	‚wurstartige' Resorptionsräume, Typ II-Osteone, Doppelzonenosteone

II 5 Die Quantifizierung des Stoffwechsels im Knochen: Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ und die jährliche Austauschrate

II 5.1 Einführung

In dieser Arbeit ist ein besonderer Blick auf die Auf- und Abbauprozesse im Knochen notwendig. Mit diesen soll der Kohlenstoff-Stoffwechsel so weit beschrieben werden, dass sich ^{14}C-Konzentrationen zum Zeitpunkt des Todes eines Individuums berechnen lassen. Denn erst durch den Vergleich von berechneten mit gemessenen ^{14}C-Konzentrationen unter Berücksichtigung des Kohlenstoff-Stoffwechsels im Knochengewebe und in Abhängigkeit von den sich jährlich in der Atmosphäre ändernden ^{14}C-Werten wird diese Methode für eine Liegzeitbestimmung über den bisher bereits gültigen Rahmen hinaus anwendbar sein.

Der Kohlenstoff-Stoffwechsel lässt sich in einer ersten Annäherung durch die Prozesse von Knochenwachstum, -modellierung und -umbau und diese wiederum am besten durch die Knochenmasse-Entwicklung beschreiben. Dabei lassen sich zwei Phasen unterscheiden, in denen entweder eine *‚Zunahme‘* oder eine *‚Abnahme‘* der Knochenmasse stattfindet. Während des Übergangs von der einen in die andere Phase wird die Knochenmasse über eine individuell unterschiedlich lange Zeitspanne als annähernd konstant, als quasi-stabil angesehen. Diese Phase dauert vom 3. Ljz. bis ca. zum Ende der Reproduktionsfähigkeit (PARFITT 1991, KLEIN UND WOLFE 2001, HABERLAND ET AL. 2001).

Die Zunahme an Knochenmasse stellt die *positive Bilanz* der über einen definierten Zeitraum, meist ein Jahr, gleichzeitig stattfindenden Auf- und Abbauprozesse dar und dominiert bis zum Eintritt in das Erwachsenenalter. Nach Abschluss des Längenwachstums kommt es in Anlehnung an GARN (1970) noch zu einem geringen Massezuwachs von ca. 5 bis 10 %, bis die maximale Knochenmasse oder *‚peak bone mass‘* im 3. Ljz. erreicht wird. Es wird damit auch deutlich, dass unterschiedliche Reifemerkmale, wie z. B. die Geschlechtsreife, der Abschluss des Längenwachstums und der Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Skelettmasse, zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht werden.

Vor allem im fortgeschrittenen Erwachsenenalter stellt die Reduktion der Knochenmasse dagegen die *negative Bilanz* der Auf- und Abbauprozesse dar und ist fast ausschließlich auf

Umbildungsprozesse zurückzuführen, obwohl in geringem Umfang Knochen bis ins hohe Senium neu modelliert wird und Knochendrift zu beobachten ist. Neben individuellen Einflussgrößen wie der mechanischen Belastung, dem Ernährungs- und Hormonstatus sowie dem Alter bei Eintritt in die postreproduktive Lebensphase sind nach HEANEY (1983, S. 333) vier Faktoren hauptsächlich für das Ausmaß des Masseverlustes verantwortlich:

(1) Die erreichte maximale Knochenmasse
(2) Die durchschnittliche Balance von Aufbau und Abbau
(3) Die Rate der Umbauprozesse sowie
(4) Die Zeit, welche als Lebensalter greifbar wird.

Durch die Beschreibung der Zunahme und Reduktion von Knochenmasse werden daher nur ‚*Netto-Gewinn*' bzw. ‚*Netto-Verlust*' erfasst. Dadurch werden die im Knochen stattfindenden Prozesse in Bezug auf den Kohlenstoff-Stoffwechsel im Gewebe systematisch unterschätzt, wobei im Rahmen dieser Arbeit vor allem die Unterschätzung von Aufbauprozessen vermieden werden sollte. Als Beispiel, wie sehr Abbauprozesse den Massezuwachs überdecken, sei hier wiederholt angeführt, dass bereits im 5. Lj. kaum noch perinatales Knochengewebe mehr vorhanden ist. Denn bereits vor dem Erreichen der maximalen Knochenmasse kommt es durch Knochendrift und Dickenwachstum zu deutlichen Abbauprozessen. Gleichzeitig werden jedoch bis in das 3. Ljz. die mit dem Erscheinen von Osteonen nachweisbaren Umbildungsprozesse durch Wachstums- und Modellierungsprozesse bei der Masseentwicklung deutlich überprägt. Es wird daher zu prüfen sein, ob sich die Umbaurate sinnvoll erfassen und ein zusätzlicher Korrekturwert zur Knochenmasse-Entwicklung einführen lässt, der den durch Abbauprozesse überlagerten Masseaufbau erfasst.

Da für die Liegezeitbestimmung die ^{14}C-Konzentration im Gewebe in Abhängigkeit vom Sterbealter interessiert und dabei auf das (sich ebenfalls jährlich ändernde) ^{14}C-Angebot in der Atmosphäre während der Lebensspanne eines Menschen zurückgegriffen wird, muss der Kohlenstoffaustausch für jedes Lj. zwischen Geburt und Tod eines Individuums so gut wie möglich nachgebildet werden. Aus den vorangegangenen Ausführungen ergibt sich, dass die ^{14}C-Konzentration im Gewebe im Zusammenhang mit der Knochenmasse-Entwicklung, der jährlichen Umbaurate sowie einem jährlichen Korrekturwert steht.

Da die Knochenmasse-Entwicklung im Gegensatz zur (jährlichen) Umbaurate und zum (jährlichen) Korrekturwert einen über Jahre verlaufenden Prozess beschreibt, kann erst in

einem nachfolgenden Schritt auf die jährliche, relative Änderung der Knochenmasse geschlossen werden. Dies entspricht der Entwicklungsgeschwindigkeit in der Anthropologie und Auxologie und beschreibt dort beispielsweise den jährlichen Zuwachs an Körperhöhe oder Körpermasse.

Der Kohlenstoff-Stoffwechsel im Knochen kann somit in Abhängigkeit von der jährlichen relativen Knochenmasse-Änderung, der jährlichen Umbaurate im Gewebe selbst sowie einem jährlichen Korrekturwert gesehen werden. Sie sind als der biologische Hintergrund zu verstehen, vor dem die Ergebnisse einer Kurzzeitdatierung mit Hilfe der ^{14}C-Methode (Kap. II 3) beurteilt werden müssen. Es ist somit wichtig, diese drei Einflussgrößen auf die ^{14}C-Konzentration im Gewebe in geeigneter Weise zusammenzuführen. In diesem Kapitel wird daher zuerst geprüft, ob sich Literaturdaten zusammentragen lassen, aus denen diese Parameter übernommen werden können. Es werden weiterhin die Beschränkungen dieses Ansatzes aus Sicht der Humanbiologie, Anthropologie und Humanmedizin diskutiert.

Es ist notwendig, die am Knochen selbst zu erhebenden Merkmale hierarchisch zu ordnen und diese in Bezug auf die in der Literatur diskutierten Einflussgrößen auf die Knochenmasse (Entwicklung und Umbau) zu bewerten. Dies erfolgt in Kapitel II 5.2. In Kapitel II 5.3 werden die zur Verfügung stehenden Methoden zur Massebestimmung und zum Knochenumbau kritisch beurteilt. In Kapitel II 5.4 erfolgt nach einer Vorauswahl geeigneter Arbeiten vorrangig zur Knochen- bzw. Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ eine schlaglichtartige Diskussion der bisher im Zusammenhang mit der Interpretation von ^{14}C-Daten nicht bzw. nur ungenügend berücksichtigten Einflussgrößen.

Es wurde recht schnell deutlich, dass sich keine Literatur recherchieren lässt, aus der die benötigten Angaben zu den drei Parametern entnommen werden konnten. Somit lässt sich auch der theoretisch sinnvolle Ansatz, die benannten Prozesse auf der Organebene (für einzelne Knochen) bzw. auf der Gewebeebene (Gewebeschichten) zu erarbeiten, nicht weiter verfolgen. Auch ließen sich Werte für die jährliche relative Änderung der Skelettmasse (ΔSM) der Literatur nicht unmittelbar entnehmen, konnten jedoch anhand der vorgefundenen Daten berechnet werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird daher zuerst die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ anhand von Literaturdaten getrennt für Männer und Frauen berechnet (Kap. VI 2.3 bis VI 2.5) und anhand dieser dann in einem weiteren Schritt auf die jährliche relative Änderung der Skelettmasse ΔSM (Kap. V 2 und VI 2.6) geschlossen. ΔSM erfasst den Anteil an Skelettmasse$_{netto}$ und damit ^{14}C, der im Laufe eines Lj. und im Vergleich

zur bereits vorhandenen Skelettmasse auf- bzw. abgebaut wird. Vor allem bis zum 3. Ljz., also während des Wachstums und der Reifung eines Individuums, wird damit letztendlich der Anteil von ^{14}C erfasst, der überwiegend aus körperfremden Reservoiren aufgenommen werden muss.

Im Gegensatz dazu können anhand der zur Verfügung stehenden Literatur die beiden Parameter Korrekturwert und Umbaurate nicht ausreichend quantifiziert werden. Sie werden dennoch in Kapitel II 5.5 kurz diskutiert. Beide Einflussgrößen werden zur Austauschrate zusammengefasst. In diesen Parameter gehen zusätzlich Reservoir-Effekte, individuelle Abweichungen von Skelettmasse-Entwicklung sowie intraindividueller oder sogar intraossealer Stoffaustausch in nicht zu differenzierender Weise ein (Kap. II 3.2 und II 3.3). Damit ähnelt die Austauschrate eher dem Parameter, der in den bereits vorliegenden ^{14}C-Modellen (Kap. II 3.2) berechnet wurde.

In Kapitel II 5.6 werden die sich aus den Ausführungen im Kapitel II 5 ergebenden Schlussfolgerungen zusammengefasst.

II 5.2 Die hierarchische Ordnung der Knochenmerkmale

An dieser Stelle wird der Versuch unternommen, die morphologischen Merkmale des Knochens hierarchisch zu ordnen und in Bezug auf die Skelettmasse (Entwicklung und Umbau) und unter Berücksichtigung der biologischen Einflussgrößen Alter, Geschlecht, Skelettregion und Rasse – im Gegensatz zu den nichtbiologischen – sozioökonomischen Einflussgrößen kritisch zu bewerten. Dieser Versuch zwingt dazu, sich über die Beziehung von Merkmalen klar zu werden und schafft die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Terminologie. Nachfolgend werden, in Anlehnung an FROST (1985, Kap. II 4.1) vier Ebenen unterschieden:

(0) Knochenmerkmale auf der Individual- bzw. Organismusebene (ohne Parallelisierung bei FROST)
Die Merkmale dieser Ordnung bestimmen das somatische Erscheinungsbild des Menschen. Beziehungen/Verhältnisse zwischen diesen lassen sich typisieren und werden sowohl intuitiv als auch wissenschaftlich erfasst mit

- Geschlecht
- Körperbautyp
- Rasse.

(1) Knochenmerkmale auf der Skelettebene
Die Einzelknochen variieren in ihrer morphologischen Gestalt und in ihrem absoluten und relativen Zueinander. Diese Verhältnisse lassen sich als zusammengesetzte Merkmale auf der Skelettebene beschreiben und umfassen

- Die Skelettlänge (ggf. Körperlänge)
- Die Skelettproportionen (ggf. Körperproportionen), einschließlich Robustizität
- Die Skelettregion (postkranial/kranial bzw. Schädel/Rumpf/Gliedmaßen). Der Schädel bildet insofern eine Ausnahme, als er nur ungenügend mit Größen-, Robustizitäts- und Proportionsmerkmalen des postkranialen Skelettes korreliert.

In ihrer Gesamtheit bedingen diese Merkmale das Skelettvolumen bzw. die -masse.

(2) Kochenmerkmale auf der Organebene
umfassen makroskopisch direkt bestimmbare und quantifizierbare Merkmale, mit

- Der Länge und Form eines Knochens
- Den Proportionen und der Robustizität des Knochens
- Dem Verhältnis von Kompakta zu Spongiosa (Kompaktaanteil).

Sie bedingen die Entwicklung und eine Variabilität des Knochenvolumens, der -masse und -dichte (d_{Organ} oder scheinbare Dichte, vgl. SEEMAN 1997, hier Kap II 5.3.1).

(3) Kochenmerkmale auf der Gewebeebene
umfassen z. T. nur mikroskopisch bestimmbare und nur bedingt quantifizierbare Merkmale, mit

- Der Art der Knochenneubildung (desmal bzw. perichondral/periostal vs. enchondral)
- Der Strukturierung des Knochens (keine, Lamelle, Osteon) und damit der Qualität des Gewebes (Geflecht-, Lamellen-, Osteonenknochen)
- Der Lokalisation des Gewebes (periostal, intrakortikal, endostal und trabekular) und damit dem Ort der Knochenbildung und -umbildung.

Sie bedingen die Entwicklung und eine Variabilität des Gewebevolumens, der -masse und -dichte (d_{Gewebe} oder wirkliche Dichte, vgl. SEEMAN 1997, hier Kap II 5.3.1).

Die Skelettmasse (im Ergebnis ihrer Entwicklung und ihres Umbaus) ergibt sich nach der hier vorgenommenen Unterteilung der Knochenmerkmale allein aus Merkmalen der Organ- bzw. der Skelettebene. Demgegenüber ist jedoch festzustellen, dass in der Literatur nur Beziehungen zwischen Skelettmasse und zwei von den drei Merkmalen (Geschlecht und Rasse) auf der Individualebene sowie zwischen Skelettmasse und Alter sowie den sozioökonomischen Faktoren untersucht und diskutiert wurden. Zwar lassen sich Knochen- und Skelettmerkmale auch auf der Individualebene wiederfinden, zusätzlich zeigen sich jedoch auf dieser Ebene neue Eigenschaften. Denn im Gegensatz zu den relativ eindeutig über Messverfahren zu bestimmenden Merkmalen der Knochen- bzw. Skelettebene sind die Merkmale der Individualebene eher von qualitativer Art und in ihrer Bestimmung weniger eindeutig, da abhängig von dem jeweilig verwendeten Klassierungssystem. Weiterhin muss festgestellt werden, dass die Knochenmerkmale nur sekundäre Bedeutung für die Definition des Körperbautyps und sogar nur tertiäre Bedeutung für die Definition des Geschlechts und der Rasse besitzen. Somit sind die drei Merkmale Körperbautyp, Rasse und Geschlecht untereinander nicht gleichwertig. Gleichzeitig stehen sie untereinander in wechselseitiger Beziehung.

Es wurde versucht, die vielfältigen Beziehungen und Wirkungen der einzelnen Faktoren auf die Skelettmasse (Entwicklung und Umbau) und untereinander zu ordnen und grafisch darzustellen (Abb. 5). In Anlehnung an einen direkten azyklischen Graphen (DAG) erfolgt damit die formalisierte Darstellung von Zusammenhängen zwischen Ziel- und Einflussgrößen, von wechselseitigen Beziehungen der Einflussgrößen untereinander sowie die Aufdeckung von Confoundern (GREENLAND ET AL. 1999, ROBINS 2001). In Abbildung 5 a wurden neben den Zielgrößen ‚Skelettmasse-Entwicklung und Umbaurate' die Einflussgrößen auf der Individual- und der Skelettebene sowie das Alter und sozioökonomische Faktoren aufgenommen und über Pfeile verbunden, wobei in Pfeilrichtung die Wirkrichtung gesehen wird.

Strenggenommen ist zu *jedem beliebigen Zeitpunkt* die Skelettmasse nur von den gegebenen Proportions- und Größenverhältnissen des Skeletts und (von) der (untersuchten) Skelettregion abhängig. Denn es ist unwichtig, wie diese Merkmale entstanden sind und welche Einflüsse auf diese eingewirkt haben. Ein großes, robustes Skelett ist schwer im Verhältnis zu einem kleinen, grazilen Skelett, egal ob dabei ein Erwachsenenskelett mit einem Kinderskelett, das Skelett eines Mannes mit dem einer Frau oder das eines Afrikaners mit dem eines Asiaten verglichen wird. Lässt sich diese Überlegung theoretisch führen und sich auch

in der Abbildung 5 a wiederfinden, kann diese anhand von konkretem Datenmaterial kaum geführt werden, da diese Parameter nicht regelmäßig erhoben wurden. Gleichzeitig greift diese Argumentation zu kurz, denn, wie bereits in Kapitel II 5.1 ausgeführt, interessiert nicht die Beschreibung der Skelettmasse zu einem Zeitpunkt, sondern ihre Entwicklung bis zu diesem Zeitpunkt oder über ein definiertes Zeitintervall hinweg. In einem *Prozess* kann es jedoch wichtig sein, gerade den Ursachen für diese Unterschiede nachzugehen. Es wird also nach den Einflussgrößen gefragt, die bis zu diesem Zeitpunkt oder zwischen zwei Zeitpunkten zu den beobachteten Unterschieden vor allem im Vergleich zu anderen Individuen geführt haben könnten. Dies ist besonders bedeutsam, wenn Beginn und Ende des Prozesses wie bei der Skelettmasse-Entwicklung zwar über die Lebensspanne des Individuums definiert, aber hochvariabel ist. Dieser Variabilität wird begegnet, wenn der interessierende Prozess über definierte, kleinere Zeitintervalle – z. B. in Einjahresintervallen – bis zum Tod eines Individuums beschrieben wird.

Durch die Vielzahl der Beziehungen zwischen den Einflussgrößen und zu den Zielgrößen wirkt das volle Modell (Abb. 5 a) unübersichtlich. Nach Entfernen aller Pfeile, die von den in der Literatur (z. T. kontrovers) diskutierten und nachfolgend auch im Rahmen dieser Arbeit zu besprechenden Einflussgrößen (Kap. II 5.4) ausgehen, verbleiben in der Abbildung die Beziehungen, die in der Literatur bisher keine ausreichende Betrachtung erfuhren. Unter der Voraussetzung, dass die Einflussgrößen und ihre hier dargestellten Wirkrichtungen akzeptiert sind, wird die reduzierte Darstellung in Abbildung 5 b wie folgt interpretiert:

Alter, Geschlecht, sozioökonomische Faktoren und Skelettregion wirken jeweils als *direkte* (z. B. Geschlecht) und *indirekte* (z. B. wirken Alter und Geschlecht auch indirekt über die sozioökonomischen Faktoren) Einflussgrößen sowohl auf die Skelettmasse-Entwicklung als auch auf die Umbaurate.

Rasse/geographische Herkunft und Körperbautyp sind ebenfalls Einflussgrößen und zwar unabhängig von den sozioökonomischen Faktoren. Die Rasse/geographische Herkunft nimmt zudem über die sozioökonomischen Faktoren indirekt Einfluss auf die beiden Zielgrößen (Abb. 5 a).

Es muss jedoch beachtet werden, dass es sich bei der Rasse/geographischen Herkunft und dem Körperbautyp auch um indirekte Wirkungen der Einflussgrößen Skelettproportionen und -länge auf die Skelettmasse-Entwicklung und Umbaurate handelt.

Die Einflussgrößen Skelettproportionen und -länge sind als gemeinsame ‚Vorfahren' sowohl für die Zielgrößen Skelettmasse-Entwicklung und Umbaurate als auch für die Einflussgrößen Rasse und Körperbautyp zu verstehen. Die Wirkung des Körperbautyps auf die Skelettmasse-Entwicklung und Umbaurate führt zusätzlich indirekt über die Rasse.

Strenggenommen stellt bei indirekter Wirkung einer Einflussgröße diese einen Confounder für die nachfolgenden Einflussgrößen auf diesem Weg dar. Ist diese jedoch selbst im Erklärungsmodell enthalten, können diese Effekte über Wirkungen und Wechselwirkungen in multiplen mathematischen Modellen berechnet werden. Schwierig ist es, wenn die direkte Einflussnahme nicht erfasst werden kann. In Abbildung 5 b betrifft dies die Faktoren Körperbautyp, aber vor allem Skelettlänge und -proportionen. Sie stellen in diesem Modell die einzig „wirklichen" Confounder dar.

Für die Modellierung der beiden Zielgrößen Skelettmasse-Entwicklung und Umbaurate würde man sich in Zusammenfassung dieser Ausführungen eine Skelettserie wünschen, in der für jedes Skelett Alter, Geschlecht, Rasse, Körperbautyp, sozioökonomische Faktoren, Skelettregion, Skelettproportionen und -länge bekannt sind. Soll nicht die Entwicklung der Skelett-, sondern die der Knochenmasse für jeden Einzelknochen modelliert werden, wären die metrisch leichter erfassenbaren Merkmale Knochenproportion und -länge zu erheben.

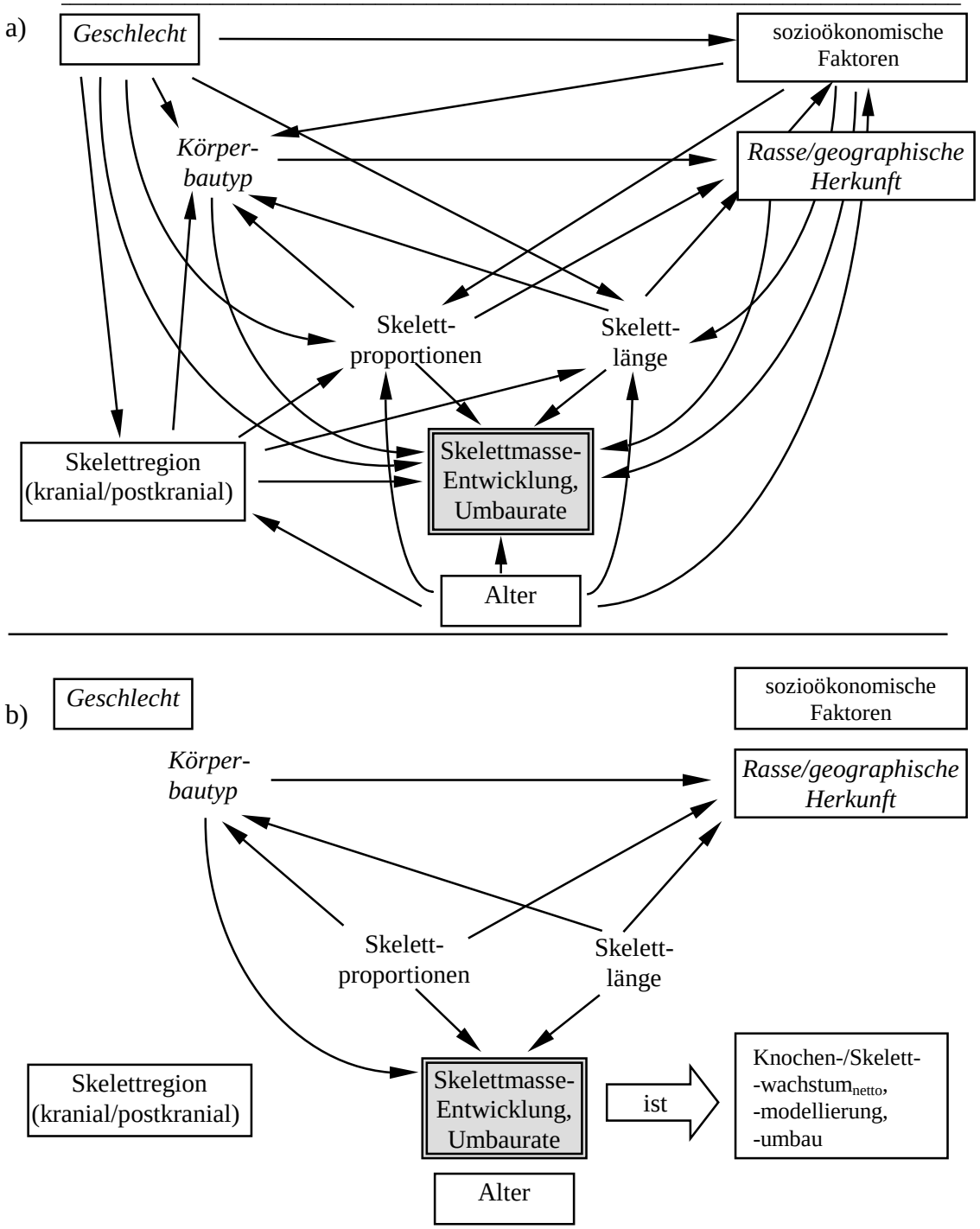


Abbildung 5: Beziehungsdiagramm zwischen Einflussfaktoren und Skelettmasse (Entwicklung und Umbau) für gesunde Individuen.
a) Volles Modell
b) Nach dem Entfernen aller Pfeile in a), die von den Einflussgrößen Alter, Geschlecht, Skelettregion, Rasse und sozioökonomische Faktoren ausgehen. Es verbleiben die Faktoren, die zusätzlich als Einflussgrößen für die Skelettmasse bzw. als Confounder für die Rasse und den Körperbautyp angesehen werden müssen.

Rahmen: ═ Zielgröße,
─ in der Literatur diskutierte Einflussgrößen,
(ohne) in der Literatur nicht diskutiert
kursiv Einflussgrößen auf der Individualebene,
nicht kursiv Einflussgrößen auf der Skelettebene.

II 5.3 Direkte und indirekte Verfahren zur Bestimmung der Skelettmasse und die schwierige Bestimmung der Knochendichte

Bei der Diskussion der zur Verfügung stehenden Methoden muss zwischen der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ einerseits und der Umbaurate und der Bestimmung des Korrekturwertes anderseits unterschieden werden. Für die Skelettmasse-Entwicklung stehen Verfahren zur Verfügung, die sowohl das gesamte Skelett als auch nur Teile von diesem als pars pro toto verwenden. Dagegen lassen sich der Korrekturwert (Kap. II 5.5.1) und die Umbaurate (Kap. II 5.5.2) nur lokal bestimmen, wobei es sich fast ausschließlich um indirekte Methoden, z. B. aus der Histologie, Radiologie oder Autoradiographie, handelt. Gerade die lokale Bestimmung dieser Parameter erhöht den Einfluss von Skelettregion und Geweberegion sowie Gewebealter auf die beobachteten Prozesse und entsprechend vieldeutig stellen sich auch die Ergebnisse in der Literatur dar. Die nachfolgenden Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich daher vorwiegend auf die Skelettmasse.

Allen nachfolgend genannten Methoden ist gemeinsam, dass sie – besonders ab dem Erwachsenenalter – sehr langsam verlaufende Prozesse aufdecken sollen. Zum Beispiel findet sich in der Literatur für den durchschnittlichen jährlichen Skelettmasse-Verlust häufig die Angabe von 1 bis 2 %. Dies stellt jedoch hohe Ansprüche an die Präzision einer Methode, die also bei den methodenbedingten Messfehlern deutlich unter diesem Wert liegen sollte. Diesen Anspruch kann keines der nachgenannten Verfahren erfüllen. Das zwingt zur Beobachtung über lange Zeitintervalle bzw. zu Querschnittsstudien, was fast gleichbedeutend mit einer Zunahme schwer bzw. gar nicht zu kontrollierender inter- und intraindividueller Störgrößen bei der Beurteilung der Ergebnisse ist.

Die Methode der Wahl scheint als einzig direktes Verfahren für die Bestimmung der Skelettmasse, besonders bis zum Erreichen der maximalen Skelelettmasse im 3. Ljz., das Auswiegen des Gesamtskelettes bzw. der Einzelknochen zu sein. Da aber bei dieser Methode häufig auf ältere Skelettsammlungen zurückgegriffen wird, lassen sich regelmäßig nur anthropologisch-medizinische Grunddaten wie Geschlecht, Alter, seltener Rasse und Krankheiten erheben. Außerdem werden bei diesen Sammlungen, z. T. über Jahrzehnte zusammengetragen, die Auswirkungen der Akzeleration nur unvollständig oder gar nicht berücksichtigt. SAUNDERS UND HOPPA (1993) verweisen darüberhinaus auf ein weiteres Problem von Knochensammlungen:

„It is paradoxical that the samples from which osteologists attempt to make interpretations regarding past health are in fact made up of those individuals who have not survived. (S. 127). ...
In summary, it may be said that the survival of infants and children is influenced by the interaction of biological, environmental, economic, and social factors that operate synergistically and at several levels. ... Whether or not reduced growth is greater in non-survivors has been the focus of this paper. It can be concluded that short stature by itself does not indicate increased risk of morbidity for children, but rather is a by-product of it and, as has been reviewed here, disease-dependent.“ (S. 146f).

Eine entsprechende Beobachtung machte bereits INGALLS 1931. Er untersuchte Skelette von 100 männlichen, weißen Amerikanern im Alter von 19 bis 78 Jahren. Von 83 Individuen war die Todesursache bekannt mit Tuberkulose (n = 30), Nieren- und kardiovaskulärer Erkrankung (n = 23), akuter Infektion (n = 17), normal (Unfall, n = 13).

„... in most of the “normal” cases, over 70 %, the bone weight was above the mean of the whole series, in the acute infections there were about 59 %, in the renal and cardiovascular cases 43 % and 37 % in tuberculosis group. There is little to be made out here beyond the tendency of more or less chronic disorders to be associated with a low bone weight.“ (INGALLS 1931, S. 96).

Anhand der Quantität entsprechender Literatur gewinnt man jedoch leicht den Eindruck, dass der direkte methodische Ansatz als nicht modern gilt. Der überwiegende Anteil entsprechender Arbeiten ist deutlich älter als 30 Jahre. Eine der wenigen jüngeren Arbeiten stammt von KLEIN UND WOLFE (2001). All diese Studien stellen Querschnittsuntersuchungen dar, die, oft nach Geschlecht getrennt, die Entwicklung eines „Durchschnittsindividuums“ beschreiben. Sie zeichnen sich aber oft durch eine ungenügende statistische Aufbereitung der Ausgangsdaten aus, die eine Weiterverarbeitung oder auch (Neu)Interpretation der Ergebnisse deutlich erschwert.

Alle anderen Methoden, ob invasiv oder nicht-invasiv, sind indirekte Methoden. Eine nicht-‚moderne‘ Methode stellt die Veraschung des Knochens und die Ermittlung des Ascheanteils an der Knochenmasse dar. Mit dieser Methode lässt sich die anorganische Komponente des Knochens sicher bestimmen. Die Differenz aus Knochenmasse und Aschegewicht ergibt die Masse der organischen Knochenbestandteile. Mit Hilfe dieses Zusammenhanges wurde versucht, die altersabhängige Entwicklung der organischen und anorganischen Knochenfraktionen als unabhängig voneinander zu interpretieren (TROTTER UND PETERSON 1962, siehe unten Kap. II 5.2.1).

Die nicht-invasiven Methoden wie Röntgen, Absorptionsspektroskopie, Computertomographie (CT) und Neutronenaktivierung (NAA) stellen moderne Verfahren dar und eröffnen die Möglichkeit von Längs- oder auch kombinierten Quer- und Längsschnittuntersuchungen. Sie sind jedoch alle mit mehreren nicht zu unterschätzenden Nachteilen behaftet: Bis auf die

Ganzkörper-Untersuchungen (z. B. mit Hilfe der CT oder der NAA) wird von einer (Knochen)Region und deren Entwicklung bzw. einer Gewebefraktion (z. B. Kalziumanteil) auf den ganzen Körper (Knochen bzw. das gesamte Skelett) geschlossen und dieses wird als ausreichendes pars pro toto verstanden. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die untersuchte (Knochen)Region in der Regel nur zweidimensional darstellen lässt. Die Ermittlung der dritten, räumlichen oder Tiefendimension beruht auf Erfahrungswerten und ist und bleibt auch weiterhin schwierig bzw. ausgesprochen kostenintensiv, wobei für die verschiedenen Techniken z. T. umfangreiche Empfehlungen existieren (z. B. zur Bestimmung der Mineraldichte des Knochens im JOURNAL OF CLINICAL DENSIOMETRY 7, 2004 oder unter http://www.iscd.org/Visitors/official.cfm in jeweils aktualisierter Form).

Die Beobachtungen werden bei den indirekten Verfahren über mehrere Einzelschritte in Bezug zu entsprechenden Durchschnittswerten oder zu Medianen gesetzt. Als Grundlage dient häufig der „*reference man*“ nach der Definition des INTERNATIONAL COMMITTEE FOR RADIATION PROTECTION (1975, ICRP-23), die vorrangig zum Strahlenschutz der Patienten erarbeitet wurde. Dieser ‚Standard-' oder ‚Referenz-Mann' ist definitionsgemäß europid und lebt in der gemäßigten Klimazone. Er ist zwischen 20 und 30 Jahre alt, 70 kg schwer, 170 cm groß und hat einen ventro-dorsalen Körperdurchmesser von 22,9 cm. Für den Standard-Mann ergibt sich nachfolgende Körperzusammensetzung:

(1) nach Geweben

Skelettmuskulatur	28,00 kg	(40,00 %)			
Fettgewebe	15,00 kg	(21,40 %):	davon Fett	12,00 kg	(17,10 %)
Skelett	*10,00 kg*	*(14,30 %):*	*Kortex*	*4,00 kg*	*(5,70 %),*
			Spongiosa	*1,00 kg*	*(1,43 %),*
			Knochenmark	3,00 kg	(4,30 %),
			Knorpel	1,10 kg	(1,57 %),
			Gefäße	0,90 kg	(1,30 %)
Haut	4,90 kg	(7,00 %)			
Leber	1,80 kg	(2,60 %)			
Gehirn	1,40 kg	(2,00 %)			
Herz	0,33 kg	(0,47 %)			
Nieren	0,31 kg	(0,43 %)			

(2) nach den Hauptelementen

Sauerstoff	43,00 kg	(61,40 %)
Kohlenstoff	16,00 kg	(22,80 %)
Wasserstoff	7,00 kg	(10,00 %)
Stickstoff	1,80 kg	(2,60 %)
Kalzium	1,10 kg	(1,60 %)
Phosphor	0,50 kg	(0,70 %)

Bei LINDSKOUG (1992) findet sich eine leicht abweichende Angabe für das Fettgewebe mit 17 kg, davon 10,3 kg subkutan. ELLIS (1990) überprüfte die Referenzwerte an 1374 „weißen“ und „schwarzen“ US-Bürgern beiderlei Geschlechts. Er stellte fest, dass der ‚Durchschnittsmann’ größer und schwerer ist als der ‚Referenz-Mann’. Nach Adjustierung für Alter, Körperhöhe und -gewicht stimmten jedoch seine Werte gut mit denen der Empfehlung überein. ELLIS (1990) überprüfte erstmals auch die Referenzwerte für Frauen, die nach ICRP-23 zwischen 66 und 75 % der Gewichtsanteile des Mannes erreichen sollen. Dies konnte ELLIS nicht bestätigen. So lag in seiner Studie die Relation von Frauen und Männern für die Körperhöhe bei 92 %, beim Körpergewicht bei 82 %, beim Gesamtkörperkalzium (TBCa) jedoch bei 73 %, wobei davon wiederum 98 % im Skelett lokalisiert waren.

Sollte die Angabe von Referenz-Werten ursprünglich zur Berechnung von Strahlendosen dienen, wurden auf diesen Grundlagen aber auch Untersuchungsergebnisse diskutiert und interpretiert (siehe ELLIS 1990, LINDSKOUG 1992, PLANK ET AL. 2000), was durchaus kritisch zu bewerten ist:

„Although the general characteristics of Reference Man were not intended to predict any particular individual or class of individuals, their use has been extended for this purpose in recent years, especially with the resurgent clinical interest in body composition assessment.“ (ELLIS 1990, S. 386).

Beispielsweise findet sich bei SHEPHARD (1991, S. 108-114, 162f) eine Zusammenstellung verschiedener Ansätze zur Berechnung der Knochenmasse auf der Grundlage nicht-invasiver Methoden. Für das CT findet sich bei WEGENER (1992, S. 90-92) eine kurze Betrachtung.

Auch bei den indirekten Methoden weisen vor allem die älteren Studien eine ungenügende statistische Grundbearbeitung auf. Bei jüngeren Arbeiten stellt dagegen die häufig geringe Individuenzahl ein Problem dar. Letzteres findet sich überwiegend in der umfangreichen Literatur zur Erforschung von altersbedingtem, normalem Knochenmasseverlust sowie Osteopenie und Osteoporose. Eine Gegenüberstellung und Bewertung invasiver und nicht-invasiver Methoden vor allem für die Osteoporoseforschung findet sich bei KNEISSEL (1993).

Eine ebenfalls kritische Auseinandersetzung mit nicht-invasiven Methoden und vor allem einer unsauberen Terminologie bezüglich des Begriffs Knochendichte findet sich wiederholt bei SEEMAN (1997, 1998, 2001a). Dabei handelt es sich nicht um eine akademische Auseinandersetzung. Vielmehr wirkt sich eine unscharfe Terminologie hemmend auf Erkenntniszugewinn aus, wie nachfolgend schlaglichtartig gezeigt werden soll.

Die Knochendichte setzt die beiden Merkmale Masse und Volumen auf der Organebene oder Skelettebene, seltener der Gewebeebene (vgl. Kap. II 4.1) zueinander in Beziehung. Dabei lassen sich die Knochen- bzw. Skelettmasse, bzw. Mineral- oder Kalziumanteil je nach Methode relativ genau bestimmen. Demgegenüber ergeben sich bei der Bestimmung des Volumens methodisch bedingt große Unterschiede. Denn für Knochen, als ein komplexes dreidimensionales Gebilde, kann die heterogene Binnenstruktur kaum adäquat erfasst werden. Bei den indirekten Verfahren stellt schon die Bestimmung der Tiefendimension regelmäßig ein nicht zu unterschätzendes Problem dar. So werden sehr häufig die ermittelten Werte zu einem mehr oder weniger geeigneten Referenzwert (z. B. ‚Standard-' oder ‚Referenz-Mann') in Beziehung gesetzt und die Ergebnisse anschließend interpretiert. Für die nicht-invasiven Methoden, z. B. der Knochendensitometrie, entspricht dies letztendlich einer Reduktion eines drei- auf einen zweidimensionalen Körper. Das Ergebnis ist eine ‚Dichte' als ein Verhältnis von Masse und Fläche (g/cm²). An dieser Stelle setzt auch die Kritik von SEEMAN (1997, 1998, 2001a) an. Er unterscheidet streng zwischen scheinbarer und wirklicher Dichte.

Denn wenn das Volumen bestimmt wird, kann es auf verschiedenste räumliche Gegebenheiten des Knochens Bezug nehmen. Dennoch werden diese unterschiedlichen Knochenvolumina häufig als gleichwertig betrachtet. Dieses Vorgehen ist aber im höchsten Maße problematisch. Folgende Volumina lassen sich unterscheiden:

(1) Das Gesamtvolumen V_T, welches sich aus der äußeren Form des Knochen ergibt, ohne Berücksichtigung des makroskopisch bestimmbaren Volumens der Markhöhle V_M und dem Volumen aller mikroskopischen Hohlräume V_L, wie der Volkmannschen und Havers'schen Kanäle sowie der Leerräume im Gewebe, die bei der Knochenumbildung regelmäßig (z. B. ‚wurstförmige' Osteone) entstehen

(2) Das Kompaktavolumen V_C, als Differenz aus Gesamtvolumen V_T und dem Markhöhlenvolumen V_M, ohne Berücksichtigung der mikroskopischen Leerräume V_L

(3) Das Gewebe- oder Knochenmassevolumen V_G, als Differenz aus dem Gesamtvolumen V_T und der Summe aller makro- und mikroskopischen Hohlräume (V_M und V_L).

Es wird deutlich, das die drei Volumina V_T, V_C, und V_G *nicht* gleichwertig sind. Es muss zwischen ihnen deutlich differenziert werden. Porosität als Verhältnis V_L/V_G, Mineralisierungsgrad, aber auch der (reale) Anteil von Knochengewebe werden bei diesen drei Volumina in unterschiedlicher Weise berücksichtigt. Da die bestimmbare Knochenmasse zu einem konkreten Zeitpunkt aber jeweils gleich groß ist, kommt es zwangsläufig zu unterschiedlichen Berechnungen und Interpretationen der Dichte, ihrer Entwicklung und ihren Abhängigkeiten vom Lebensalter oder auch von Geschlecht und Rasse (z. B. bei SEEMAN 2001a).

Gerade die Bestimmung der Hohl- oder Leerräume im Knochen stellt sowohl bei den direkten wie indirekten Methoden das Hauptproblem bei der Volumenbestimmung dar. Aber gerade an diesen Übergängen von Hohlräumen und Knochen, an den Knochenoberflächen, findet Knochenabbau und -aufbau statt. Nach den Überlegungen zur Knochenbildung und vor allem -umbildung (siehe Kap. II 4) stellen sich in der periostalen, (intra)kortikalen, endostalen und trabekularen Knochenschicht unterschiedliche Gleichgewichte zwischen Knochenabbau und -aufbau ein. Diese vier Schichten tragen voneinander völlig unabhängig zum Nettogewinn bzw. -verlust an Knochen- bzw. Skelettmasse bei. Unter diesem Blickwinkel ist die Verwendung des Gesamtknochenvolumens V_T als Bezugsgröße kritisch zu betrachten, findet sich aber in der Literatur vor allem bei der Anwendung indirekter Methoden zur Knochen- bzw. Skelettmassebestimmung immer wieder. In jüngster Zeit erfuhr gerade die differenzierte Betrachtung der einzelnen Gewebeschichten besonders im Rahmen der Osteoporoseforschung erneute Aufmerksamkeit (GARN 1970, RECKER ET AL. 2003, SEEMAN 2001b, AHLBORG ET AL. 2003).

Alle Angaben zur Dichte auf der Grundlage des Gesamtvolumens oder des Kompaktavolumens des Knochens können im Sinne von SEEMAN (1997) nur als ‚scheinbare' (‚*apparent*') Knochendichte d_{Organ} bezeichnet werden, wobei die Bezugnahme auf das Gesamtvolumen V_T überhaupt vermieden werden sollte. Aber auch bei Bezugnahme auf das Kompaktavolumen V_C kann nicht unterschieden werden, ob eine Veränderung in der Dichte auf eine Veränderung der Masse oder des Volumens zurückzuführen ist. Bei diesen beiden Dichten handelt es sich eigentlich nicht um ‚die' Dichte, sondern um einen durchschnittlichen Anteil von Knochen im vorhandenen Volumen. Allein durch die Bestimmung des Gewebe- oder Knochenmassevolumens V_G kann der physikalische Parameter Dichte berechnet werden. Diese Dichte wird hier als Gewebedichte d_{Gewebe} bezeichnet und entspricht der ‚wirklichen Dichte' (‚*true density*') von SEEMAN. Die nachfolgende Zusammenstellung

in Abbildung 6 gibt einen Überblick über die verwendeten Parameter und Begriffe. Aber bereits PARFITT (1991) hatte zwischen wahrer und scheinbarer Knochendichte unterschieden und schrieb:

„The distinction between apparent bone density and true bone density unterlies the paradox that with increasing age the density of the *bones* declines, but the density of *bone* shows little change and may even increase as a consequence of increasing bone age." (PARFITT 11991, S. 775).

Knochenmasse: $\mathbf{m}$

Knochen-volumen: $\mathbf{V_G = V_T - V_M - V_L = V_C - V_L}$

V_G Volumen des Knochengewebes
V_T Volumen des gesamten Knochens
V_M Volumen der Markhöhle
V_L Volumen der Leerräume
V_C Kompaktavolumen

Porosität: $\mathbf{p = V_L / V_G}$ $\quad \mathbf{V_G = V_L / p = (V_T - V_M - V_G) / p}$

Dichte:

$$\mathbf{d = m / V_G}$$

$$\mathbf{d = m \times p / (V_T - V_M - V_G)}$$

$$\mathbf{d = m / (V_T - V_M - V_L)}$$

scheinbare „Dichte" des Knochens	scheinbare Dichte des Knochens	wirkliche Dichte des vorhandenen Gewebes
d_{Organ}	d_{Organ}	d_{Gewebe}
apparent density*		true density
durchschnittlicher Knochenanteil im vorgegebenen Volumen		Dichte als physikalische Größe

Abbildung 6: Zusammenstellung der für die Bestimmung der Dichte am Knochen zu erhebenden Parameter und Beurteilung der unterschiedlichen Definitionen der Knochendichte.
* SEEMAN (1997): vaBD, volumetric apparent bone density in g/cm³, aaBD, areal apparent bone density in g/cm².

Anhand einiger Arbeiten soll hier die Bedeutung einer klaren und eindeutigen Begrifflichkeit dargelegt werden, wobei die Auswahl der zitierten Arbeiten in Vorbereitung auf die nachfolgende Modellierung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ zu verstehen ist (Kap. IV 2, IV3.3, VI 2.3 bis VI 2.5).

In ihrer Arbeit von 1958 bestimmten BROMAN ET AL. für 20 Femora das Knochenvolumen mit verschiedenen Methoden. Sie ermittelten das Gesamtknochenvolumen, indem sie den Knochen in ein mit Hirse gefüllten Meßbehälter gaben. Gleichzeitig bestimmten sie das Gewebevolumen desselben Knochens, nachdem sie diesen in eine Unterdruckkammer gegeben hatten („Heraussaugen" der Luft aus den Hohlräumen) und nach einer zwölfstündigen Wässerung anschließend das Archimedische Prinzip anwendeten (Gewicht nach „Wässerung" - Gewicht an der Luft = Volumen (in cm³)). Danach erreicht das Gewebevolumen V_G (156,8 cm³) gerade 31 % des Gesamtvolumens V_T (506,5 cm³). Obwohl BROMAN ET AL. erkannten, dass die Dichte auf Grundlage von V_T nicht der physikalischen Dichte des Gewebes entspricht, wählten sie diese für weiterführende Untersuchungen – aus Gründen der einfacheren Handhabung (!) und ohne Angabe, wie V_T und V_G miteinander korrelieren. Sie untersuchten den Einfluss von Geschlecht, Rasse (‚*American Negros*', ‚*Whites*') und Skelettelement (Vertebra, Femur) auf die Knochendichte. Zwar berücksichtigten sie in ihrer Analyse die unterschiedliche Altersstruktur in den einzelnen Gruppen, aber keine Größen- und Robustizitätsunterschiede der Knochen. Sie fanden einen Unterschied in der Dichte zwischen den Vertebrae und Femora sowie zwischen den Gruppen der ‚American Negros' und ‚Whites'. Obwohl sie selbst dieses Ergebnis wegen des geringen Stichprobenumfanges relativierten, wird diese Arbeit immer wieder als Beleg einer rasseabhängigen Knochendichte in der Literatur zitiert.

Bereits 1957 zeigten jedoch BAKER UND NEWMAN in ihrer Studie, dass sich bei Bestimmung des Volumens V_G (durch Wasserverdrängung) kein Unterschied zwischen Weißen und Negriden bei der Gewebedichte ergibt (siehe Tab. 5, amerikanische Soldaten aus dem Koreakrieg). GARN (1970) übernahm diese Dichte unter der Annahme einer ausreichenden Unabhängigkeit von Alter, Geschlecht und Rasse in sein Modell zur Skelettmassebestimmung (Kap. IV 2, IV 3.3 und VI 2.2.2).

Tabelle 5: Berechnung der Knochendichte für das *rechte* Femur nach Daten von BAKER UND NEWMAN (1957)

Rasse	Individuenzahl n	Alter [Jahren]		maximale Länge [mm]		Volumen [cm³]		Masse [g]		Dichte [g/cm³]
		MW	s	MW	s	MW	s	MW	s	
negrid	19	26,5	3,4	476	23	410	77	420	41	1,024
europid	80	25,4	6,0	470	24	398	88	409	60	1,028

Eine vom Lebensalter unabhängige Knochendichte (GARN 1970) kann dennoch nur als eine modellhafte Annäherung an die Knochenbiologie verstanden werden. Das verdeutlichen nicht zuletzt die sich entsprechend dem Lebenszyklus ändernden biomechanischen Eigenschaften des Knochens. Durch eine zunehmende Mineralisierung des Knochengewebes im Interzellularraum mit steigendem Lebensalter wird Knochen in seiner Mikrostruktur dichter und auch spröder und damit anfälliger für Ermüdungsbrüche (PARFITT 1991). Gleichzeitig kommt es aber durch Umbildungsprozesse zur ständigen Neubildung von Osteonen, wobei alte Havers'sche- oder auch Volkmann-Kanäle vorwiegend nicht wieder verfüllt werden (MARTIN UND BURR 1989), auch wenn die theoretische Möglichkeit besteht, dass durch ein Osteon gleich mehrere alte Hohlräume verschlossen werden (MARTIN 1985). Die Osteone werden zudem mit steigendem Lebensalter des Individuums tendenziell kleiner und es finden sich weniger Osteone pro Fläche. Dies führt zu einer zunehmenden Porosität des Knochens (intrakortikal – bis hin zu einer ‚Trabekularisierung' von Kompakta) und damit zu einer Reduktion der Knochenmasse. In einem interindividuellen Vergleich lassen sich diese theoretisch plausiblen Prozesse für den Parameter d_{Organ} kaum erfassen, dazu sind die verfügbaren Methoden nicht sensitiv genug bei der gleichzeitig bestehenden großen interindividuellen Variabilität.

TROTTER UND PETERSON (1962) bestimmten für trockene, fettfreie Skelettelemente den prozentualen Ascheanteil an der Knochenmasse und verglichen ihre Ergebnisse mit denen zur Knochendichte auf der Grundlage des Gesamtvolumens V_T aus der Studie von BROWMAN ET AL. (1958). Aus diesem Vergleich schlussfolgerten TROTTER UND PETERSON:

„Density and percentage ash weight are measurements of two quite different features; density indicates the weight of the bone in relation to its size, and percentage ash weight of the inorganic substance of the bone in relation to its weight. The finding that density was related to age, whereas percentage ash weight was not, suggests that reduction in the total bone mass and decrease in the ratio of inorganic to organic substance in bone are not necessarily concomitant processes. However, the fact that the means of these two measurements decreased in the same order in the ten bone series may indicate that bones of the skeleton which are less dense (those with a greater proportion of cancellous to compact substance) are the first to show a reduction in percentage ash weigt." (S. 679).

Zu entsprechenden Ergebnissen kommen auch TROTTER UND HIXON (1974), die zusätzlich noch einen Unterschied zwischen negriden und weißen US-Amerikanern fanden. Diesen Ergebnissen muss widersprochen werden. Denn die Knochendichte wurde für das Gesamtknochenvolumen V_T bestimmt. Bei erwachsenen Individuen ist dieses annähernd konstant oder nimmt sogar durch eine (ständige) Zunahme von Knochengewebe (vorwiegend) an der Periostalschicht zu, während die zwei Volumina V_G und V_C durch eine

Zunahme der Leerräume V_L im Knochen und vor allem durch die Expansion des Markhöhlenvolumens V_M durch einen Abbau an der Endostalschicht abnehmen. Da die Knochenmasse zu einem bestimmten Zeitpunkt aber individuell feststeht, ergeben sich allein durch die Erhebung eines anderen Volumens veränderte Dichtewerte (siehe hier BROMAN ET AL. 1958). Somit sind Studien zur Dichteentwicklung eines Knochens auf Grundlage des Gesamtknochenvolumen V_T und Studien zur Entwicklung des prozentualen Ascheanteils am Knochen auf Grundlage des Gewebevolumens V_G untereinander nicht vergleichbar. Es darf nicht – wie durch TROTTER UND PETERSON (1962) geschehen – die altersbedingte Abnahme der Knochendichte bei annähernd konstantem V_T und alterskonstantem Ascheanteil als Abnahme des organischen Bestandteils des Knochens interpretiert werden. Und es kann auf keinen Fall auf eine unterschiedliche Entwicklung der anorganischen und organischen Bestandteile des Knochens auf Grundlage dieser Arbeiten geschlossen werden.

Mit diesen Beispielen sollten die Grenzen der nicht-invasiven und/oder indirekten Methoden verdeutlicht werden: Knochen als Gewebe und Knochen als Organ sowie das Gesamtskelett folgen verschiedenen Regulationsmechanismen und es kann nicht beliebig zwischen diesen hin- und hergewechselt werden. Diese Regulationsmechanismen stehen in engem Zusammenhang mit den Hierarchie-Ebenen im Knochen (Kap II 4.1) und lassen sich über Knochenmerkmale der Gewebe-, Organ- oder Skelettebene erfassen. Zu diesen Merkmalen gehören auch die zur Berechnung der Knochendichte verwendeten Volumina V_T, V_C und V_G. Jedes dieser Volumina oder auch die Skelettmasse allein beschreiben für sich durchaus interpretierbar die Dichte- und/oder Masseentwicklung im Knochen oder Skelett. Doch können Ergebnisse auf der Grundlage des Gesamtknochenvolumens nicht zur Erklärung der Eigenschaften des Knochens als Gewebe herangezogen werden, auch wenn dies in der Literatur – wie hier dargelegt – immer wieder erfolgt. Veränderungen in d_{Organ} beruhen nicht zwangsläufig auf Veränderungen in d_{Gewebe} und es darf schon gar nicht auf dieser Grundlage auf eine veränderte Zusammensetzung des Knochens als Gewebe geschlossen werden. Ausführungen zu den modernen Verfahren der Bestimmung der Mineral-Dichte im Knochen (Bone mineral density, BMD) mit einer kritischen Wertung aktueller Literatur in Bezug auf Geschlechts- und Rasseunterschiede findet sich bei SEEMAN (2001a, b). Als Fazit kann, mit Ausnahme für die dreidimensionale CT, für alle nicht-invasiven Methoden mit SEEMAN (2003a) gesagt werden:

> „Measurement of bone mineral density was a good beginning, but the dual photons of the bone densitometer are blind to the three-dimensional world of bone and the behavior of the cells that fashion and refashion its dimension, architecture, and strength." (S. 323).

II 5.4 Die Einflussgrößen auf die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ und die Umbaurate

II 5.4.1 Einführung

Die Umbaurate für Knochen kann methodisch bedingt nur an relativ kleinen Gewebeproben im Verhältnis zu einem Knochen oder gar dem Gesamtskelett bestimmt werden und zwar unabhängig davon, ob es sich um Biopsie-Präparate oder Skelettmaterial aus historischen und anatomischen Sammlungen oder Sektionsmaterial handelt. Und diese können nur bedingt als pars pro toto sowohl für den jeweiligen Knochen bzw. für den Gewebetyp oder für das Gesamtskelett angesehen werden. Im Gegensatz dazu kann, wie in Kapitel II 5.3 bereits dargelegt, die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ mit Hilfe verschiedener Methoden beschrieben werden, wobei im Rahmen dieser Arbeit das direkte Auswiegen des gesamten Skelettes als Methode der Wahl gelten muss. Dennoch ist diese Methode nach Abschluss der Skelettreifung in der Mitte des 3. Ljz. für die nachfolgenden geringeren Masseveränderungen kaum mehr sensitiv genug, um diese für kurze Zeiträume (angestrebt wurde ein Jahr) im interindividuellen Vergleich erfassen zu können (Kap. IV 2).

Als „Grundwissen“ zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ lassen sich folgende vier Punkte aus der Literatur benennen, ohne dass auf einen bestimmten Autor verwiesen werden muss:

(1) Die Skelettmasse nimmt von ca. der 10. Schwangerschaftswoche (dem Auftreten erster Knochenkerne) bis zum 3. Ljz. zu

(2) Spätestens mit dem (prä)puberalen Wachstumsschub bei den Jungen ab dem 12. bis 14. Lj. steigt die durchschnittliche Skelettmasse der Männer über den Durchschnitt der Frauen und ist ab dann deutlich höher

(3) Bis zum Erreichen der maximalen Skelettmasse sind in den Knochen gleichzeitig und sich überlagernd Wachstums-, Modellierungs- und Umbauprozesse zu beobachten, die unterschiedlich zur Netto-Skelettmasse beitragen. Nach Erreichen der Skelettreife im 3. Ljz. finden in gesundem Knochengewebe nur noch Modellierungs- und Umbauprozesse statt

(4) Nach einer stabilen Phase über einige Jahre mit variabler, individueller Länge nimmt die Skelettmasse bei beiden Geschlechtern ab, wobei mit zunehmendem Alter und besonders in der postreproduktiven Lebensphase eine beschleunigte Massereduktion zu verzeichnen ist. Dabei ist der Verlust bei Männern bzw. in der Kompakta jeweils geringer als bei Frauen bzw. in der Spongiosa. Bei Frauen kann dieser Verlust bis zu 60 % des erreichten Maximalgewichts betragen. Allerdings sind die quantitativen Angaben bei den verschiedenen Autoren und je nach verwendeter Methode sehr unterschiedlich.

Es finden sich in der Literatur jedoch an entsprechender Stelle oft Verweise auf Arbeiten von GARN und Co-Autoren bzw. TROTTER und Co-Autoren (z. B. ROCHE 1978, FORBES 1987). Als Grund kann wohl angeführt werden, dass durch diese Arbeiten eine über eine qualitative Benennung hinausgehende erste Quantifzierung der Prozesse vorgenommen wurde.

Über die Arbeitsgruppe um Mildred TROTTER fand neben den Einflussgrößen Alter, Geschlecht und Skelettregion auch die Annahme einer Rasseabhängigkeit der Skelettmasse Eingang in die Literatur. Negride haben danach ein um 20 % schwereres Skelett als Europide und deren Skelettmasse ist gegenüber Mongoliden ebenfalls um ca. 20 bis 25 % erhöht (z. B. so bei PARFITT 1991, FROST 1990c). Mit der Beurteilung dieser Einflussgröße wurde zusätzlich und in Wechselwirkung mit dieser die Bedeutung sozioökonomischer Faktoren für die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ kontrovers diskutiert und findet sich in entsprechender Weise – neben dem Unterschied zwischen Kompakta und Spongiosa – auch für die Umbaurate. Entsprechend werden die Einflussgrößen Geschlecht, Alter mit Gewebealter, Konstitution (Skelettproportionen) und Skelettregion, Rasse/geographische Herkunft und sozioökonomische Faktoren hier vorrangig für die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ und weniger für die Umbaurate beurteilt.

II 5.4.2 Der Einfluss des Geschlechts

Die Differenzierung in beide Geschlechter steht im Ergebnis eines langen evolutiven Prozesses. Sie ist an den lebenserhaltenden Prozess der Fortpflanzung gebunden. Die Entwicklung verläuft in beiden Geschlechtern mit unterschiedlichem Tempo und zeigt somit nicht nur quantitative sondern auch qualitative Unterschiede. Die Entwicklung innerhalb des weiblichen und innerhalb des männlichen Geschlechts ist in wesentlichen Zügen genetisch vorprogrammiert und wird durch Wachstums- und Sexualhormone gesteuert. Als deutliche Einschnitte sind die Pubertät einerseits und andererseits die Menopause bei den Frauen sowie die später und nicht mit so gravierenden Einschnitten begleitete Andropause bei den Männern zu nennen.

In der Literatur dominiert die Auffassung einer vom Geschlecht abhängigen Skelettentwicklung und Skelettmasse. So versuchte GARN bereits in den 60er Jahren über vielfältige Korrelationen der Skelettmasse verwandter Individuen, z. B. bei ein- und zweieiigen Zwillingen, bei Schwester-Schwester-, Bruder-Schwester- bzw. Vater-Tochter-Beziehungen, einen Hinweis auf einen genetischen Zusammenhang zu erfassen. Dabei konnten deutliche Hinweise auf eine geschlechtschromosomale, vorrangig X-chromosomale, und nicht autosomale Vererbung gewonnen werden (GARN UND WAGNER 1969). Diese Annahme findet eine indirekte Bestätigung durch die konstant höhere, durchschnittliche Skelettmasse ab dem 12. bis 14. Lj. bei den Männern im Vergleich zu der Skelettmasse bei den Frauen (bei GARN 1970 tendenziell schon ab dem 2. Lj.). Das längere präpuberale Wachstum bei den Jungen, verbunden mit einem schnelleren und länger anhaltenden puberalen Wachstum führt dazu, dass Jungen im Verhältnis zu Mädchen z. B. längere Beine und breitere Schultern haben, was zu einem wesentlichen Anteil den Unterschied in der Gesamtskelettmasse erklären kann (siehe auch Kap. II 5.4.3 und II 5.4.5). Bereits ANDERSON UND GREEN (1948) konnten in ihrer sehr modern wirkenden Arbeit anhand des Längenwachstums von Femur und Tibia, den massereichsten Knochen des postkranialen Skelettes, einen deutlichen Geschlechtsunterschied nachweisen, der ab dem 13. Lj. erkennbar wurde, wobei sie nachdrücklich zwischen chronologischem und biologischem Alter unterschieden. Zu entsprechenden Aussagen kommen auch Autoren unter der Verwendung nicht-invasiver Techniken. Exemplarisch können hier NELSON UND BARONDESS (1997) und NELSON ET AL. (1997) zitiert werden. Sie fanden in ihren Studien für präpuberale Kinder keine Geschlechtsunterschiede bei der Mineral-Dichte des Knochens (BMD - Bone Mineral Density), also d_{Organ}. In einem Vergleich ihres Ergebnisses mit anderen Arbeiten und unter der Prämisse, dass sich diese Unterschiede erst mit der Pubertät ausprägen, kamen sie zu nachfolgendem Ergebnis:

„The foregoing review of various studies suggests that the timing and magnitude of gender differences in the accumulation of bone mass vary with technique, unit of measure, and site measured." (NELSON ET AL. 1997, S. 77).

Insgesamt lässt sich beim Menschen ein relativ großer Sexualdimorphismus vielfältig, z. B. anthropologisch-metrisch, physisch und psychisch belegen und findet sich in allen Bevölkerungen in relativ gleicher Ausprägung (HALL 1982). Der Sexualdimorphismus (SDM, bzw. prozentual %SDM) kann theoretisch für jeden beliebigen (anthropometrischen) Parameter berechnet werden als Quotient aus dem Messwert (Mittelwert oder Median) für

die Männer und dem für die Frauen minus 1 (Formel 7). Angaben in Prozent sind ebenfalls üblich. Werte > 0 oder > 0 % zeigen an, dass Männer für diesen Parameter größere Messwerte aufweisen. Werte < 0 oder < 0 % zeigen dagegen, dass für Frauen größere Messwerte vorlagen. Allerdings ist die Größe des Wertes für den SDM nicht so einfach zu interpretieren. Denn bei der gegebenen Definition geht man von einer Dominanz des männlichen Geschlechts aus. Bei Einhaltung dieser Tendenz erfährt der Wert eine im ‚Alltag' übliche Interpretation: Zeigen Männer z. B. in Bezug auf einen untersuchten Parameter doppelt so große Messwerte, ergibt sich ein SDM von 1,0 bzw. 100 %; sind dagegen die Messwerte der Frauen in Bezug auf diesen Parameter doppelt so groß, ergibt sich ein SDM von ‚nur' –0,5 bzw. -50 %.

Formel 7: $\mathbf{\%Sexualdimorphismus\ (\%SDM) = ((Wert_{Männer} / Wert_{Frauen}) - 1{,}0) \times 100\ \%}$

Der %SDM lässt sich auch für die Skelettmasse nachweisen, was sowohl ihre Massezunahme bis zum 3. Ljz. als auch ihre Reduktion vor allem nach Abschluss der reproduktiven Lebensphase betrifft. Dabei ist ein Unterschied zwischen großen, kompaktareichen und kleinen, spongiosareichen Knochen zu verzeichnen (PARFITT 1991): Zum Beispiel ist der %SDM bezüglich der erreichten maximalen Knochenmasse für das Femur größer als bei Rippen und Wirbeln, dagegen ist der %SDM für den späteren Masseverlust bei den kleinen Knochen größer als bei den großen. Weiterhin bestimmten GARN ET AL. (1976) den %SDM für 4379 weiße und 1589 schwarze US-Amerikaner im Alter zwischen 20 und 55 Jahre für die räumliche Verteilung der Knochenmasse (Gesamtknochen-, Markhöhlen- und Kompaktafläche beim Metacarpus II (MC II); zur Berechnung der Flächen siehe hier Kap. VI 2.2.2, Tab. 62). Der %SDM lag zwischen 28,4 % und 65,4 % (Tab. 6) und bedeutet, dass in dieser umfangreichen Untersuchung Männer um 28,4 % bis 65,4 % größere Flächen als Frauen beim MC II aufweisen (Kap. VI 2.2.3).

Tabelle 6: %Sexualdimorphismus (%SDM) für erwachsene (20 bis 55jährige) ‚Weiße' und ‚Schwarze' anhand von Durchschnittwerten für die Gesamtknochen-, Markhöhlen- und Kompaktafläche nach GARN ET AL. (1972, tnl. 1 P. 128; %SDM neu berechnet anhand der angegebenen Durchschnittswerte, vgl. hier Kap. VI 2.2.2, Tab. 62 zur Berechnung der Knochenflächen).

	‚Weiße'		‚Schwarze'		%SDM	
	Männer	Frauen	Männer	Frauen	Weiße	Schwarze
Parameter	n = 1654	n = 2725	n = 401	n = 1188	n = 4379	n = 1589
Gesamtknochenfläche f_T in mm²	69,56	50,69	74,44	57,05	37,2	30,5
Markhöhlenfläche f_M in mm²	10,50	6,32	13,29	9,43	65,4	40,9
Kompaktafläche f_C in mm²	59,06	44,36	61,15	47,63	33,1	28,4

Damit unterstützt dieses Ergebnis auch die Erkenntnisse zur Biomechanik des Knochens, wonach das geringere Frakturrisiko bei den Männern neben der höheren Skelettmasse vor allem auf den größeren Abstand der vorhandenen Masse von der neutralen Achse des Knochens zurückzuführen ist (siehe Kap. II 4.3). Diese Arbeit zeigt auch, mit welchen Unterschieden für die Knochendichte d_{Organ} auf dem Organniveau gerechnet werden muss (SEEMAN 2001a, b): Denn das ‚Weniger' an Knochenmasse (hier Kompaktafläche f_C) bei den Frauen kann bei der Reduktion des dreidimensionalen Knochens auf zwei Dimensionen nicht adäquat interpretiert werden. Vorallem kann das geschlechtsspezifische Verhältnis von Gesamtknochen- zur Markhöhlenfläche überhaupt nicht berücksichtigt werden. Die Unterschiede in d_{organ} werden nachfolgend noch verstärkt durch die bei den Frauen um bis zu 10 Jahre früher als bei den Männern einsetzende Reduktion der Knochenmasse. Diese Reduktion ergibt sich vorallem aus der unterschiedlichen relativen Drift der Knochen an der endostalen und periostalen Knochenoberfläche durch die umgebenden Gewebe. Bezugnehmend auf die Arbeit von GARN (1970) wurde dies von SEEMAN zusammengefasst in seinem entsprechend lautenden Artikel von 2001(b): *„During aging men lose less bone than women because they gain more periosteal bone, not because they resorb less endosteal bone"* (vgl. auch DUAN ET AL. 2001a, b, SEEMAN 2003b). Bereits in den 70er Jahren ließ sich jedoch schon anhand von archäologischen Studien, also anhand nicht sehr sensitiver Methoden, ein entsprechender Geschlechtsunterschied bei der periostalen Apposition von Knochenmasse feststellen, beispielhaft seien hier die Arbeiten von CARLSON ET AL. (1976) und MARTIN UND ARMELAGOS (1979) genannt. Durch die hier in Kapitel VI 2.2.3 erneut vorgenommene Auswertung der Daten von GARN (1970) lässt sich dieser Zusammenhang allerdings nur unterstützen, wenn die Aussage auf die maximale Skelettmasse bezogen wird und nicht auf die Vorgänge, die ab dem 50. Lj. zu beobachten sind. Denn spätestens ab dem Senium kann bei Frauen eine deutliche periostale Drift beobachtet werden, die der Knochenmasse-Reduktion kompensatorisch entgegenwirkt (vgl. Kap. II 5.5.1). Daraus lässt sich erklären, warum trotz deutlicher Reduktion der Knochenmasse selbst bei Frauen eine Zunahme der Biegefestigkeit des verbleibenden Knochens bis zu 30 % im spätmaturen bis senilen Lebensalter zu beobachten ist (AHLBORG ET AL. 2003). Denn diese geringere Masse wird durch die Drift weiter weg von der neutralen Achse des Knochens angeordnet.

Bei der Beurteilung der Knochendichte auf dem Gewebeniveau d_{Gewebe} ist dagegen keine Abhängigkeit vom Geschlecht zu erwarten (vgl. Kap. II 5.3.1).

II 5.4.3 Der Einfluss des Alters

Für die vorliegende Arbeit besitzt Zeit oder ‚Alter' in sehr unterschiedlichen Definitionen eine herausragende Bedeutung. Im Gegensatz zu dem Ziel dieser Arbeit, das ‚historische' Alter eines Skelettfundes durch die Ermittlung der Liegezeit, also dem Intervall zwischen Todeszeitpunkt und Untersuchungs- bzw. Betrachtungszeitpunkt, mit Hilfe von ^{14}C zu beurteilen, wird in diesem Kapitel die Bedeutung des Alters des Individuums auf die Entwicklung der Skelettmasse erörtert. Denn im Alter ist neben dem Geschlecht die bestimmende Einflussgröße auf die Knochenfestigkeit, -masse und -architektur zu sehen (RECKER ET AL. 2003). Als wichtige altersabhängige Entwicklungseinschnitte eines jeden Menschen sind dabei der Abschluss von Pubertät und Menopause bzw. Andropause mit ihren vielfältigen und nachhaltigen Auswirkungen auch auf die Skelettmasse zu nennen.

Das Lebens- oder Sterbealter beschreibt die Dauer der Wechselwirkung eines Individuums mit seiner Umwelt. Dieses im chronologischen Sinn exakt zu bestimmen, gelingt nur über die Messung mit Hilfe kalendarischer Instrumente. Besteht diese Möglichkeit nicht, weil kulturell bedingt dazu keine Notwendigkeit gesehen wird, oder der Mensch kein Interesse daran hat, sein Alter anzugeben, oder weil es sich um einen nicht identifizierten Leichen- oder Skelettfund handelt, kann es nur anhand biologischer Prozesse erfasst werden. Die Möglichkeit dazu besteht, weil im Rahmen der ontogenetischen Entwicklung eines jeden Menschen bestimmte Wachstums-, Reifungs- und Entwicklungsprozesse in einer genetisch vorprogrammierten Reihenfolge ablaufen. Je geringer die interindividuelle Variabilität eines untersuchten Prozesses ist, um so deutlicher ist der Zusammenhang von chronologischem und biologischem Alter. Eine erschöpfende Diskussion dieser Übereinstimmung würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Vielmehr sollen nachfolgend schlaglichtartig einige im Rahmen dieser Arbeit interessierende Aspekte benannt werden.

Die Übereinstimmung von chronologischem und biologischem Alter ist zum Einen vom Bezug, z. B. Zähne, Knochen, Psyche, und von der Methode, z. B. makro- und mikroskopische Inspektion, biochemische Analyse, und zum Anderen vom Geschlecht, aber auch vom Alter des Menschen abhängig. Letzterer Zusammenhang lässt sich gut anhand der schon als klassisch zu bezeichnenden Methoden der Osteologie verdeutlichen („Empfehlungen ..." aus dem Jahr 1979 bzw. in aktualisierter und für die forensische Arbeit konkretisierter Form aus dem Jahr 2005):

- Innerhalb der ersten 6 Lj. (infans I) steigt die Variabilität bei der Altersbestimmung unabhängig vom Geschlecht von wenigen Monaten bei der Geburt auf durchschnittlich ± 2 Jahre
- Während der nächsten 6 Lj. (infans II) steigt die Variabilität bei der Altersbestimmung auf ± 3 Jahre und das Geschlecht gewinnt zunehmend an Bedeutung, indem Mädchen bestimmte Reifezeichen früher zeigen und bei Knochenmaßen geringfügig niedrigere Werte zeigen
- Spätestens ab dem 12. Lj. (juvenil bis senil) ist eine Geschlechtsbestimmung vor einer Altersbestimmung zwingend notwendig. Mädchen zeigen Reifezeichen deutlich und z. T. um Jahre früher als Jungen und die Knochenmaße unterscheiden sich zunehmend, wobei diese bei den Mädchen ab dem 14. Lj. fast immer deutlich geringer als bei Jungen sind. Die Variabilität steigt bei beiden Geschlechtern von mehreren Jahren auf ein(ige) Jahrzehnt(e). Dieser Variabilität kann durch die gleichzeitige Anwendung mehrerer Bestimmungsmethoden entgegengewirkt werden, bzw. tritt diese bei modernen Methoden wie Razemat oder Jahrringannulation (RÖSING UND KVAAL 1998) nicht so dramatisch in Erscheinung.

Die hohe Variabilität bei der Sterbe-/Lebensaltersbestimmung im Erwachsenenalter berührt die vorliegende Problematik – einer altersabhängigen Berechnung des ^{14}C im Knochengewebe – jedesmal dann, wenn das Sterbealter nicht bekannt ist.

Ab dem Früherwachsenenalter findet fast nur noch Knochendrift und -umbildung statt. Deren interindividuelle Variabilität mag relativ gering sein, gewinnt aber mit zunehmendem Alter des Individuums an Bedeutung. Unterschiede zwischen langsamen, normalen und schnellen „Stoffwechslern“ und das unterschiedliche altersmäßige Eintreten in die Meno- bzw. Andropause mit den damit einhergehenden Veränderungen im Stoffwechsel müssen sich auch auf die zu messende ^{14}C-Konzentration im Knochengewebe auswirken. In dieser allgemeinen Form lassen sich die, wenn im Detail auch widersprüchlichen Ergebnisse vor allem aus der Osteoporose-Forschung festhalten. Vor allem für Individuen ab dem 40./50. Lj. wird eine Bestimmung der ^{14}C-Konzentration nur dann sinnvoll möglich sein, wenn sich trotz aller Variabilität eine durchschnittliche Umbaurate für Männer bzw. Frauen bestimmen lässt. Je höher diese Rate ausfällt, um so früher haben individuelle Einflüsse aus der Wachstums- und Reifezeit keinen Einfluss mehr. Zum Beispiel wird bei einem 50jährigen Individuum und bei einer Umbaurate von jährlich 10 % – wie diese in der älteren Literatur zur Radiocarbon-Methode diskutiert wurde (Kap. II 3.2) – kaum noch ^{14}C (< 6 %) aus den ersten 20 Lj. vorhanden sein (Kap. II 5.5.3, Tab. 12).

Im Gegensatz dazu lässt sich die hohe Variabilität während der Zeit der Knochenmassebildung – und da besonders während des (prä)puberalen Wachstumsschubes – gut beschreiben. Dieser setzt bei Mädchen durchschnittlich mit 12 Jahren und bei Jungen durchschnittlich mit 14 Jahren ein, wobei für beide Geschlechter eine Variabilität von ± 2 Jahren als normal anzusehen ist. Als ‚normal' in ihrer Entwicklung werden die 94 % aller Individuen einer Alterskohorte in einem Untersuchungskollektiv aufgefasst, die zwischen dem 3. und 97. Perzentil für einen bestimmten Parameter, z. B. Körperhöhe, liegen. Dies entspricht bei einer angenommenen Normalverteilung der Einzelwerte einer Streuung von ± 1,88 Standardabweichungen um den Mittelwert. Individuen außerhalb dieses Intervalls sind in ihrer Entwicklung zumindest als auffällig zu bezeichnen. In Abbildung 7 ist die normale Variabilität in Größe und Proportion von Mädchen im Alter von 12 Jahren und Jungen im Alter von 14 Jahren auf der Grundlage anthropologischer Messdaten aus der ehemaligen DDR zu entnehmen (FLÜGEL ET AL. 1986, vgl. dazu auch MINAS UND MINAS 2004). Ein ähnlicher Vergleich findet sich auch bei KNUßMANN (1968a). Eine Variabilität von ± 2 Jahren spiegelt sich in diesem Entwicklungsabschnitt für Kinder / Jugendliche beiderlei Geschlechts auch in osteologischen (Knochenkerne) und odontologischen (Zahnstatus) Reifemerkmalen wider.

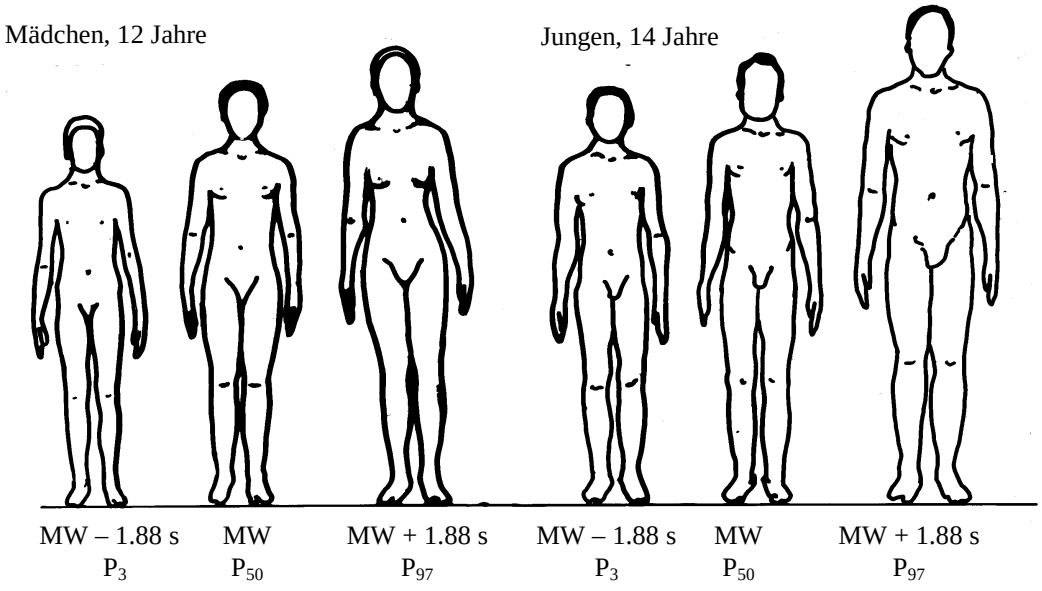


Abbildung 7: Normale Variabilität in Körperhöhe und -proportionen zum Zeitpunkt des durchschnittlichen Einsetzens des präpuberalen Wachstumspurtes (nach Maßen von FLÜGEL ET AL. 1986).
MW Mittelwert, s Standardabweichung, P Perzentile (P_{50}: Median)

Folgt man ROCHE (1978) bei seinem Vergleich des Reifestatus von Jungen im Verhältnis zu (chronologisch) gleichaltrigen Mädchen, so sind diese im Alter von 7 bis 9 Jahren im Durchschnitt um 15 Monate entwicklungsverzögert. Dieser Unterschied erhöht sich zu einem Alter von 12,5 Jahren steil ansteigend auf -35 Monate, um dann im Alter von 17,5 Jahre nur noch -3,5 Monate zu betragen.

Weiterhin ist zu beachten, dass innerhalb eines Betrachtungszeitraumes, z. B. ein Jahr, die Wachstumsprozesse nicht kontinuierlich ablaufen. Vielmehr lassen sich relativ langsame und relativ schnell ablaufende Wachstumsabschnitte unterscheiden. Die individuellen Unterschiede sind erheblich und unterliegen vielen Einflussgrößen. Zum Beispiel lässt sich ein deutlich verzögertes Wachstum vielfältig histologisch nachweisen, z. B. in den Unterbrechungslinien der Osteone oder als verdichtete Strukturen im Knochengewebe durch die hypermineralisierten bzw. Harris-Linien (Kap. II 4.4.1).

Von EVELETH UND TANNER (1990) wurden für Standard- oder Normkurven auf der Grundlage von gemischten Längs- und Querschnittsstudien mindestens 300 Individuen pro Geschlecht und Altersgruppe gefordert:

> „Standards for height, or other measurements, should ideally be constructed by using a combination of cross-sectional and longitudinal data (Tanner, 1986b). The two differ in results at puberty, because of the great variation between individuals in the time at which the adolescent growth spurt occurs. In a given individual the spurt is a marked and quite rapid affair; but when the spurts of different individuals, each occurring at different ages, are averaged then the curve becomes spread out along the age axis and its peak is lowered. For this reason no individual at adolescence actually follows the 50th centile cross-sectional type curve ... The same occurs for other anthropometric measurements, of course, and for measures such as skeletal maturity (Buckler, 1984) though for this latter there are no longitudinal-type standards.“ (S. 10).

Die vorliegende Datenbasis (Kap. IV II: GARN UND WAGNER 1969, GARN 1970, TROTTER UND PETERSON 1969a, b, 1970, TROTTER UND HIXON 1974, MERZ ET AL. 1956, GARROW ET AL. 1965, SEALE 1959, BAKER UND NEWMAN 1957, INGALLS 1931) ist weit von dieser Forderung entfernt. Aber trotz berechtigter Einwände wird nachfolgend (Kap. IV 2.2, IV 3.3, VI 2.3 bis VI 2.5) der Versuch unternommen, anhand der vorliegenden Daten die Entwicklung der Skelettmasse zu beschreiben. Denn einerseits steht auch nach intensiver Recherche kein anderes Material für diese Modellierung zur Verfügung, andererseits ist die Modellierung für diese Studie unerlässlich.

Für die Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im Knochengewebe haben weiterhin Ausführungen von PARFITT (1994b) eine Bedeutung, der während des beschleunigten Wachstums eine Zunahme der Porosität und Abnahme des Mineralisierungsgrades im neugebildeten Gewebe berichtet. BAILEY ET AL. (2000) konnten so auch ein „Zurückbleiben" des Mineralisierungsgrades hinter dem Längenwachstum bei Jungen um durchschnittlich 0,6 Jahre und bei Mädchen um durchschnittlich 0,7 Jahre beobachten. Gleichzeitig konnten sie nachweisen, dass durch Querschnitts- im Vergleich zu Längsschnittstudien der Zugewinn an Skelettmasse im Alter von 8 bis 14 Jahren um 27 bis 34 % unterschätzt wird.

Es wird außerdem zu beachten sein, dass sich retrospektiv für Erwachsene keine Aussagen über eine individuelle Entwicklungsbeschleunigung oder -hemmung im Kindes- und Jugendalter im Vergleich zum Durchschnitt ihrer Alterskohorte treffen und damit auch nicht quantifizieren lassen. Diese normale biologische Variabilität von ± 2 bis maximal ± 3 Jahre beeinflusst die Genauigkeit jeder Methode, welche zur Berechnung von Kohlenstoff im Knochen entwickelt wird. Allerdings werden die Abweichungen sehr stark variieren und davon abhängen, wie sich das einzelne Individuum bezüglich seiner Lebensdaten und dem Unterschied von chronologischem und biologischem Alter zum Maxium der ^{14}C-Kurve aus den Atombombenversuchen im Jahr 1964 einordnet. Weiterhin ist von Bedeutung, wie lange ein Individuum noch nach Erreichen seiner maximalen Skelettmasse lebt. Denn damit beeinflussen nachfolgende Umbauprozesse im Knochen und deren Variabilität zunehmend die ^{14}C-Konzentration im Gewebe aus der Wachstumsphase bis zum 3. Ljz..

Gleichzeitig erklären sich aus dem Zeitpunkt des Eintretens in die Pubertät und aus der Länge dieser Entwicklungsphase Unterschiede in der Körperhöhe und z. T. auch in den Proportionen eines Individuums. Je später der Eintritt in die Pubertät erfolgt und je länger diese dauert, um so größer wird der Mensch und um so länger sind seine Beine und um so breiter sind seine Schultern im Verhältnis zum Gesamtkörper. Dieser Zusammenhang besteht innerhalb eines Geschlechts und kann vor allem die entsprechenden morphologischen Unterschiede zwischen den Geschlechtern erklären.

Weiterhin muss noch der Zeitraum berücksichtigt werden, in dem die Daten erhoben wurden – also wann und an welchem Material eine Studie durchgeführt wurde. Vor allem ältere Skelettsammlungen (aus archäologischen Gräberfeldern, aber auch aus anatomischen Sammlungen) müssen bei vielen Merkmalen im Vergleich zu heutigen Kindern und Jugendlichen vor allem aus (Mittel)Europa als retardiert, entwicklungsverzögert, bezeichnet

werden. Die Beobachtungen einer Wachstumsbeschleunigung und der früher eintretenden Reifezeichen sowie einer deutlichen Zunahme der Körperhöhe mit einer allgemeinen Tendenz zur Verschlankung des Körperbaus sowie einer Zunahme der Beinlänge im Verhältnis zur Körperlänge in den letzten 100 bis 150 Jahren werden mit den Begriffen Akzeleration bzw. sekulärer Trend erfasst (WIERINGEN VAN 1979, für Europa: BODZSÁR UND SUSANNE 1998, SUSANNE UND BODZSÁR 1998, SUSANNE ET AL. 2001, KNUßMANN 1996, für USA: JANTZ UND JANTZ 1999). Gleichzeitig wird mit der Akzeleration auch ein verzögerter Alterungsprozess vor allem im maturen und senilen Lebensabschnitt beschrieben.

Beide Effekte, eine eher generelle Entwicklungsbeschleunigung und -modifikation im Kindes- und Jugendalter und ein Hinauszögern von Alterungsprozessen ab dem 40. Lj., zeigen sich jedoch in verschiedenen Populationen unterschiedlich stark ausgeprägt. Sie lassen sich daher ebenso wenig wie die individuelle Entwicklungsbeschleunigung oder -hemmung quantifizieren. In ihrer Gesamtheit stellen diese Effekte ein methodisch bedingtes, biologisch und forschungsgeschichtlich begründbares „Hintergrundrauschen“ dar, welches sowohl die Präzision als auch die Genauigkeit einer jeden Methode zur Liegezeitbestimmung mit Hilfe von ^{14}C für Knochengewebe beeinflusst.

II 5.4.4 Der Einfluss des Gewebealters

In konsequenter Weiterführung der Diskussion zur Übereinstimmung von chronologischem und biologischem Alter sind an dieser Stelle Überlegungen zur Übereinstimmung von chronologischem Alter und Gewebealter zwingend notwendig (vgl. histologische Sterbealtersbestimmung Kap. II 4.4.4). Diese ergeben sich nicht zuletzt aus der Tatsache, dass die Umbaurate nur an konkreten Gewebeproben bestimmt werden kann, aber auch aus der Tatsache, dass nur unter Versuchsbedingungen regelmäßig ganze Knochen oder Längs- oder Querhälften desselben zur Beprobung vorliegen. In der forensischen Routine muss vielmehr mit einem beliebigen Fragmentierungsgrad der Knochen gerechnet werden, gleichzeitig sollte soviel wie möglich vom Skelett(fragment) trotz der benötigten Probe erhalten bleiben. Durch die Entwicklung der AMS-Methode für die Bestimmung von ^{14}C steht zudem ein physikalisches Verfahren zur Verfügung, welches mit kleinsten Probenmengen auskommt (vgl. dazu hier Kap. V 1.3, VI 1.3.3, VI 1.4, VII).

Bei der Geburt sind nur bis zu 3 % der maximalen Masse vom Gesamtskelett vorhanden. Das überwiegende Knochengewebe, über 50 %, wird erst nach dem 10. Lj. gebildet (siehe Anhang 2). Im Erwachsenenknochen kann sich daher kein perinatales Gewebe mehr finden und bereits ab dem 5. Lj. ist dieses nicht oder kaum noch nachweisbar. Diese Entwicklung vollzieht sich in einem Zusammenwirken von Knochenwachstum (Längenwachstum), Knochenmodellierung (Drift) und Knochenumbildung von Primärknochen in Osteonenknochen.

Das Bildungsalter eines konkreten Gewebebereiches in Bezug zum chronologischen Alter des Individuums ist wichtig, weil sich alle weiteren Bildungs- und Umbildungsprozesse in diesem Bereich auf diesen Zeitpunkt und nicht auf die Geburt des Individuums beziehen. Je älter ein Individuum wird, um so größer kann die Differenz aus chronologischem und Gewebealter werden. Denn das Gewebealter ergibt sich als Differenz aus dem Alter des Individuums und dem Gewebebildungsalter. Der Zusammenhang zwischen Gewebealter und Längenwachstum ist einleuchtend: Je weiter entfernt proximal oder distal vom primären Ossifikationszentrum die Probe entnommen wird, um so größer ist die Differenz zwischen chronologischem bzw. biologischem Alter des Individuums und dem Gewebealter. Obwohl es sich in der Regel bei dem zu untersuchenden Gewebe um ein Fragment von einigen Zentimetern Länge handelt, wird nicht ein ‚durchschnittliches' Gewebealter angegeben, sondern die Differenz aus biologischem Alter und dem frühestmöglichen Gewebebildungsalter.

Für Langknochen kann entsprechend einer Korrelation des *Längenwachstums* von Diaphysen und chronologischem Alter nach MAAT (1984) und MARESH (1955) ein ungefährer Zeitpunkt der beginnenden Gewebebildung ermittelt und damit ein Gewebealter angegeben werden (siehe auch TAYLOR 1992, CASTANET ET AL. 1993). Der Unterschied zwischen chronologischem und Gewebealter kann bei Langknochen über 20 Jahre betragen, wenn z. B. eine Probe direkt aus der verknöcherten Metaphyse entnommen wird (vgl. Kap. V 1.3.3, VI 1.3.3).

Demgegenüber lässt sich das Gewebealter für alle (anderen) Knochen sowie dessen Beeinflussung durch das *Dickenwachstum* nur unter Laborbedingungen ermitteln. Ein Modus findet sich bei FROST (1987a) und beruht auf einem Abstandsmaß zwischen der durch floureszierende Substanzen (Tetrazykline) markierten Lamelle, der in Driftrichtung liegenden Knochenoberfläche und dem Zeitraum, der zwischen Markierung und Proben-

entnahme vergangen ist. Auf diese Weise wurde bereits das Alter der Gewebebildung für das mittlere Drittel der 6. Rippe mit 12,5 Jahren bestimmt. STOUT UND LUECK (1995) diskutierten jedoch für historisches Material eine in Bezug auf heutige Zeiten verzögerte Knochenreifung und ein deutlich erhöhtes Alter bei der Gewebebildung bei dieser Rippe von 16,5 Jahren. Diese Überlegung könnte ggf. auch heutige Gesellschaften betreffen, die in ihrer sozioökonomischen Situation diesen untersuchten historischen Bevölkerungen entsprechen. Weiterhin prägt sich die Knochendrift entsprechend der Beanspruchung eines Knochens und bei verschiedenen Knochen unterschiedlich aus, so dass FROST bereits 1987 (a) die Erstellung eines Atlanten für das Alter der Gewebebildung als Langzeitprojekt vorgschlug. Dieser Atlas liegt bis heute nicht vor.

Gleichzeitig legen Überlegungen zur Umbaurate im Knochen nahe, dass allein durch die schrittweise Ersetzung bereits vorhandenen Gewebes durch Osteonenknochen und in Abhängigkeit von der Gewebedicke in diesem eine unterschiedlich lange Periode erfasst wird. So hat Rippenkompakta ein Durchschnittsalter von 30 Jahren im Gegensatz zur Femurkompakta mit einem Durchschnittsalter von 55 Jahren (STOUT UND PAINE 1994, Kap. II 4.4.4).

In Zusammenfassung dieser Überlegungen wird deutlich, dass das Gewebealter zwar einen beschreibbaren, aber kaum berechenbaren, jedoch sehr entscheidenden Einfluss auf die Interpretation der ^{14}C-Messwerte von Knochengewebe hat. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher nur ganze Knochen oder entsprechende Äquivalente, z. B. ein in Längsrichtung halbierter oder geviertelter Langknochen oder die gesamte proximale oder distale Diaphysenhälfte, zur Beprobung vollständig aufbereitet, wobei die physiologische nicht automatisch der metrischen Mitte des Knochens entsprechen muss (Kap. II 4.2.2 V 1.3.3, MAAT 1984). Von dem aufbereiteten Knochen bzw. seinem Äquivalent kann dann eine entsprechende Probe für die eigentliche Messung entnommen werden.

II 5.4.5 Der Einfluss der Konstitution (Skelettproportionen) und Skelettregion

Unter Konstitution versteht man in der Anthropologie das relativ stabile Gefüge der körperlichen und seelischen Merkmale eines Menschen. Alle Typologien fassen eine erste Variationsreihe, die z. B. als leptomorph/pyknomorph bezeichnet wird, also die lang-

schlanken und introvertierten Menschen im Gegensatz zu den kurz-gedrungenen und extravertierten Menschen meint – um nur die wichtigsten der zahlreichen Merkmale zu nennen. Eine zweite Variationsreihe ergibt sich aus der Faktorenanalyse mit den Gegensatzpaaren groß/klein und schlank/gedrungen. Konstitution überschneidet sich vielfältig mit Geschlecht, etwas mit Alter, aber auch mit Rasse (Kap. II 5.4.6, KNUßMANN 1968b, 1996). Die körperbaulichen Merkmale der Konstitution spiegeln sich notwendiger Weise in den Skelettproportionen wider. In der Literatur findet sich keine systematische Beschreibung des Zusammenhanges von Skeletettmasse und Konstitution und nur in Ansätzen für die Merkmale Skelettproportionen und Skelettregion.

Auch wenn mit den vorgenannten Entscheidungen zur Probenentnahme und -aufbereitung der Einfluss des Gewebealters auf die Bestimmung der ^{14}C-Konzentration als gering einzustufen ist, sind nachfolgende Überlegungen zur Konstitution und den Skelettproportionen sowie der Skelettregion notwendig. Denn die Entwicklung der Skelettmasse stellt als Durchschnitt nur eine Näherung für die Entwicklung der Masse für jedes einzelne Skelettelement dar.

Zum Einen hängt die Skelettmasse mit der Größe des Individuums und seinen Körperproportionen zusammen. Lässt sich die Körperhöhe anhand von Skeletten ausreichend genau berechnen (RÖSING 1988, jedoch nicht auf Grundlage der Daten von TROTTER UND GLESER 1952, siehe dazu JANTZ ET AL. 1994), lassen sich Körperproportionen anhand von Skeletten jedoch nicht bestimmen (PORTER 2002). Und bereits INGALLS (1931) machte darauf aufmerksam, dass leichte und schwere Skelette eher kleine und große Skelette und nicht einfach leichte und schwere Knochen bedeuten, wobei das leichteste Skelett ca. 60 % und das schwerste Skelett etwa 140 % der durchschnittlichen Skelettmasse in der Serie von INGALLS erreichte. Dies gilt es bei der relativ großen Variabilität bei der Körperhöhe des Menschen durchaus zu beachten.

Zum Anderen ist jeder Knochen mit seiner Masseentwicklung im Vergleich zu einem Durchschnitt retardiert (z. B. proximale Langknochen der Extremitäten, Hüfte) oder akzeleriert (z. B. Schädel, Handskelett), wobei Beschleunigung in diesem Zusammenhang älter bedeutet. Beispielsweise ist das biologische Alter des kranialen Skelettes im Vergleich zum postkranialen Skelett höher.

Es wäre daher sinnvoll, die Masse-Entwicklung von Einzelknochen zu modellieren bzw. Unterschiede zur durchschnittlichen Entwicklung des Gesamtskeletts zu quantifizieren,

ähnlich den Versuchen, wie diese für die ^{90}Sr-Methode vorgenommen wurden (Kap. II 3.3, Tab. 1). In der Literatur werden in diesem Zusammenhang die Arbeiten von TROTTER und Co-Autoren als grundlegend eingeschätzt. Besondere Bedeutung kommt der Arbeit TROTTER UND PETERSON (1970) zu. Die Originaldaten zu dieser Arbeit wurden als NAPS Document 01083 hinterlegt. In diesem Dokument ist die Knochenmasse der Einzelknochen von insgesamt 144 Skeletten enthalten. Diese Daten müssen z. Zt. als verschollen gelten*. In der genannten Arbeit wird dagegen nur die Masse-Entwicklung des Gesamtskelettes beschrieben. Andere Arbeiten liegen nicht vor.

In einer späteren Arbeit erfolgte von TROTTER UND HIXON (1974) eine Gegenüberstellung von kranialem, postkranialem und gesamtem Skelett. Anhand dieser Daten soll die hier interessierende Problematik aufgezeigt werden. In der Stichprobe wurden insgesamt 303 Individuen in 8 Alterskohorten und nach Geschlecht und Rasse getrennt untersucht. Die Altersklassierung durch TROTTER UND HIXON erscheint eher ungewöhnlich und lässt sich am ehesten beschreiben mit: perinatal 37. bis 44. SSW, Säugling 0,0 – 0,5 Jahre, Kleinkind > 0,5 bis 3,0 Jahre, präpuberal > 3,0 bis 13,0 Jahre, puberal bis zum Wachstumsabschluss > 13,0 bis 24,0 Jahre, quasi-stabile Entwicklungsphase 25,0 bis 44,0 Jahre, Knochenabbau 45,0 bis 64,0 Jahre, verstärkter Knochenabbau > 64,0 Jahre. Die Stichprobe setzt sich aus 94 (31,0 %) männlichen und 82 (27,1 %) weiblichen Negriden sowie 62 (20,5 %) männlichen und 65 (21,5 %) weiblichen Europiden zusammen. In der Stichprobe überwiegen somit negride (n = 176, 58,1 %) bzw. männliche (n = 156, 51,5 %) Individuen.

Für jedes Individuum wurde die Masse des kranialen, postkranialen und des gesamten Skelettes bestimmt und je Alterskohorte gemittelt. Anhang 2 enthält, getrennt nach Rasse, Geschlecht und Alterskohorte, Angaben zu Individuenzahl, Druchschnittsalter, prozentualem Anteil an der jeweiligen maximalen Skelettmasse sowie dem relativen Anteil des Schädels am Gesamtskelett. In Abbildung 8 ist, basierend auf diesen Daten, die Entwicklung der Skelettmasse als relativem Anteil an der jeweils maximalen Masse, getrennt für das kraniale, postkraniale und gesamte Skelett, sowie der relative Anteil der Schädelmasse am Gesamtskelett getrennt für europide bzw. negride Männer und Frauen bis zum Abschluss des Skelettwachstums dargestellt.

* Das NAPS Document 01083 wurde durch das ASIS National Auxiliary Publications Service vorgehalten. Die Einrichtung existiert nicht mehr. Kontakte zu RR Peterson über RL Jantz erbrachten keinen Erfolg. Über die Library of Congress Washington DC waren die Originaldaten ebenfalls nicht aufzufinden. Der Verbleib der Daten ist damit unklar.

Trotz der geringen Individuenzahl und der groben und eher ungewöhnlichen Altersklassierung durch TROTTER UND HIXON (1974) wird das unterschiedliche Wachstumsverhalten von Schädel und postkranialem Skelett deutlich (Kap. II 3.3; zum Wachstum von Langknochen siehe z. B. MOSS-SALENTIJN 1992, MARIANI UND MARTIN 2003, zum Schädelwachstum ALBERIUS UND FRIEDE 1992, JURICIC ET AL. 1994, HELMS UND SCHNEIDER 2003). Der Schädel erreicht wesentlich früher höhere Reifestadien als das postkraniale Skelett. Deutlich wird weiterhin, dass das Gesamtskelett in seiner Entwicklung eher mit dem postkranialen Skelett zu vergleichen ist und dass die Masse des Schädels nicht oder nur ungenügend mit der Gesamtmasse korreliert. So entfallen während der kleinkindlichen Entwicklung ($MW_{Alter} \leq$ 2,0 Jahre) fast 50 % der gesamten Skelettmasse auf den Schädel. Dieser Anteil verringert sich bis zum Beginn des puberalen Wachstumspurtes ($MW_{Alter} \leq$ 8,2 Jahre) auf ca. 30 %, um sich dann zwischen 17 und 25 % einzustellen. Zu Beginn des puberalen Wachstumsschubes hat der Schädel bereits 37 bis 64 % seines Endgewichts erreicht, das postkraniale Skelett nur zwischen 13 bis 35 %.

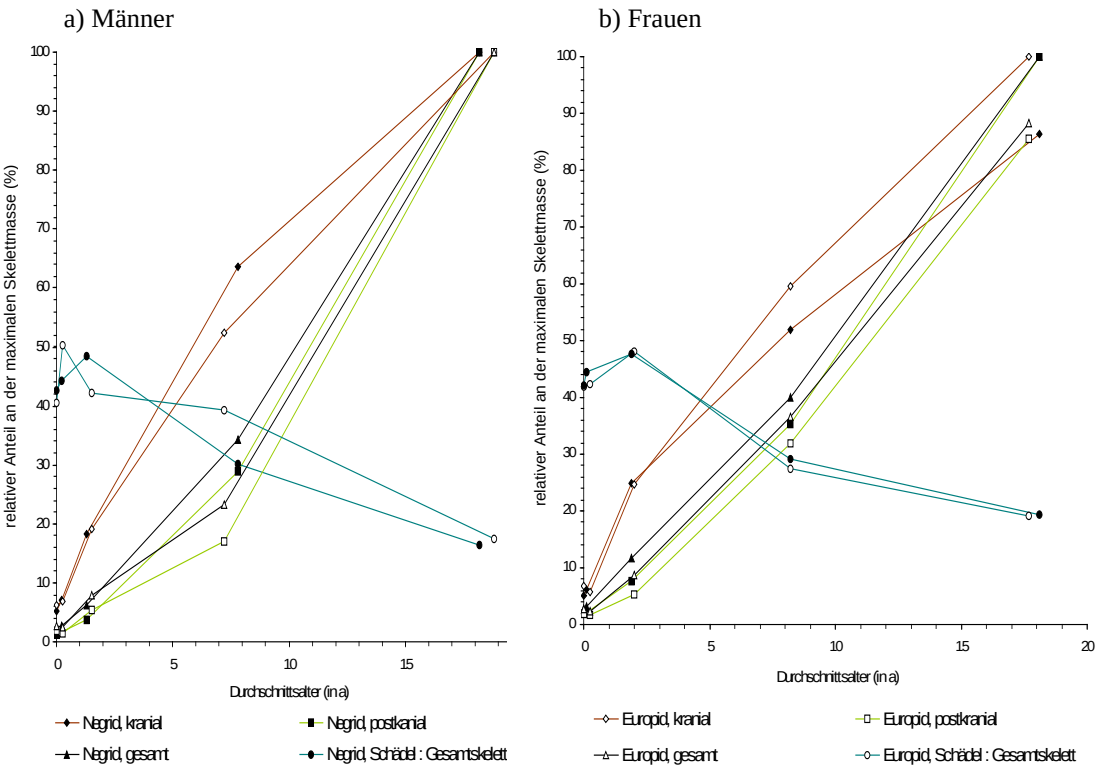


Abbildung 8: Relativer Anteil an der maximalen Masse von kranialem, postkranialem und gesamten Skelett und Anteil des Schädels an der Gesamtmasse zum Altersdurchschnitt in der Kohorte von < 13,0 bis 24,0 Jahre für Männer (a) und Frauen (b) (nach TROTTER UND HIXON 1974, tbl. 3, p. 8; vgl. Anhang 2).

Mit dieser Gegenüberstellung findet die Verschiedenheit der beiden Skelettregionen eine weitere Unterstreichung, wie sich diese allgemein bei Wirbel- und besonders bei Säugetieren nachweisen lässt, z. B. im Unterschied zwischen (vorwiegend) enchondraler Ossifikation und hoher morphologischer Ähnlichkeit im postkranialen Skelett im Gegensatz zur desmalen Ossifikation und einer erstaunlichen morphologischen Vielfalt im kranialen Skelett (siehe dazu auch HELMS UND SCHNEIDER 2003), wobei letztere mit dem Schutz des Gehirns und seiner raschen postnatalen Entwicklung im Zusammenhang steht.

Für Erwachsene gewinnt man einen ersten Eindruck über eine massemäßige Zusammensetzung des Gesamtskeletts, wenn man z. B. auf die Abreit von INGALLS (1931) zurückgreift (Anhang 3). Er untersuchte 100 Skelette von männlichen, weißen Amerikanen im Alter von 19 bis 78 Jahre, die er in fünf Altersklassen zusammenfasste (19-30, 31-40, 41-49, 50-59 und 60-78 Jahre). Er untersuchte die Beziehung der Skelettmasse zur Körper-, Sitz- und Schulterhöhe und dem Körpergewicht sowie zur Masse einzelner Knochen. Dabei wurde der Einfluss der Extremitätenknochen auf die Gesamtskelettmasse deutlich (Chart 8, S. 81): Allein ein Femur trägt über 9 %, eine Tibia 5 bis 6 % zu dieser bei. Ebenso differenziert stellt sich die Entwicklung des Skelettes anhand nicht-invasiver Methoden dar. BASS ET AL. (1999) schlussfolgern:

> „In conclusion, the skeleton is not a single functioning entity; the effect of growth, aging, disease, and treatment vary according to whether a region is axial or appendicular, cortical or trabecular, and whether the surface is periosteal or endosteal (endocortical, intracortical, trabecular). Each surface has a unique developmental pattern. The earlier growth in size than mass within a region, the differing tempo and direction of growth of the periosteal and endocortical surfaces, and the differing tempo of growth of the axial and appendicular skeleton suggests that each trait is regulated differently.“ (S. 802f).

Durch diese Arbeit wird auch die Beobachtung von PARFITT (1994) bestätigt, wonach ca. 50 % der postkranialen Skelettmasse erst mit und nach dem (prä)puberalen Wachstumsschub aufgebaut werden, wobei es bei den durch BASS ET AL. (1999) untersuchten Knochen (Wirbelsäule, Ober- und Unterarm, Ober- und Unterschenkel) zu Unterschieden bei der Entwicklung des Mineralgehaltes im Vergleich zum Gesamtkörper kommt. Weiterhin wird durch moderne, also nicht-invasive Arbeiten vorallem zur Osteoporose-Forschung auch für ältere Individuen deutlich, dass die Massereduktion in unterschiedlichen Skelettabschnitten sehr unterschiedlich verläuft und dass der Abbau z. B in der Wirbelsäule, am Handgelenk oder im Oberschenkel-Halsbereich untereinander nicht oder nur sehr schwach korrelieren.

Da die aus der Literatur recherchierbaren Werte für eine Berechnung von Modellen zur Masse-Entwicklung von Einzelknochen nicht ausreichen, erscheint es im Ergebniss dieser eher exemplarischen Ausführungen sinnvoll, bei vorhandener Auswahlmöglichkeit bei den Knochenfragmenten auf postkraniale Skelettelemente, vorzugweise auf die der großen Langknochen und in erster Linie auf Femur und Tibia, zurückzugreifen. Im Rahmen dieser Arbeit werden aber auch kraniale Knochen beprobt, um die Auswirkungen einer entsprechenden Auswahl auf die ^{14}C-Werte für Knochengewebe abschätzen zu können.

II 5.4.6 Der Einfluss der Rasse / geographischen Region

Unter Rasse versteht man in der Biologie die systematische Kategorie unterhalb der Art (Spezies). In der Zoologie gelten Rassen als gut erfasst, wenn anhand von vollständig genetisch bestimmten Definitionsmerkmalen die Individuen zu 75 % richtig eingeordnet werden können. Bei Menschen gelingt aufgrund der hohen Variabilität eine Klassifizierung wesentlich leichter und präziser. Strenggenommen wird nur die erste Ebene unterhalb der Art als Rasse gefasst, alle weiteren Ebenen als Varietät. Jedoch haben sich die meisten Klassifikationen des Menschen nicht daran gehalten. Bei Einbeziehung auch der fossilen Gruppen und der serologischen wie molekularbiologischen Ergebnisse lässt sich heute folgendes Bild zeichnen: Neandertaler und Jetztmenschen sind getrennte Arten. Die oberste Rasseebene trennt den archaischen, sehr knochenrobusten Menschen von späteren. Dann folgt die Ebene der schon von LINNÉ und BLUMENBACH definierten Negriden (Schwarzafrikaner), Europiden (die auch in Nordafrika und Indien verbreitet sind) und Mongoliden (Ostasiaten). Diese Ebene beschreibt die oft unter dem Begriff Großrasse zusammengefasste Variabilität und auf dieser gelingt die individuelle Zuordnung meist zu mehr als 95 %. Darunter lässt sich eine Ebene mit geographischen Gruppen fassen, die z. B. in Europa zu ca. 75 % individuell richtig klassifizierbar sind. Auf dieser Ebene gibt es meist breite Übergangszonen zwischen den Gruppen bzw. gleichmäßige geographische Gradienten für Merkmale und Merkmalskomplexe.

Als Ursache für die Entstehung von Rassen sind neben einer ganz allgemein bei Primaten zu beobachtenden hohen Variabilität vorallem Umweltbedingungen zu nennen. Aber auch Wanderungs- zw. Ausbreitungsbewegungen haben eine wichtige Rolle gespielt. Und schließlich muss „Gendrift“ genannt werden, der populationsgenetische Begriff für Zufall.

Die Bedeutung der Einflussgröße Rasse und das fast vollständige Negieren des Körperbautyps (Kap. II 5.4.5) in der Literatur der Skelettwissenschaften ist z. T. forschungsgeschichtlich zu erklären. Denn die Rasse kann relativ einfach (s. o.) erfasst werden und war zur Zeit der Entstehung der Skelettsammlungen am Ende des 19. und zu Beginn des 20. Jh. ein äußerst ‚modernes‘ biologisches Merkmal und findet sich entsprechend regelmäßig bei der Beschreibung vorhandener Skelette. Rassen unterscheiden sich auch entsprechend ihrer Skelettproportionen und -länge sowie -robustizität und sind im Hinblick auf diese Merkmale den Einflussgrößen Körperbautyp und Geschlecht vergleichbar. Nachdem die Rasse als Einflussgröße auf die Skelettmasse benannt war, entzündete sich nachfolgend eine kontrovers und z. T. politisch motivierte Diskussion.

Rassen sind nie mehr als ein Prinzip zur Ordnung der vielfältigen Lebensformen einer Spezies. Sie sind aber auch nicht weniger als ein Instrument zur Aufdeckung der Zusammenhänge zwischen Umwelt, Anpassung durch genotypische Merkmale und phänotypische Merkmalsausprägungen (RÖSING UND WINKLER 1992). Die Unsicherheit im wissenschaftlichen Umgang mit dem *Ordnungsprinzip Rasse* liegt in dem auch heute noch nicht klar genug überwundenen Drang nach Zuordnung selbst unbedeutender Merkmale zu Rassen und Unterrassen begründet.

Unabhängig davon, wie das Zuordnen von Merkmalen zu Rassen fachlich bewertet wird, muss dieses einem wert- und ideologiefreien Prinzip folgen. Die *Gleichwertigkeit* aller Menschen bedeutet aber in keiner Weise eine *Gleichartigkeit* der Menschen in allen Merkmalen. Menschenrechte unterliegen keiner Typisierung. Es wird deutlich: Das Arbeiten mit dem Rassebegriff in den Humanbiologien berührt auf jeden Fall einen sensiblen Bereich wissenschaftlicher und ideologischer Auseinandersetzung, die im Rassismus einerseits, aber auch in der falschen Gleichsetzung von Rasse und Rassismus bzw. dem Negieren der Existenz von Rassen beim Menschen andererseits gipfeln kann. Ein wesentlicher Anteil der Arbeiten zur Rasseabhängigkeit der Knochen- oder Skelettmasse bzw. der Knochendichte stammen aus den USA und beziehen sich auf die unterschiedlichen Bevölkerungsgruppen

zumeist aus Nord- und Mittelamerika. Auch hier ist man sich der Problematik im Zusammenhang mit dem Rassebegriff bewusst:

„... some scholars and general data users argue that the race concept should be abandoned from all classifications because it is racist, ambiguous, and vague ..." (McKenney und Bennett 1994, p. 23).

Aus der wechselvollen (jüngeren) Geschichte vor allem Nord- und Mittel- bzw. Lateinamerikas erklärt sich das Vorhandensein von drei Großrassen in diesem Gebiet. Dabei kam es regional zu einer unterschiedlich starken Durchmischung. Im Individualfall ist es schwierig oder gar unmöglich, den Anteil der rassischen Komponenten zu quantifizieren. Für größere und ursprüngliche Bevölkerungen lässt sich jedoch eine Zuordnung vornehmen (vgl. hier Abb. 9):

Es ist an dieser Stelle daher sinnvoll, Klarheit über die in US-amerikanischen Arbeiten häufig verwendeten Benennungen für die verschiedenen Rassen zu gewinnen. In dieser Literatur haben die Benennungen „Blacks", „Afro-Americans", „American Negros" für Negride und „Whites" bzw. „Caucasoids", „Caucasians" für Europide weite Verbreitung gefunden und werden oft als Synonyme im Sinne von Rassen verwendet. Doch gerade dieser Gleichsetzung kann nicht zugestimmt werden, denn vorallem die Afro-Amerikaner sind weder für die Grundgesamtheit der negriden Rasse repräsentativ noch sind sie genetisch mit den Afrikanern identisch. Zu diesen Unterschieden führten:

(1) Der Selektionsdruck während der Versklavung im 17. bis 19. Jh. nicht nur in den heutigen USA. So verstarben ca. 2/3 der Versklavten auf der Überfahrt von Afrika nach Amerika und gleichzeitig wirkten die Sklavenhalter massiv darauf ein, welche Sklaven Kinder haben durften bzw. mussten

(2) Vor allem ab dem 19. Jh. in den USA die verstärkte Vermischung vor allem mit Europiden. Afro-Amerikaner besitzen im *Durchschnitt* nur noch einen genetischen negriden Anteil von 75 bis 80 %. Diese Vermischung unterscheidet nicht nur Afro-Amerikaner und Afrikaner, sondern sie ist auch innerhalb der Afro-Amerikaner individuell sehr verschieden (Eveleth und Tanner 1990). Eine entsprechende Unterscheidung in Mulatte, Quadroon oder Octoroon findet sich selten in der Literatur (Solomons und Kumanyika 2000)

(3) Die in den USA deutlich besseren Lebensbedingungen im Vergleich zu den meisten negriden Bevölkerungen in Afrika und auf der gesamten Welt. Damit gewinnen soziale Faktoren je nach Herkunft der Stichprobe einen unterschiedlichen Einfluss auf untersuchte Merkmale und erschweren einen direkten Vergleich (Garrow und Fletcher 1964, Garrow et al. 1965). So fanden Luke et al. (1997) eine mit der Verschlechterung der sozioökonomischen Faktoren assozierte Abnahme von Körperhöhe, -gewicht und BMI zwischen Negriden der USA, aus Jamaica und Nigeria.

Darüberhinaus wurden im Zusammenhang mit der ‚political correctness' als Antwort auf einen eben nicht diskriminierungsfreien Alltag in den USA verschiedene andere Strategien zur ‚Entpolitisierung' dieser Fragestellung erarbeitet. Die Erhebungen des Bureau of Census beruhen z. B. seit 1960 auf einer Selbstidentifikation und seit 1978 konkret entweder als Weißer, als Schwarzer, als Asiate bzw. Pacific Islander, als Indianer bzw. Ureinwohner Alaskas im Sinne von Rassen oder als Hispanic im Sinne eines ethnischen Zugehörigkeitsgefühls, wobei letztere dann jeder beliebigen Rasse angehören können. Das National Center for Health Statistics verwendet als Identifikations-Kriterium die Rasse der Mutter. In den USA finden in Biologie und Medizin diese beiden aber auch weitere Methoden Anwendung, z. B. eine medizinisch-anthropologische Untersuchung oder die Auskunft Anderer (McKenney und Bennett 1994). In den Arbeiten findet sich oft kein Hinweis, nach welcher Klassifizierung die Zuordnung erfolgte. Streng genommen sind die meisten Arbeiten schon allein deswegen untereinander nicht vergleichbar. Ganz unabhängig von einer sachlich-methodischen Diskussion über den Zusammenhang von Rasse und Skelettmasse ist es somit problematisch, Studien an ‚Blacks and Whites' im Sinne von Unterschieden zwischen Negriden und Europiden zu verallgemeinern. Um einer missverständlichen Gleichsetzung entgegenzuwirken, werden daher beim Zitieren anglo-amerikanischer Literatur die dort verwendeten Populations-Beschreibungen beibehalten.

Neben den Bemühungen, geeignete Methoden zur Klassifizierung zu erarbeiten, wird vielfach auch die Existenz von Rassen des Homo sapiens sowohl für die Vergangenheit als auch für die Gegenwart, und dies nicht nur in den USA, einfach abgelehnt. Wegen der hohen Variabilität des Menschen, den Abweichungen zwischen individuellem Erscheinungsbild und dem ‚Idealtypus' im Sinne einer rassischen Klassifikation und letztendlich wegen der Beeinflussung vieler Merkmale durch das kulturelle und soziale Umfeld falle es schwer, biologisch-genetische Faktoren und ihre Bedeutung zu erfassen. In diesem Sinne ist das Statement der American Association of Physical Anthropologists (AAPA) von 1996 zu verstehen, welches als Vorschlag zur Revison des UNESCO Statements von 1964 gedacht war. Mit diesem Statement wird eher eine unmissverständliche Position gegen Rassismus als gegen Rassen bezogen:

„6. ...The human features which have universal biological value for the survival of the species are not known to occur more frequently in one population than in any other. Therefore it is meaningless from the biological point of view to attribute a general inferiority or superiority to this or to that race."

Der Begriff der Rasse fasst biologisch-genetisch determinierte, charakteristische Eigenheiten einer Population zusammen. Zur Klärung der Frage, welche Merkmale tatsächlich genetisch bedingt und/oder als charakteristisch zu bezeichnen sind und welche nicht, trägt jedoch der beliebige oder willkürliche Wechsel zwischen dem biologischen *Rasse*-Begriff, dem politisch-kulturellen *Ethnos*-Begriff oder einer politisch-ethischen Ebene nicht bei (WINKLER 1983, 1988). Es ist zwingend notwendig, sich über die Manipulationsmöglichkeit und den Missbrauch wissenschaftlicher Erkenntnisse bewusst zu sein und es ist wichtig, die eigene Arbeit auch in einem forschungsgeschichtlichen Zusammenhang zu reflektieren. Es ist nur nicht zu verstehen, dass diese in diesem Rahmen zwingend mit einer Selbstzensur oder Depravierung oder der Negierung der wissenschaftlichen Berechtigung von Forschungsrichtungen wie -ergebnissen einhergehen muss. Rassen sind eine biologische Realität auch beim Menschen.

In der vorliegenden Arbeit interessiert die Frage, ob die Skelettmasse von der Rassezugehörigkeit beeinflusst wird. Es sollten sich somit genetische Faktoren benennen lassen, die auf die Skelettmasse einwirken und dabei noch einen Bezug zur Rasse erkennen lassen. AUDI ET AL. (1999) stellten jedoch fest, dass die Bedeutung der unterschiedlichen Allele der Gene, die in Beziehung zur Skelettmasse gebracht werden, nicht geklärt ist. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde auch nicht untersucht, ob es überhaupt Häufigkeitsunterschiede der einzelnen Allele zwischen den Rassen gibt. 2003 publizierten DVORNYK ET AL. eine Arbeit, in der sie den Polymorphismus für 5 Gene, die im Zusammenhang mit der Knochendichte gesehen werden, für Europide und Chinesen untersuchten und diesen neben einer Variabilität innerhalb jeder der beiden Populationen auch fanden. Dennoch kann dies nur als ein erster direkter Nachweis eines genetisch begründbaren Unterschieds der Skelettmasse zwischen den Rassen angesehen werden, dem weitere Arbeiten unbedingt folgen müssen.

Und für einen allgemein akzeptierten, indirekten Nachweis reichen die zur Verfügung stehenden Methoden nicht aus, wie die widersprüchlichen Ergebnisse zu dieser Fragestellung aufzeigen. Die Gegensätzlichkeit der dabei vertretenen Standpunkte sollen die nachfolgenden zwei Zitate verdeutlichen:

„Two lines of evidence support a genetic basis for black/white differences in bone mass. First, the magnitude (10% to 40%) is incommensurate with known non genetic factors. Second, the difference is already persists throughout life. The genetic determination of bone mass is mediated by two classes of genes. The first regulates growth of the body, including muscles and bones, under the control of a master gene or set of genes whose products function as the sizostat. The second regulates the increase in apparent bone density in response to load bearing, under the control of a mastergene or set of genes whose products function as the mechanostat.“ (PARFITT 1997, p. 325).

„4. There are obvious physical differences between populations living in different geographic areas of the world. Some of these differences are strongly inherited and others, such as body size and shape, are strongly influenced by nutrition, way of life, and other aspects of the environment. Genetic differences between populations commonly consist of differences in the frequencies of all inherited traits, including those that are environmentally malleable." (AAPA STATEMENT 1996)

Im Sinne des ‚*master gene or set of genes whose products function as the sizostat*' bei PARFITT (1997) lassen sich Unterschiede zwischen Negriden, sowohl Afro-Amerikanern als auch Afrikanern, und Europiden am ehesten in Anlehnung an die Homöostase (dem Gleichgewicht zwischen den Körperfunktionen) interpretieren. Denn die Rassen unterscheiden sich durchaus in ihren Körperproportionen: Zum Beispiel haben nicht nur nord-amerikanische Negride bei einer gegebenen Sitzhöhe deutlich längere Extremitäten und dieser Unterschied ist in erster Linie genetisch bedingt (MARTIN UND SALLER 1959, MARTIN UND KNUßMANN 1988, TROTTER UND GLESER 1952, EVELETH UND TANNER 1990). Gleichzeitig kommt es jedoch unter besseren Lebensbedingungen zur Ausbildung längerer Gliedmaßen. Berücksichtigt man die im Vergleich zu Negriden im Durchschnitt besseren Lebensbedingungen Europider, so ist der Unterschied in der Beinlänge bei einer angenommenen Sitzhöhe von 60 cm mit 51 cm für Afro-Amerikaner zu 45 cm für Europide (Bergen) in Bezug auf die Skelettmasse besonders bemerkenswert (BOGIN 1988). Bedenkt man, dass die langen Beinknochen bei Erwachsenen über 30 % der Skelettmasse ausmachen (INGALLS 1931, hier Anhang 3), werden allein dadurch Unterschiede zwischen diesen beiden Gruppen erklärbar, da es darüber hinaus keine weiteren signifikanten Unterschiede in Körperhöhe und -gewicht zwischen Afro-Amerikanern, Afrikanern und Europiden gibt. Mongolide sind im Vergleich zu diesen drei Gruppen noch einmal kleiner und leichter und haben im Vergleich zu diesen kürzere Beine (VON EICKSTEDT 1934, BIASUTTI 1959, COON 1965, BOGIN 1988). Eine Anpassung (Adjustierung) der Skelettmasse allein für Körperhöhe und Körpergewicht kann somit oft nicht genügen, da Proportionsunterschiede bei gleicher Körperhöhe auf diese Weise nicht erfasst werden können. Die vorangegangenen Ausführungen legen nahe, dass sich bei einer Adjustierung der Skelettmasse für Größen- und Proportionsunterschiede Rasseunterschiede kaum oder gar nicht mehr feststellen lassen. Entsprechende Ansätze finden sich zunehmend in jüngerer Literatur. Gleichzeitig finden die von PARFITT (1997) angeführten 10 bis 40 % Unterschiede in der Skelettmasse zwischen „Schwarzen" und „Weißen" in der Literatur keine eindeutige Bestätigung (siehe %Rasseunterschied, Tab. 7).

Die Diskussion zum Zusammenhang von Rasse und Skelettmasse wird jedoch auch deswegen schwierig und mitunter unübersichtlich, da Körperbaumerkmale auch von Umwelteinflüssen abhängen, die durch sozioökonomische Faktoren beeinflusst werden. Diese wurden jedoch zu selten in den Studien jeder einzelnen der Skelettwissenschaften erfasst. In diese Richtung zielt auch die Kritik bei WAGNER UND HEYWARD (2000), die in sozioökonomischen und Umwelteinflüssen Confounder für die beobachteten Rasse-Unterschiede bei der Körperzusammensetzung sehen, wobei die oben angeführten Einschränkungen zur Beinlänge zu beachten sind. Obwohl Rasse und sozioökonomische Faktoren auch als von einander unabhängige Einflussfaktoren (Abb. 5) zu verstehen sind, gibt es durchaus enge Wechselwirkungen:

„However, colorblindness denies the reality that people do come in different shades and that these shades have been a basis for much social stratification and discrimination - often with a premium on being lighter-skinned or white." (SOLOMONS UND KUMANYIKA 2000, p. 1387).

In einem Intrapaar-Vergleich von eineiigen und zweieiigen Zwillingen bei gleichzeitig vergleichbaren Lebensbedingungen für die Paarlinge konnten SMITH ET AL. (1973) einen allgemeinen Einfluss genetischer Faktoren auf die Knochenmasse, sowie den Gesamtknochendurchmesser und den Mineralgehalt des Gewebes sowohl bei Juvenilen als auch Adulten feststellen, wobei zweieiige Zwillige signifikant variablere Ergebnisse zeigten. Dagegen ließ sich kein signifikanter Unterschied zwischen eineiigen bzw. zweieiigen maturen männlichen Zwillingspaaren bei der Reduktion von Knochenmasse feststellen (CHRISTIAN ET AL. 1989). In dieser (ersten) Longitudinal-Studie über 16 Jahre scheinen Umwelteinflüsse vor genetischen Faktoren zu dominieren. Entsprechend werten auch PARFITT ET AL. (1997) Unterschiede im Knochenumbau nicht als genetisch bestimmt, sondern:

„(7) All differences in bone cell function between blacks and whites that we have observed could be the result of the ethnics, and presumably genetic, difference in bone accumulation during growth. Higher bone mass would result in less fatigue microdamage, less need for repair by directed bone remodeling, lower bone turnover, lower bone blood flow, and slower terminal mineralization. (8) If this explanation is correct, there are no fundamental differences in the biology of bone remodeling between ethnic groups." (PARFITT ET AL. 1997, p. 1864)

Eine erschöpfende Diskussion zu dem Thema Skelettmasse(entwicklung), Knochendichte bzw. -umbau und Rasse ist bei dem Umfang der zur Verfügung stehenden Literatur an dieser Stelle nicht möglich. Die vorangegangenen und vor allem die nachfolgenden Zitate sind vielmehr im Hinblick auf die hier verwendete Literatur zur Skelettmasse-Bestimmung zu

verstehen und können/sollen andererseits einen kleinen Eindruck über verzögerte Kommunikation zwischen den einzelnen Skelettwissenschaften geben.

TROTTER UND GLESER untersuchten 1952 den Zusammenhang von Körperhöhe und Länge verschiedener Langknochen. Die höchste Korrelation bestand dabei zwischen Femur und Körperhöhe. Und noch 2002 schätzt PORTER diese Arbeit als die bestgeeignete Einzelstudie zur Bestimmung der Skelettlänge und Körpermasse ein, was nach der grundsätzlichen Kritik durch JANTZ ET AL. 1994 nicht nachvollziehbar ist (siehe auch RÖSING 1988). 1956 wiesen MERZ ET AL. die enge Beziehung zwischen Skelett- und Femurmasse nach. Dieser Zusammenhang wurde dahingehend interpretiert, dass beide durch die selben Faktoren beeinflusst werden. Als Einflussfaktoren benennt SEALE (1959) unter Bezugnahme auch auf die erstgenannte Arbeit Geschlecht und Rasse.

BAKER UND NEWMAN beschrieben 1957, dass die Skelette von afro-amerikanischen Soldaten um ca. 7 % schwerer waren, obwohl diese bei Armee-Eintritt eine um ca. 5 % geringere Körpermasse aufwiesen. Dieses Ergebnis erklärten sie mit den längeren Gliedmaßen Negrider im Vergleich zu Europiden und damit einem größeren Anteil kompaktareicher, schwerer Knochen am Gesamtskelett (vgl. Kap. II 5.3.1, Tab. 5).

In einer Studie untersuchten GARN ET AL. (1972) den prozentualen Sexualdimorphismus (%SDM) bei „American Negros“ und „White Ohios“ unter Verwendung von drei Flächen des Metacarpus II (siehe Kap. II 5.4.2 Tab. 6, Kap. VI 2.2.2 Tab. 62). In Anlehnung an den %SDM ließe sich auch ein ‚prozentualer Rasseunterschied’ (%RU, Formel 8) berechnen. Dieser ist für Frauen größer als für Männer und fällt bei beiden Geschlechtern für die zur Berechnung der Skelettmasse entscheidende Kompaktafläche am geringsten aus (Tab. 7). Frauen der ‚American Negros‘ haben 7,4 % mehr Fläche als Frauen der ‚White Ohios‘. Bei den Männern lag dieser Unterschied bei 3,5 %. Für beide Geschlechter ergibt sich durch die größere Markhöhlenfläche eine biomechanisch günstigere Verteilung der vorhandenen Skelettmasse bei den ‚American Negros‘ im Vergleich zu den ‚White Ohios‘ mit 26,6 % für Männer und 49,2 % für Frauen. Damit fällt der %RU in diesen Stichproben geringer als der %SDM aus (Kap. II 5.4.2, Tab. 6): Zum Beispiel betrug dieser bei der Kompaktafläche 33,1 % für die ‚White Ohios‘ und 28,4 % für ‚American Negros‘. Ein geringer %RU ergibt sich auch für das rechte Femur anhand der Durchschnittswerte von BAKER UND NEWMAN (1957), der bei jeweils größeren Werten für negride Männer bei der Länge 1,3 %, bei dem Volumen 3,0 % und bei der Masse 2,7 % betrug (hier Kap. II 5.3.1, Tab. 5).

Formel 8: **%Rasseunterschied (%RU) = (($Wert_{Negride}$/$Wert_{Europide}$) - 1,0) x 100%**

Tabelle 7: %Rasseunterschied (%RU) für erwachsene (20 bis 55jährige) ‚White Ohios' und ‚American Negros' anhand von Durchschnittswerten für die Gesamtknochen-, Markhöhlen- und Kompaktafläche nach GARN ET AL. (1972, tbl. 1 P. 128; vgl. hier Kap. VI 2.2.2, Tab. 62 zur Berechnung der Knochenflächen).

	‚White Ohios'		‚American Negros'		%RU	
	Männer	Frauen	Männer	Frauen	Männer	Frauen
Parameter	n = 1654	n = 2725	n = 401	n = 1188	n = 2055	n = 3913
Gesamtknochenfläche f_T in mm²	69,56	50,69	74,44	57,05	7,0	12,5
Markhöhlenfläche f_M in mm²	10,50	6,32	13,29	9,43	26,6	49,2
Kompaktafläche f_C in mm²	59,06	44,36	61,15	47,63	3,5	7,4

GARN UND POZNANSKI bestimmten 1987 für Kinder bis zu 6 Jahren ebenfalls an Röntgenbildern des Metacarpus II den Kompaktadurchmesser d_C und die -fläche f_C. Sie konnten neben einem Geschlechtsunterschied von 4 bis 5 % ab dem 1. Lj. zu Gunsten der Jungen einen Rasseunterschied von ungefähr 15 % ab dem 2. Lj. zu Gunsten der „American Negros" feststellen. Ebenfalls ab dem 2. Lj. ist die Kompaktafläche der ‚schwarzen' Mädchen sogar größer als die der ‚weißen' Jungen. Zwar finden sich diese und vor allem letzteres Ergebnis nicht in der Arbeit von GARN ET AL. (1972), dennoch ist der Hinweis der beiden Autoren nachvollziehbar, einen eigenen Standard für Afro-Amerikaner zu verwenden. Sie weisen damit auf die Bedeutung von Robustizitätsunterschieden hin, deren Bestimmung bei den nicht-invasiven Methoden vor allem in der Tiefendimension sowie in der Bestimmung des Anteils des Markhöhlen- am Gesamtknochendurchmesser ein Problem darstellt. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde dies in der entsprechenden Literatur kaum berücksichtigt, entspricht aber genau der hier geführten Argumentation für die Einflussgröße Geschlecht (Kap. II 5.4.2, s. u.).

Weiterhin bestimmten COHN ET AL. (1977) unter anderem das Gesamtkörperkalzium (TBCa) als Maß für die Gesamtskelettmasse. ‚Negride' zeigten sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen eine höhere TBCa-Konzentration. Durch diese Methode können aber Robustizitäts- und/oder Proportionsunterschiede im Skelett nicht berücksichtigt werden, denn es wird auf einen Standard, wie z. B. den ‚Referenz-Mann' Bezug genommen. Knochen zeigen daher auch dann eine höhere TBCa-Konzentration, wenn das Knochenvolumen im Individualfall über dem vorgegebenen Standard liegt. In der genannten Studie wurde diese Möglichkeit nicht diskutiert, vielmehr wurde eine Übereinstimmung zur

höheren Knochendichte bei Negriden aus der Studie von TROTTER UND HIXON (1974) gesehen.

In gleicher Weise ist die Formulierung von SHEPHARD (1991, S. 108) zu kritisieren: „..., *and the bones of negroid subjects may also have a higher content of protein and/or non-osseous mineral; ...*“. Auch dies wurde auf Grundlage der Studien von TROTTER UND HIXON (1974), TROTTER UND PETERSON (1962) sowie VICKERY ET AL. (1988) hergeleitet und ist so nicht haltbar. VICKERY ET AL. prüften das Verhältnis von Hautfaltendicke und Körperdichte, letztere ermittelt durch hydrostatisches Wiegen. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass ‚negroide‘ junge Männer eine größere Körperdichte als ‚weiße‘ bei gleicher Hautfaltendicke besitzen. Ohne die Prüfung, ob nicht einfach mehr Knochensubstanz (und evtl. Muskelmasse) bei den ‚Negroiden‘ bei gleichem Körpervolumen vorlag, ist aber ein Rückschluß auf die Zusammensetzung des Knochengewebes unzulässig. Und auch FROST (1987a, b) schliesst unzulässig anhand der Arbeiten von TROTTER und Co-Autoren auf genetisch bestimmte, niedrigere MES-Festpunkte (Minimum Effective Strain, siehe Kap. II 4.3) zur Induktion von Knochenbildung und -umbildung bei Negriden.

Auch in jüngerer Zeit finden sich Arbeiten, die einen Rasseunterschied für die Knochendichte bzw. Knochenmasse herausstellen. Doch es erscheinen zunehmend Arbeiten, die diese Abhängigkeit relativieren und hinter dieser neben einer Vermengung von Ethnos- und Rassebegriff sowie der unterschiedlich starken Vermischung der Rassen in den einzelnen Studien einen Zusammenhang mit Körperbaumerkmalen andeuten oder nachweisen und nicht zuletzt verbesserte Statistikprogramme für den gleichzeitigen Einfluss mehrerer Parameter auf eine Zielgröße nutzen konnten:

LUCKEY ET AL. (1989) korrigierten den in ihrer Studie beobachteten Zusammenhang von Rasse und Bone Mineral Content (BMC) um den Körpermasse-Index (BMI – Body Mass Index), wonach sich dieser Zusammenhang nicht mehr so deutlich darstellte. Grund für dieses Vorgehen war ihre Beobachtung, dass afro-amerikanische Frauen eine ca. zweimal höhere Neigung zur Fettleibigkeit aufweisen als ‚weiße‘ US-Amerikanerinnen. NELSON ET AL. (1991) fanden für Frauen eine Reduktion der Knochenmasse-Differenzen allein bei Berücksichtigung der Körperhöhe um 50 %. Bei den Männern fiel diese allerdings deutlich geringer aus (NELSON ET AL. 1995). THOMAS ET AL. (1991) fanden keine Abhängigkeit von Rasse und Geschlecht für neun Merkmale am Femur und acht Merkmale an der Lendenwirbelsäule (Knochen-Mineral-Gehalt bzw. Knochen-Mineral-Dichte für verschiedene

Regionen). Die gemessenen Werte konnten durch eine multiple lineare Regression vollständig dargestellt werden. In diese gingen Alter, Körperhöhe und Gewicht als einzige Parameter ein. SEEMAN fasst 1997 den Stand der Forschung zur Bestimmung der Mineraldichte des Knochens zusammen und meint, dass bei einem sorgfältigen Matchen nach der externen Knochengröße kein überzeugender Nachweis eines Rasseunterschiedes für die (wahre) Mineraldichte (siehe hier Kap. II 5.3, Abb. 6) mehr gelingen sollte. Diese Ausführungen lassen sich gut um jene von HUI ET AL. (2003) ergänzen. In dieser Studie wurden allein 92 % der beobachteten Variabilität des Gesamtkörper-Mineralgehaltes (TBMC) durch Alter, Geschlecht, Entwicklungsstadium nach TANNER und Körperhöhe erklärt, wobei 232 Kinder im Alter von 4 bis 16 Jahren und nach selbst-bestimmter Rasse-Einteilung in ‚Blacks' and ‚Whites' untersucht wurden:

„Although we had hypothesized that differences in sex hormone levels might have led to higher bone mass in blacks, the data in Table 2 did not show any systematic differences in hormone levels between blacks and whites in the same Tanner stage. ... However, this does not mean that sex hormone levels are unimportant in determining bone mass. Most of the effects of sex hormones on TBMC could have been mediated through their effects on sexual maturation (Tanner stage) and body size (height, weight, lean mass), which explain the majority of the variation in TBMC." (HUI ET AL. 2003, S. 648).

II 5.4.7 Der Einfluss sozioökonomischer Faktoren

Der wiederholte Verweis auf die wechselseitige Beziehung der Einflussfaktoren Rasse und sozioökonomische Faktoren macht es notwendig, sich über die Auswirkungen letzterer auf Wachstums- und Reifungsprozesse und die Skelettmasse selbst Klarheit zu verschaffen. Ein besserer bzw. höherer sozioökonomischer Status erlaubt nach BOGIN (1988):

(1) Eine bessere Ernährung
(2) Eine bessere Gesundheitsbetreuung und Hygiene
(3) Weniger körperliche Arbeit
(4) Eine bessere wachstumsfördernde psychologische Stimulation durch Eltern, Schule und untereinander.

Diese eher allgemein formulierten Faktoren nehmen somit auch auf Wachstums- und Reifungsprozesse des Skelettes Einfluss (GARN 1972) und wirken sich über die erreichte maximale Skelettmasse zum 3. Ljz. auch nachhaltig z. B. auf das Frakturrisiko durch Knochenmasseabbau aus, wobei (sehr) schlechte Lebensbedingungen in der Kindheit dieses Risiko erhöhen (FOLDES ET AL. 2003), ungeachtet dessen, dass sozioökonomische Deprivation an sich ein Risiko darstellt (MCLELLAN ET AL. 2003), und sportliche Aktivitäten dieses verringern (GUSTAVSSON ET AL. 2003, vgl. dazu auch Kap. II 4.3).

Für die Industriegesellschaften in Europa und Nordamerika kann festgestellt werden, dass Kinder aus Familien mit einem sozioökonomisch höheren Status größer und schwerer sind (mehr Muskel- und Knochenmasse, weniger Körperfett), eher in die Pubertät eintreten und einen höheren IQ (besserer Stimulation und Förderung) zeigen als Kinder aus Familien mit niedrigerem Status. Dies sind nicht notwendiger Weise Auswirkungen eines geringeren pränatalen Wachstums oder Geburtsgewichts, sondern häufig kommt es erst während der nachgeburtlichen Entwicklung zur Manifestierung dieser Merkmale. Die Abhängigkeit vom sozioökonomischen Status zeigt sich besonders deutlich bei Kindern zwischen Geburt und 12. Lj. Erst danach gewinnt die genetische Expression einen größeren Einfluss auf Wachstum und Reifung. Diese Abhängigkeit behält ihre Gültigkeit auch innerhalb einer sozioökonomischen Schicht. Besonders in armen Bevölkerungsschichten kommt es zudem fast zwangsläufig zu einer „Vererbung“ der Armut auf die nächste Generation.

Doch gerade der Ernährungszustand wird auch stark von kulturellen Vorstellungen beeinflusst. So lässt sich in den modernen Industriegesellschaften ein gegenläufiger Zusammenhang zwischen sozialem Status einerseits und Proteinmangel bzw. Fettleibigkeit andererseits feststellen. In den Entwicklungsländern stellt sich dagegen ein positiver Zusammenhang zwischen Sozialstatus und Fettleibigkeit dar (WAGNER UND HEYWARD 2000). Beides findet sich in kulturell geprägten, sehr verschiedenen Schönheitsidealen wieder, die sich in multikulturellen Gesellschaften durchaus nebeneinander erhalten.

Auf die körperliche Entwicklung wirkt sich jedoch auch eine psychische Stimulation aus. Unter Stress, nach und bei anhaltendem psychischen Trauma sowie bei Mangel oder Verlust von Zuneigung und Liebe („Hospitalismus“) können selbst beste materielle, einschließlich ernährungsmäßige Voraussetzungen nicht zu einem Entwicklungsvorteil genutzt werden (BOGIN 1988, EVELETH UND TANNER 1990). Verzögerte Entwicklung und/oder geringeres Wachstum können jedoch bei einer Verbesserung der Lebensumstände durch ein Aufhol-

wachstum ausgeglichen werden. Dieses Aufholwachstum kann zu einem supranormalen Wachstum bis zum (Wieder)Erreichen des normalen Entwicklungsstandes führen, wobei der Normalzustand durch das Aufholwachstum nicht überschritten wird.

Körperhöhe ist bei ausreichend großen Stichproben eindeutig mit dem sozioökonomischen Status der Eltern korreliert. Umgekehrt lässt sich aber anhand der Körperhöhe keine individuelle Aussage über die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Sozialschicht treffen. Eine größere Körperhöhe erleichtert jedoch den Übertritt in höhere Sozialschichten bzw. erleichtert den beruflichen Aufstieg (EVELETH UND TANNER 1990, JÜRGENS 1971, SCHUMACHER UND KNUßMANN 1977, SEIDLER 1986).

Als durchschnittliche Körperhöhe für Erwachsene aus 62 Bevölkerungen ergaben sich in reichen Industrieländern 174 cm für Männer und 160 cm für Frauen und in nicht-reichen Ländern 165 cm für Männer bzw. 153 cm für Frauen (EVELETH UND TANNER 1990). Weiterhin verglichen EVELETH UND TANNER (1990) in einer Zusammenstellung von zwölf Studien die Körperhöhe von 7,5 Jahre alten Jungen aus einer hohen und einer niedrigen Sozialschicht. In hochentwickelten Industrieländern (Norwegen, Schweden) ist die Differenz vernachlässigbar gering. In weiteren Industrieländern (USA, UK aus den 60er und aus den 80ern Jahren, Japan und Honkong) beträgt die Differenz maximal 2 cm. Dagegen zeigen Entwicklungsländer (Nigeria, Jamaica, Indien, Guatemala und Costa Rica) starke Differenzen bis über 7 cm zwischen hoher und niedriger Sozialschicht (vgl. auch Tab. 8). SCHMELING ET AL. (2002) konnten einen Einfluss sozioökonomischer Faktoren auf die Ossifikationsgeschwindigkeit der Handknochen nachweisen, mit einer Retardation bei Kindern aus ärmeren Ländern im Vergleich mit dem Atlas von GREULICH UND PYLE (1959).

Schlechte Lebensbedingungen finden in einer hohen Kindersterblichkeit, in einem hohen Grad von Unterernährung, häufigen Erkrankungen, hoher Arbeitsbelastung genauso Ausdruck wie in einer langsamen körperlichen Reifung und in einer kleinen durchschnittlichen Körperhöhe in allen Altersklassen (BOGIN 1988). Am Beispiel von Guatemala soll der Einfluss sozioökonomischer Faktoren dargestellt werden: In diesem Land lebt noch eine überwiegend indianide Bevölkerung. Nach FOCHLER-HAUKE (1972, aus Vergleichsgründen mit den Arbeiten von GARN gewählt) lassen sich für 1968 je 1000 Einwohner eine Geburtenrate von 34,3 und eine Sterberate von 7,7 angeben. Selbst in Guatemala lebende Europide waren zu diesem Zeitpunkt kleiner und zeigten einen anderen Fettanteil an der Körpermasse und eine andere Fettverteilung als Europide in den USA. Sie glichen darin den

guatemaltekischen Latinos mit hohem sozialen Status. Einerseits müssen diese europiden Kinder aus Guatemala im Vergleich zu nordamerikanischen Wachstums-Standards als klein, untergewichtig und mager beschrieben werden (BOGIN 1988). Andererseits sind diese Kinder verglichen mit nationalen Standards als gesund und normal entwickelt zu beurteilen. Dies wird besonders im Vergleich mit Kindern niedriger sozialer Schichten deutlich. Bei den Cakchiquel-Indianern lag der Protein- und Energiegehalt der Nahrung sogar noch weit unter dem nationalen Standard und dokumentiert sich in der geringen Fettreserve unter der Haut am Beispiel der Triceps-Hautfaltendicke (Tab. 8).

Tabelle 8: Körperhöhe, Gewicht und Tricepshautfalte für 7- bis 13jährige Jungen und Mädchen aus Guatemala in Abhägigkeit von ihrem sozialen Status (Mittelwert ± Standardabweichung: MW ± s, nach BOGIN 1988).

	Stadt: Latinos sehr hoher sozialer Status (MW ± s)		Stadt: Latinos niedriger sozialer Status (MW ± s)		Cakchiquel Indianer niedriger sozialer Satus (MW ± s)	
	Jungen	Mädchen	Jungen	Mädchen	Jungen	Mädchen
Körperhöhe (cm)	138,40 ± 6,56	138,37 ± 7,83	130,53 ± 6,71	131,00 ± 6,64	126,76 ± 5,93	125,50 ± 6,10
Gewicht (kg)	34,31 ± 6,56	35,77 ± 7,75	29,36 ± 5,39	29,83 ± 5,33	27,37 ± 4,07	27,23 ± 4,33
Tricepshautfalte (mm)	11,23 ± 5,03	13,37 ± 4,61	8,47 ± 2,87	10,51 ± 3,44	6,34 ± 2,34	7,67 ± 2,66

Mit diesen Beobachtungen korrespondieren auch die Ergebnisse aus der Studie von GARN (1970). Anhand von Röntgenbildern ermittelte er die Kompaktafläche in der Diaphysenmitte des Metacarpus II. Für beide Geschlechter bildete er 27 Alterskohorten und untersuchte bis zu 9 Stichproben je Altersklasse aus Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panama sowie den ‚American Negro', ‚Mexican American' und ‚White Ohio'. Im Anhang 4 wurden die Daten für die Männer und in Anhang 5 für die Frauen zusammengefasst. Jede dieser Einzel-Stichproben umfasst ca. 25 Individuen. Allerdings wurden durch GARN (1970) nur die Mittelwerte ohne Standardabweichung und genaue Individuenzahl angegeben. Dennoch wurde für jede Alterskohorte anhand der vorliegenden Werte der prozentuale Anteil des Maximalwertes am Minimalwert berechnet. Bei den Männern entspricht der Maximalwert im Durchschnitt 141 % des kleinsten Wertes und liegt zwischen 121,5 und 217,6 %. Bei den Frauen liegt der Maximalwert im Durchschnitt bei 131 % des kleinsten Wertes und liegt zwischen 116,0 und 151,0 %.

Es wurde weiterhin je Alterskohorte vermerkt, welche Stichprobe den kleinsten bzw. größten oder den jeweils benachbarten Rang einnimmt. Die Besetzung der beiden kleinsten Ränge wurde jeweils mit -1 Punkt bewertet, die der beiden höchsten Ränge mit je +1 Punkt. Für jede (Bevölkerungs)Gruppe wurde dann die Summe über diese Punktwerte berechnet und durch die Anzahl der vorhandenen Stichproben je Gruppe geteilt (17 bis 27). Sortiert man diese Quotienten der Größe nach, ergibt sich nachfolgende Rangfolge für die Gruppen (siehe auch Anhang 4 und 5):

(1) „White Ohios“ (Männer) bzw. „American Negros“ (Frauen)
(2) „American Negros“ (Männer) bzw. „White Ohio“ (Frauen),
(3) Panama,
(4) Nicaragua,
(5) „Mexican American“,
(6) Costa Rica,
(7) Honduras,
(8) El Salvador und
(9) Guatemala.

Diese Rangfolge kann sowohl in Abhängigkeit von sozioökonomischen Einflussfaktoren als auch von der Rasse interpretiert werden, wie Abbildung 9 verdeutlicht. In dieser wurde die Zusammensetzung der Länder Lateinamerikas nach SAUVAIN-DUGERDIL (1987) nach den Rassen Indianid, Europid, Negrid ergänzt durch den Rang aus dem Vergleich der 9 Stichproben aus der Studie von GARN (1970). Obwohl GARN keine Aussage zur Zusammensetzung seiner Mittelamerika-Stichproben bezüglich der Rassen trifft und auch keine detailierten Informationen zu den jeweiligen sozioökonomischen Hintergründen gibt, sieht er selbst die Unterschiede vorrangig in einem sozioökonomischen Zusammenhang, und zwar in erster Linie in Abhängigkeit vom Energiegehalt der Nahrung.

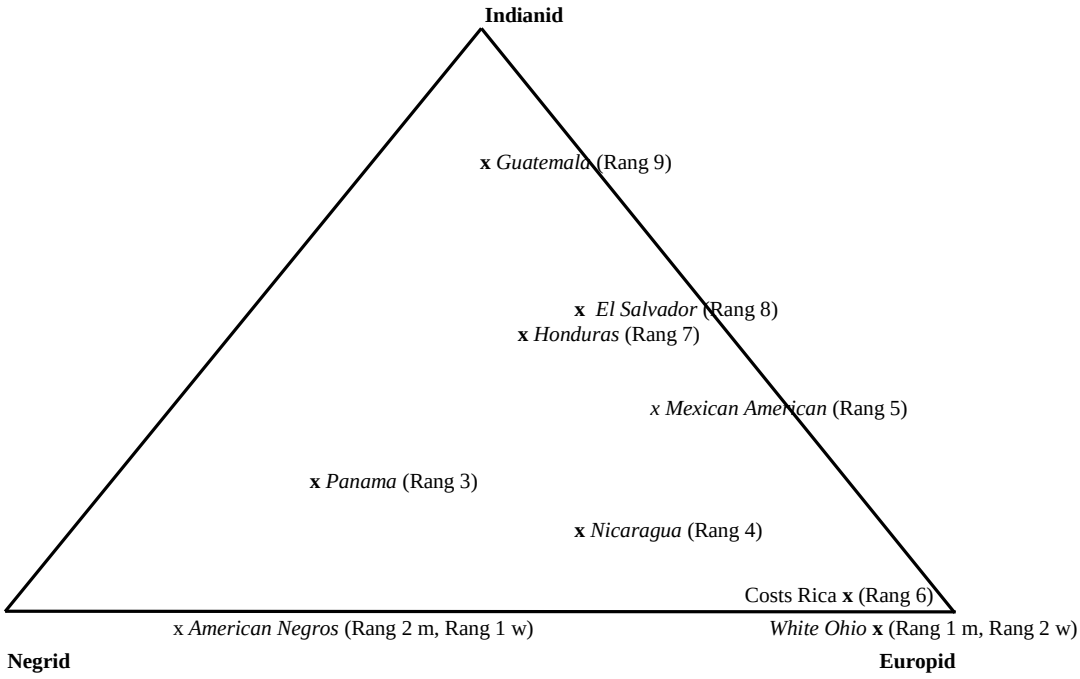


Abbildung 9: Zusammensetzung der Länder Lateinamerikas nach Indianid, Europid und Negrid (vereinfacht nach SAUVAIN-DUGERDIL 1987, S. 65, Abb. 8) für die neun Gruppen nach GARN und ergänzt um die Rangplätze aus dem Vergleich dieser Gruppen anhand der Kompaktafläche des Metacarpus II

(m: männlich, w: weiblich, (Zahl) Rang; nach GARN 1970, vgl. Anhang 4 und 5)

II 5.5 Korrekturwert und Umbaurate als Grundlage für eine jährliche Austauschrate $1/t_C$ von ^{14}C im Knochengewebe

II 5.5.1 Der Korrekturwert zur Skelettmasse-Änderung

Auf- und Abbauprozesse im Knochen finden neben dem Längenwachstum an den Epiphysen an der periostalen, kortikal-endostalen und trabekularen Oberfläche des Knochens statt. Sie stehen mit dem Dickenwachstum bzw. mit Modellierungs-Prozessen, also osteoblastischer bzw. osteoklastischer Knochendrift, im Zusammenhang und tragen im unterschiedlichen Umfang zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ bei (Kap. II 4.3). Dabei entzieht sich trabekularer Knochen, der ca. 20 % der Skelettmasse ausmacht, z. Zt. noch vorwiegend aus methodischen Gründen einer Beurteilung. Denn die Mess(un)genauigkeit eingesetzter, teurer Verfahren überlagert die geringen, für kurze Beobachtungsintervalle und in Querschnittsstudien mit kleinen Stichproben beobachtbaren Unterschiede (RECKER ET AL. 2003). Dagegen lässt sich für kompaktareiche Knochen, z. B. Lang- und Röhrenknochen, die Entwicklung an der periostalen und endostalen Knochenoberfläche an Veränderungen der Knochendurchmesser relativ gut beobachten. Als Methode der Wahl bietet sich die Röntgen-Technik an, mit der in vivo ausreichend genau Knochen von umgebendem Gewebe abgegrenzt werden kann und gleichzeitig Studien mit hohen Stichproben (z. B. GARN 1970) oder auch Längsschnittuntersuchungen (z. B. MILNE 1985, HOCHBERG ET AL. 1991, 1994 anhand des MC II, TANNER ET AL. 1981 anhand von Humerus und Tibia) durchgeführt werden können. Im Vergleich dazu stellen Arbeiten anhand von histologischen Knochenquerschnitten einen geringen Anteil dar (z. B. CARLSON ET AL. 1976 für Femur; MAYS 2000, 2001, IVES UND BRICKLEY 2004 für MC II).

Eine osteoblastische Knochendrift führt immer zu einer Zunahme von Knochenmasse und ist z. B. an der periostalen Knochenoberfläche durch die Zunahme des Gesamtknochendurchmessers d_T erkennbar. Ob und in welchem Umfang dieser Masse-Aufbau tatsächlich bei einer gleichzeitigen Bestimmung der Skelettmasse$_{netto}$ als Zugewinn erkannt wird, hängt aber von dem Ausmaß einer ggf. gleichzeitig stattfindenden osteoklastischen Knochendrift ab, die z. B. an der Vergrößerung des Markhöhlendurchmessers d_M erkennbar wird. Osteoblastische Knochendrift findet aber nicht nur an der periostalen und osteoklastische Drift nicht nur an der endostalen Knochenschicht statt. Zum Beispiel kann sich dieses vielfältige Zusammenwirken der einzelnen Prozesse auch als ein überlagerter Masse-Aufbau an der endostalen Knochenschicht bei gleichzeitiger Masse-Reduktion an der periostalen Knochen-

schicht darstellen (d_T und d_M werden im Vergleich zum Vorwert kleiner, z. B. Anhang 7: Männer ab einem Alter von 70 Jahren).

Ein Problem stellt dar, dass sich diese z. T. überlagernden Prozesse im Gegensatz zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ nur an ausgewählten Regionen eines Skelettes bestimmen lassen. Um Rückschlüsse auf das Gesamtskelett ziehen zu können, muss die ausgewählte Region die *durchschnittliche* Entwicklung im Gesamtskelett ausreichend gut erfassen. Von GARN wird der Metacarpus II (MC II) als ein geeignetes Modell zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ angesehen und er hat sich in einer Reihe von Arbeiten gleichzeitig mit dem Auf- und Abbau von Knochenmasse an den Knochenoberflächen befasst (z. B. GARN 1970, 1972, GARN UND WAGNER 1969, GARN ET AL. 1964). Nicht zuletzt durch einen Artikel von SEEMAN (2001b) erfahren diese Arbeiten erneute Aufmerksamkeit. Zur Kritik an dieser nicht-invasiven Methode sei auf die Kapitel II 5.3, II 5.4.4 und II 5.4.5 sowie VI 2.2.2 und VI 2.2.3 verwiesen.

Nach dem Modell von GARN errechnet sich die erreichte Skelettmasse zu einem Lebensjahr anhand des auf die Form eines Hohlzylinders reduzierten MC II, wobei dessen Länge l sowie die Durchmesser des gesamten Knochens d_T und der Markhöhle d_M in der Diaphysenmitte bekannt sein müssen (vgl. Kap. VI 2.2.2, Tab. 62). Durch GARN wurden in seiner Arbeit von 1970 für die Knochendurchmesser nur Mittelwerte und Standardabweichungen ohne den jeweiligen Stichprobenumfang angegeben. Anhand dieser Werte wurden die Gesamt- und die Markhöhlenfläche bzw. die an der periostalen Oberfläche gebildete Skelettmasse$_{dT}$ und die an der endostalen Oberfläche gebildete Skelettmasse$_{dM}$ neu berechnet (Anhang 7 und 8). Aus diesem Vorgehen erklären sich für diese abgeleiteten Parameter kleine Abweichungen im Vergleich zu den von GARN selbst publizierten Werten, da GARN diese aus den je Alterskohorte vorliegenden Einzelwerten berechnete. Die Unterschiede sind gering, wie Anhang 19 zu entnehmen ist. Die Werte von GARN (1972) sind in Anhang 9 und 10 zusammengefasst, die zum Vergleich allgemeiner Tendenzen herangezogenen Werte von MARESH (1955), MAAT (1984) und TANNER ET AL. (1981) in Anhang 6.

Die Skelettmasse ist ganz allgemein abhängig von der Menge vorhandenen Gewebes, welches sich in zweidimensionalen Röntgenbildern in Abhängigkeit vom Kompaktadurchmesser ($d_C = d_T - d_M$) allerdings nur ansatzweise erfassen lässt. In Abbildung 10 wird die Entwicklung des Kompaktadurchmessers für den MC II (GARN 1970) im Vergleich zu Humerus und Tibia (TANNER ET AL. 1981) für Männer und Frauen im Alter von 0 bis 18 Jahren dargestellt. An diesen Beispielen zeigt sich, dass der Anteil neugebildeten *Gewebes*

mit der Bestimmung der Skelettmasse$_{netto}$ unterschätzt wird (Anhang 6 bis 8). Denn gleichzeitig wird durch die Expansion der Markhöhle, erkennbar an der Zunahme des Durchmessers d_M, Knochenmasse endostal abgebaut.

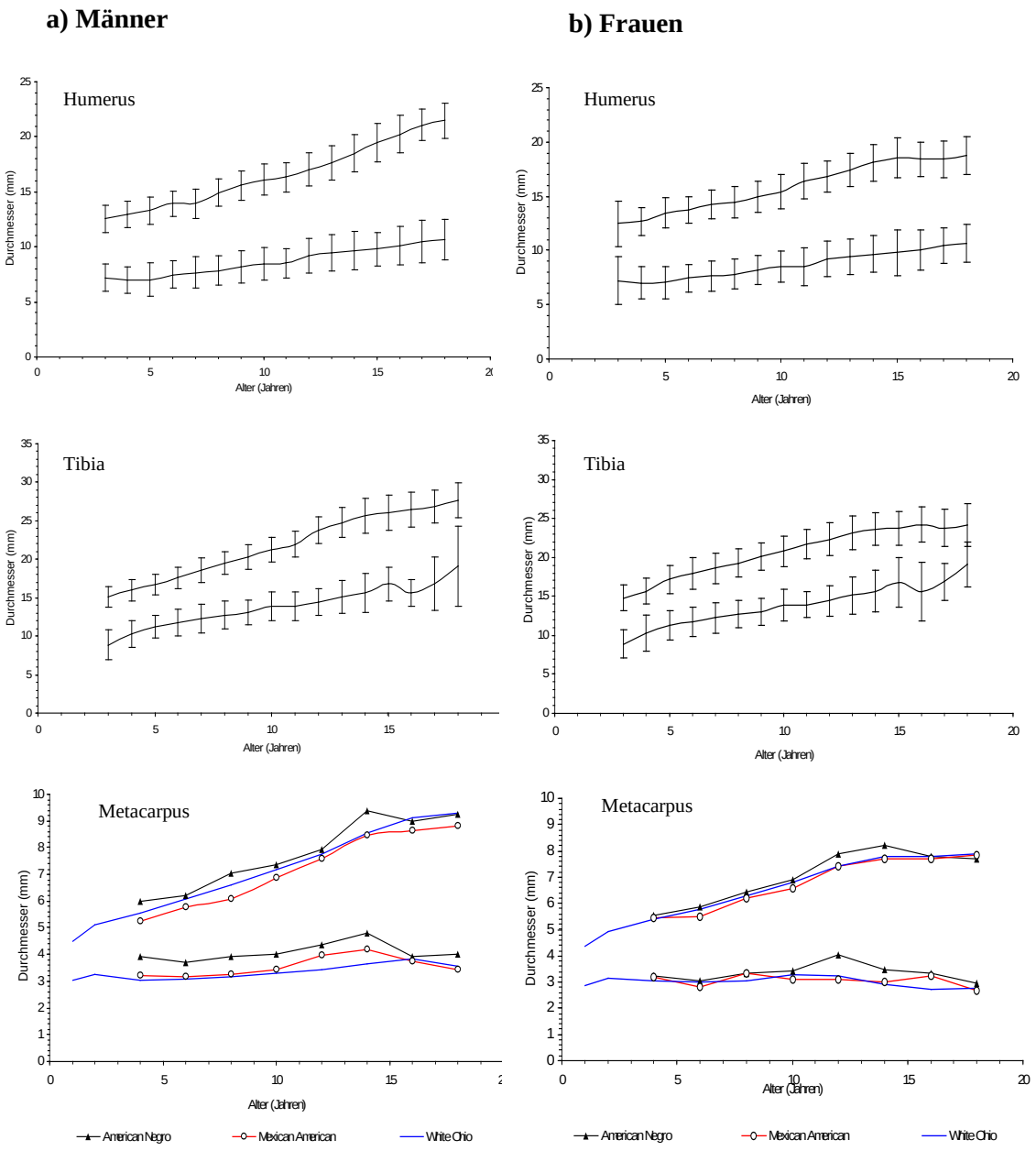


Abbildung 10: Die Entwicklung des Kompakta-Durchmessers für Männer (a) und Frauen (b) im Alter von 0 bis 18 Jahren am Beispiel des Metacarpus II (GARN 1970), des Humerus und der Tibia (TANNER ET AL. 1981).
Die in jedem Diagramm unten liegende Linie beschreibt die Entwicklung des Markhöhlendurchmessers, die oben liegende Linie die des Gesamtknochendurchmessers. Für den Humerus und die Tibia sind die Mittelwerte mit dazugehörigen Standardabweichungen dargestellt (vgl. Anhang 6). Für den Metacarpus wird die Variabilität durch die drei Stichproben „American Negros“, „Mexican American“ und „White Ohio“ angedeutet (vgl. Anhang 7 und 8).

Es fällt auf, dass die Entwicklung der einzelnen Knochen (Humerus, Tibia und MC II) zwischen den Geschlechtern ähnlicher verläuft als zwischen den verschiedenen Skelettelementen. Bei der Studie von TANNER ET AL. handelt es sich im Gegensatz zu der Studie von GARN um eine in Halbjahresabständen durchgeführte Längsschnitt-Untersuchung. Damit stellt die bei der Tibia zu beobachtende deutliche osteoblastische Drift an der endostalen Oberfläche (d_M wird kleiner) für Individuen nach dem 15. Lj. mehr als nur einen Selektions-Effekt bei der Gewinnung der Stichproben dar, wie dieser vielleicht für Querschnitts-Untersuchungen diskutiert werden könnte.

Da aber weder für den Humerus noch für die Tibia oder für ein anderes Skelettelement bisher ein Zusammenhang zwischen der Entwicklung der (Gesamt)Skelettmasse und des Kompaktadurchmessers beschrieben oder überhaupt Untersuchungen für erwachsene Individuen durchgeführt wurden, lässt sich nur für den MC II eine von der Geburt bis ins hohe Senium reichende Serie zusammenstellen, mit der lebenslange Auf- und Abbauvorgänge von Knochenmasse beschrieben werden können. Gleichzeitig stellen die Arbeiten von GARN nur eine erste Annäherung an diese Vorgänge dar. So zeigen sich im Vergleich zu den Extremitätenknochen deutliche Unterschiede. Weiterhin wird durch den MC II ab einem Alter von 16 Jahren bei den Männern und ab 14 Jahren bei den Frauen die Skelettmasse auch deutlich unterschätzt (Kap. VI 2.2.6). Und von ebenso großer Bedeutung ist, dass durch die Verwendung des MC II das Entwicklungstempo bei der Skelettreifung bis zu diesen Altern eher überschätzt wird. Die Verwendung des MC II beinhaltet somit mehrere systematische, nicht korrigierbare Fehler.

Eine etwas ausführlichere Diskussion ist angebracht, da der MC II von anderen Autoren wiederholt zur Beuteilung der $Skelettmasse_{netto}$ herangezogen wurde (MILNE 1985, HOCHBERG ET AL. 1991, 1994, vgl. auch Kap. VI 2.2.2). Weiterhin wird vor allem in archäologischen Studien versucht, aus dem Verhältnis vom Kompakta- zum Gesamtknochendurchmesser des MC II auf einen allgemeinen Knochenmasseverlust im Sinne von Osteoporose zu schließen (z. B. IVES ET AL 2004, MAYS 2000, 2001) oder gar eine Unterscheidung zwischen osteoporotisch („knochenabbauenden“) und arterosklerotisch („knochenbildenden“) Individiduen – allerdings recht erfolglos – vorzunehmen.

Für eine erste Beurteilung der Drift an der peri- und endostalen Knochenoberfläche stehen von GARN je Geschlecht drei Stichproben zur Verfügung: GARN (1970) für die Stichprobe der „White Ohio“ sowie GARN (1972) für Individuen mit einem pro-Kopf-Einkommen > $ 1800 (reich) bzw. für Individuen mit einem pro-Kopf-Einkommen < $ 592

(arm). Für diese waren entweder die Länge und die Durchmesser des MC II und/oder die an der jeweiligen Knochenschicht gebildeten Skelettmassen angegeben. Skelettmasse-Zuwachs findet statt, wenn sich der Gesamtknochen- (d_T) oder Kompaktadurchmesser (d_C) erhöht oder der Markhöhlendurchmesser (d_M) kleiner oder der MC II (l) länger wird. Ab einem Alter von 16 Jahren beim männlichen bzw. 14 Jahren beim weiblichen Geschlecht ist das Längenwachstum nach den Angaben von GARN vernachlässigbar (vgl. Anhang 7 und 8).

In Abbildung 11 ist für Männer (blau) und Frauen (rot) im Alter von 0 bis über 80 Jahre die Skelettmasse-Entwicklung an den beiden Knochenoberflächen dargestellt. Die Fläche zwischen den beiden äußeren Linien beschreibt die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$, die zusätzlich durch eine dicke Linie in entsprechender Farbe in Abbildung 11 a bis c dem Wert nach abgetragen wurde.

Nach den Daten von GARN (1970: Anhang 4, 5 bzw. 7, 8; 1972: Anhang 9 und 10) ergibt sich für beide Geschlechter ein weit über das 3. Ljz. anhaltender, wenn auch sehr geringer Skelettmassezuwachs. Wegen der eingeschränkten Darstellungsgenauigkeit wird dies in Abbildung 11 jedoch nicht deutlich. Nach GARN stellt dies auch einen Stichprobeneffekt dar. Dieser langanhaltende Skelettmassezuwachs wird nicht im Widerspruch zu der erarbeiteten Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ in Kapitel V 2.2 gesehen. Vielmehr unterstreicht dies erneut die Problematik, den MC II als Modell für das Gesamtskelett zu verwenden. Anhand der verfügbaren Daten von GARN können dennoch allgemeine Aussagen zur Entwicklung des Korrekturwertes abgeleitet werden (Anhang 7 bis 10):

- Für Kinder unter 2 Jahren liegen keine Beobachtungen vor
- Für Kinder bis zu einem Alter von 4 Jahren liegt der Wert bei über 8,0 %
- Die hohen Werte gehen schnell zurück, bei den Männern etwas weniger deutlich als bei den Frauen
- Ab einem Alter von 18 Jahren bei den Männern und bereits ab einem Alter von 14 Jahren bei den Frauen liegt der Wert unter 1,0 %
- Ab einem Alter von 22 Jahren werden lebenslang Werte von 0,5 % nicht mehr überschritten
- Für Männer zwischen 32 und 38 Jahre sowie für Frauen zwischen 24 und 27 Jahre beträgt der Wert sogar 0 %. Das bedeutet, dass kein durch Knochenabbau überlagerter Knochenaufbau nachweisbar ist.

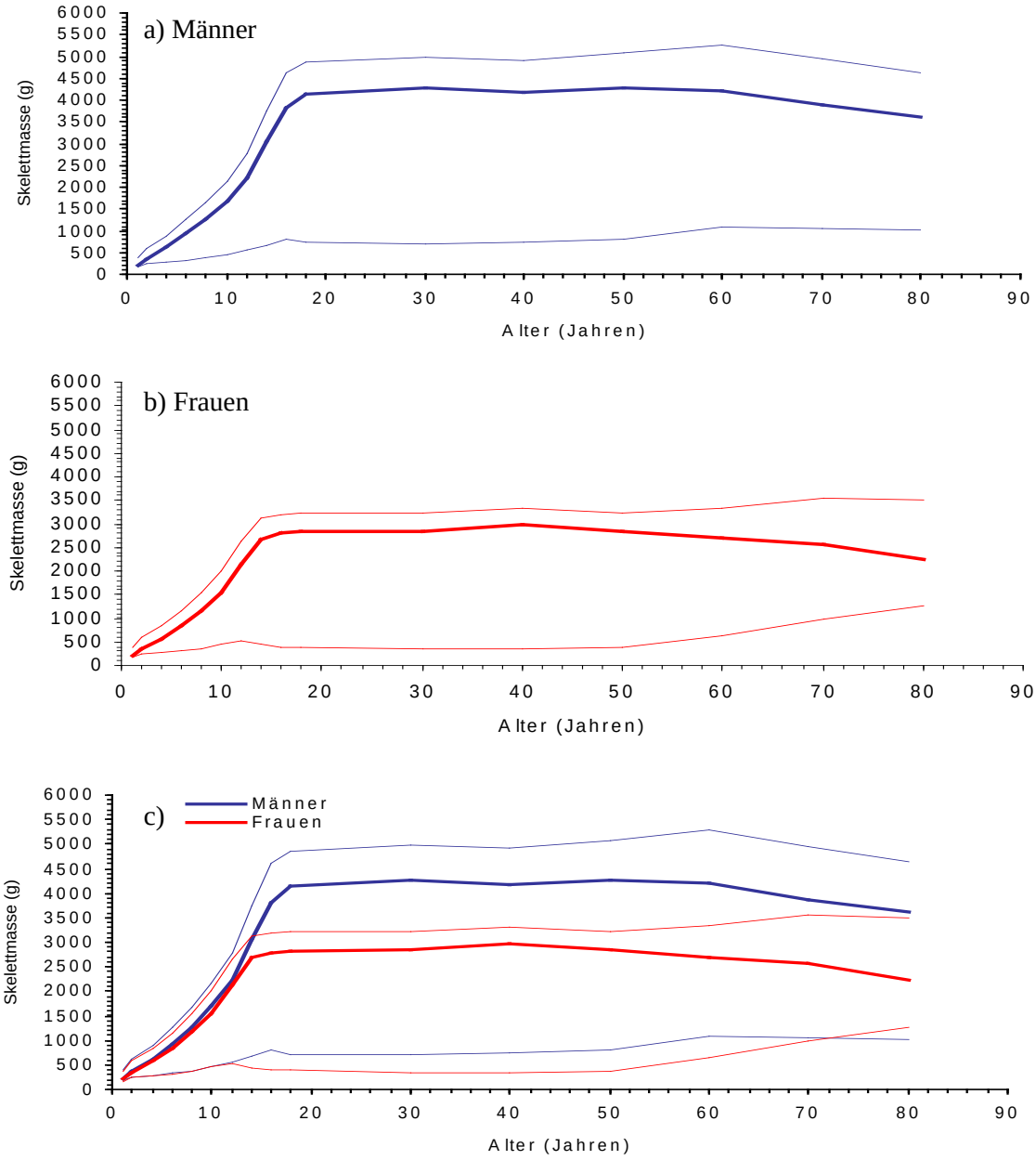


Abbildung 11: Die Entwicklung der Gesamtskelettmasse anhand der Drift an der peri- und endostalen Knochenoberfläche des MC II für Männer und Frauen im Alter von 0 bis 80 Jahren (GARN 1970, 1972, Anhang 7 und 8)

a) Männer

b) Frauen

a + b) Obere Linie: Skelettmasse-Entwicklung an der periostalen Oberfläche (Gesamtknochendurchmesser d_T)
Untere Linie: Skelettmasse-Entwicklung an der endostalen Oberfläche (Markhöhlendurchmesser d_M)
dicke Linie: Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ als Differenz aus periostaler und endostaler Knochenmasseentwicklung

c) Vergleich der Entwicklung für Männer (blau) und Frauen (rot).

Diese Beobachtung eines geringen Korrekturwertes im Erwachsenenalter deckt sich mit den Ergebnissen von RIGGS ET AL. (2004). Sie konnten eine Zunahme der Knochenfläche um 15 % zwischen einem Alter von 20 bis 97 Jahren sowohl bei Männern (n = 323) als auch bei Frauen (n = 373) nachweisen, was bei ihrer Annahme eines linearen Zusammenhanges einem Zuwachs von ca. 0,2 % pro Jahr entspricht und damit im Bereich der hier diskutierten Werte liegt. Damit liegen die Werte jedoch deutlich niedriger als der Durchschnittswert, der von AHLBORG ET AL. (2003) für die jährliche Zunahme der kortikalen Fläche am distalen Radius für Frauen im Alter von 48 bis 67 Jahren mit 1,2 ± 0,9 % beschrieben wurde.

Es wird deutlich, dass die Skelettmasse$_{netto}$ vorallem von der periostalen Knochendrift abhängig ist und Männer deutlich dickere (und, weniger deutlich, längere) Knochen als Frauen haben. Somit ergeben sich in Abhängigkeit der jeweiligen Bezugsgröße unterschiedliche Bewertungen für den Sexualdimorphismus, wie diese in Tabelle 9 zusammengestellt sind (%SDM; vgl. Kap. II 5.4.2, Formel 7 und Tab. 6).

Tabelle 9: Sexualdimorphismus (in Prozent, %SDM) für Männer und Frauen im Alter von 18 bis 30 Jahren für die Werte nach GARN (1970, Anhang 7 und 8 bzw. nach den Formeln in Tab. 62 in Kap. VI 2.2.2).

			Männer	Frauen	%SDM*
Länge des MC II	l	(mm)	73,90	67,50	9,48
Gesamtknochendurchmesser	d_T	(mm)	9,30	7,91	17,57
Markhöhlendurchmesser	d_M	(mm)	3,58	2,75	30,18
Gesamtknochenfläche	f_T	(mm²)	67,93	49,14	38,23
Markhöhlenfläche	f_M	(mm²)	10,07	5,94	69,47
Kompaktafläche	f_C	(mm²)	57,86	43,20	33,94
Skelettmasse$_{netto}$	SM_{netto}	(g)	4144,00	2826,00	46,64
an der periostalen Oberfläche aufgebaute Skelettmasse	SM_{dT}	(g)	4865,00	3214,00	51,37
an der endostalen Oberfläche abgebaute Skelettmasse	SM_{dM}	(g)	721,00	389,00	85,35

* %SDM = ((Wert der Männer / Wert der Frauen) – 1) x 100% (vgl. Formel 7, Kap. II 5.4.2).

Unter Bezugnahme auf die gleichen Daten von GARN (1970), wie in Abbildung 11 c und Tabelle 9 dargestellt, schlussfolgert SEEMAN (2001b) in seinem Artikel „*During aging men lose less bone than women because they gain more periosteal bone, not because they resorb less endosteal bone*“ (vgl. auch DUAN ET AL. 2001a, b, SEEMAN 2003b). Zwar bauen Männer danach 342 g und damit 85,4 % mehr Skelettmasse als Frauen an der Endostalschicht ab, aber gleichzeitig bauen sie an der Periostalschicht 1651 g und damit 51,4 % mehr Skelettmasse auf. Andererseits setzt der Skelettmasse-Abbau bei den Frauen bereits ab dem 50. Lj. durch eine Expansion der Markhöhle ein und dies kann auch nicht durch die

osteoblastische Drift an der periostalen Oberfläche kompensiert werden. Dagegen kommt es bei den Männern erst nach dem 60. Lj. zu einer deutlichen Skelettmasse-Reduktion und zwar sowohl durch eine Expansion der Markhöhle als auch durch eine Reduktion des Gesamtknochendurchmessers.

Weiterhin kommt es bei den drei zur Beurteilung vorliegenden Stichproben von GARN (1970, 1972) zu ganz unterschiedlichen Entwicklungen, sowohl für die $Skelettmasse_{netto}$, als auch für die an der peri- bzw. endostalen Oberfläche gebildeten Skelettmasse. Für Männer und Frauen ab einem Alter von 30 Jahren ist dies in der nachfolgenden Tabelle 10 zusammengestellt, da erst ab diesem Alter in allen 3 Stichproben durch GARN die gleiche Altersklassierung der Individuen vorgenommen wurde.

Tabelle 10: Zuwachs und Reduktion von Skelettmasse (netto, periostal und endostal) für Männer und Frauen im Alter ab 30 Jahren (nach Angaben von GARN 1970, 1972, siehe Anhang 7 bis 10).

Alter	Männer									Frauen								
	SM_{netto}			SM_{dT}			SM_{dM}			SM_{netto}			SM_{dT}			SM_{dM}		
	´70	r	a	´70	r	a	´70	r	a	´70	r	a	´70	r	a	´70	r	a
30<40	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑
40<50	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓
50<60	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓
60<70	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓
70<80	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
80<	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓

SM_{netto} $Skelettmasse_{netto}$
SM_{dT} an der periostalen Oberfläche gebildete Skelettmasse (Veränderung des Gesamtknochendurchmessers d_C)
SM_{dM} an der endostalen Oberfläche gebildete Skelettmasse (Veränderung des Markhöhlendurchmessers d_M)
´70 GARN (1970)
r reich, GARN (1972), pro-Kopf-Einkommen >$1800
a arm, GARN (1972), pro-Kopf-Einkommen <$592
↓ Reduktion an Skelettmasse im Vergleich zur vorangegangenen Alterskohorte: $d_M \uparrow$ und/oder $d_C \downarrow$
↑ Zuwachs an Skelettmasse im Vergleich zur vorangegangenen Alterskohorte: $d_M \downarrow$ und/oder $d_C \uparrow$

Die Zusammenstellung in Tabelle 10 lässt die Variabilität bei der Knochenmasse-Entwicklung im Erwachsenenalter erkennen. Worauf diese zurückzuführen ist, ob auf sozioökonomische Faktoren (GARN 1970, 1972) oder auf rassisch-ethnische Unterschiede (GARN 1970), ob auf einen unterschiedlichen Anteil von pathologisch (z. B. osteoporotisch) veränderten Individuen oder ob diese nur zufällige Stichprobeneffekte beinhalten, muss offen bleiben. Die Beantwortung dieser Fragen ist anderen Studien vorbehalten. Wegen der angeführten Einschränkungen unterbleibt die Herleitung eines jährlichen Korrekturwertes für das Gesamtskelett.

II 5.5.2 Die jährliche Umbaurate

Von Geburt an sind im Knochen parallel zum Längen- und Dickenwachstum (Kap. II 4.2) und zur Knochenmodellierung (Kap. II 4.3) auch Umbildungsprozesse (Kap. II 4.4) zu beobachten. Umbildungsprozesse finden immer an inneren Oberflächen des Knochens statt und lassen sich am Erscheinen von (Sekundär)Osteonen, den Havers'schen Systemen, erkennen und beruhen auf der *lokal* aufeinanderfolgenden und als ‚Kopplung' bezeichneten Aktivität von Osteoklasten und -blasten im ARF-Zyklus (Kap. II 4.4). Mit ‚Umbildung' wird also einerseits die Entstehung von Osteonenknochen aus vorhandenem Lamellen- bzw. dem unter physiologischen Bedingungen selten entstehenden Geflechtknochen und andererseits die ständige Umgestaltung im Osteonenknochen selbst erfasst.

Mit dem Erreichen der maximalen Skelettmasse im 3. Ljz. (Kap. VI 2.5) erfolgt die Anpassung des Knochens an seine vielfältigen Beanpruchungen nur noch im geringen Umfang durch Knochenmodellierung, die an den äußeren Knochenoberflächen als Drift erkennbar wird (peri-, endostal und endostal-trabekulare Knochenschicht). Vielmehr wird dies überwiegend durch Knochenumbildung erreicht, mit einer über den einzelnen Umbildungsprozess aber auch über die gesamte Lebenspanne eines Individuums annähernd konstanten Knochenbilanz in der Intrakortikalschicht, einer positiven Knochenbilanz in der Periostalschicht und einer negativen Knochenbilanz in der Endostal(- und Trabekular-)Schicht (Kap. II 4.4.2). Die Summe aller Umbildungsprozesse im Verhältnis zum vorhandenen Gewebe lässt sich mit der Umbaurate erfassen.

Mit den Prozessen der Knochenumbildung darf jedoch die bis ins hohe Alter bestehende Anpassungsfähigkeit des Knochens an sich ändernde Beanspruchungen nicht gleichgesetzt werden. Die Fähigkeit des Knochens, sowohl als Organ als auch als Gewebe im Sinne eines negativen Rückkopplungssystems auf sich ändernde Bedingungen adaptiv zu reagieren, wird besonders deutlich, wenn die Grenze von physiologischen zu pathologischen Prozessen erreicht oder überschritten wird. Diese adaptiven Vorgänge stellen immer ein Zusammenwirken von Umbildungs- und Modellierungs- und den ab dem Erwachsenenalter nur noch selten zu beobachtenden Wachstumsprozessen dar. Dabei werden etwa 20 bis 40 % der Aktivitäten im Knochengewebe auf eine sich ändernde mechanische Belastung zurückgeführt und imponieren bis ins hohe Alter beispielsweise als atrophische Prozesse bei eintretender und anhaltender Immobilität, als neo- und hyperplastische Prozesse bei wiederhergestellter Mobilität oder im Anschluss an Frakturen mit jeweils nachfolgender Um-

bildung des Primärknochens in Sekundärknochen. Dies bedeutet aber auch, dass 60 bis 80 % der adaptiven Vorgänge durch intraindividuelle Änderungen im Stoffwechsel verursacht werden, die ihre Ursachen u.a. in pathologischen Prozessen finden: Zum Beispiel als Folge eines gestörten Hormonstatus oder Angebots bzw. Bedarfs an Mineralien, als Folge von spezifischen oder systemischen Entzündungen und Erkrankungen, neoplastischen oder nekrotischen Vorgängen. All diese Prozesse sind hier ausdrücklich *nicht* mit Umbildung gemeint.

Im Rahmen dieser Arbeit interessiert die Knochenumbildung in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht eines Menschen. Weitere, die Knochenumbildung beeinflussende Prozesse werden als inter- und intraindividuelle Variabilität subsummiert, was in der Nichtverfügbarkeit entsprechender Informationen in der Forensik eine Entsprechung findet (Kap. II 5.5). Sehr allgemein lassen sich nach FROST (1985, S. 74) bei Kindern im Durchschnitt etwa 90 % der Stoffwechselaktivität im Knochen auf Wachstums- und Modellierungsprozesse zurückführen. Im Gegensatz dazu sind bei Erwachsenen durchschnittlich etwa 95 % des Stoffwechsels im Knochen auf Umbauprozesse zurückzuführen. Durch makroskopische und somit indirekte Methoden lässt sich der Anteil des Knochenumbaus nicht genau fassen. Dieser lässt sich nur histologisch exakter beschreiben, dann allerdings immer nur für einen sehr kleinen Ausschnitt des gesamten Skelettes. COMPSTON (2004) sieht sogar die Möglichkeit einer Renaissance der Histomorphometrie (vgl. Kap. II 4.4.3). Insgesamt überwiegen in der Literatur ältere Arbeiten, in denen über verschiedene Altersklassen hinweg Umbauraten ermittelt werden. Es lassen sich dazu zwei unterschiedliche Ansätze verfolgen:

- An markiertem Knochengewebe (Tetrazyklin) wird über die aktuell im Gewebe beobachtete Stoffwechselaktivität auf die jährliche Umbaurate geschlossen
- An unmarkiertem Gewebe ergibt sich aus der Anzahl vorhandener Osteone eine in Abhängigkeit vom Gewebealter durchschnittliche Umbaurate.

Wegen der relativ leichten Probengewinnung finden sich in der Literatur überwiegend Umbauraten für Knochenkompakta der Rippen: Zum Beispiel PIROK (1966, 11. Rippe, Männer und Frauen, Tetrazyklin), FROST (1969, 6. Rippe, Männer und Frauen, Tetrazyklin), WU ET AL. (1970, 6. Rippe, Männer, Tetrazyklin und unmarkiert), STOUT UND PAINE (1994, berechnet und Vergleich mit FROST 1969), STOUT UND TEITELBAUM (1976, Rippenfragmente, unmarkiertes historisches Material) aber auch von Spongiosa aus dem Beckenkamm, z. B. bei RECKER ET AL. (2004, Frauen, Tetrazyklin). In Abbildung 12 sind die Werte zusammengestellt.

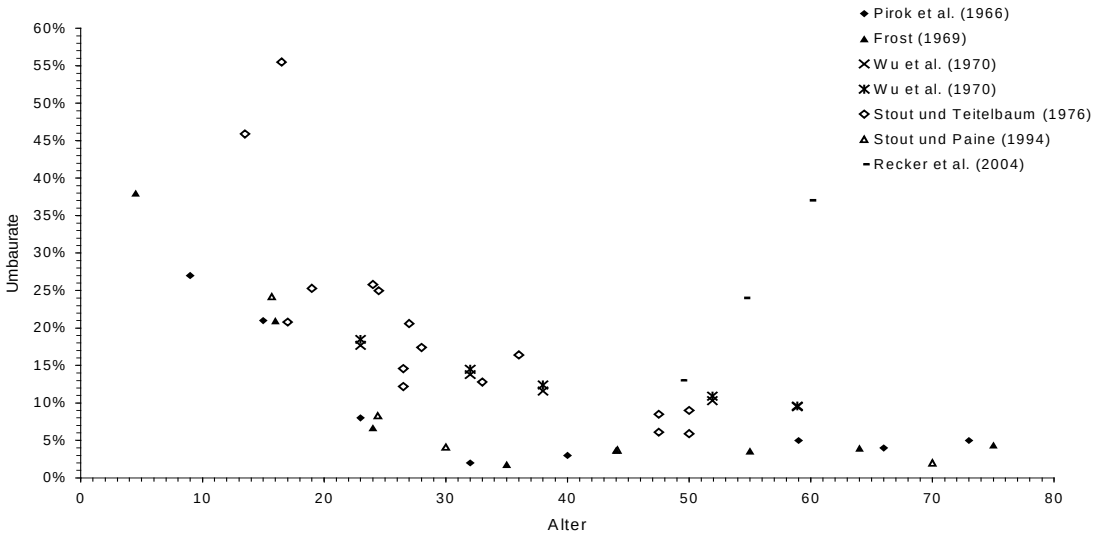


Abbildung 12: Die Umbaurate von Knochengewebe in Abhängigkeit vom Alter (Literaturwerte). Nicht dargestellt wurde der Wert von 85 % im Alter von 0,33 Jahren nach FROST (1969).

Mit Hilfe von Tetrazyklin erfolgt die Markierung von Apatit. Auch historisches Material beschreibt Osteonenknochen regelhaft mit Hilfe von Knochenschliffen, also ebenfalls anhand der anorganischen Fraktion. Apatit wird jedoch erst synthetisiert, wenn bereits Kollagenfasern vorliegen. Somit kann die Umbaurate für Apatit und Kollagen nur in einer ersten Annäherung als gleich angesehen werden, welche sich unter Berücksichtigung der Osteonenbildungszeit von im Durchschnitt 90 Tagen ergibt (vgl. Kap. II 4.4.1; Kap. II 4.4.4: Formel 5 a-f). Unberücksichtigt bleibt dagegen für beide Gewebefraktionen ihre z. T. über Jahre anhaltende Ausreifung, die hier nur stichwortartig mit ‚sekundärer Mineralisierung des Osteoids' (AKKUS ET AL. 2003, Kap. II 4.4.1) und ‚voranschreitender Vernetzung der Kollagenfasern' (WILD ET AL. 2000, Kap. VI 1.3.1) angedeutet werden soll. Bei Apatit ist zudem regelhaft ein interkristalliner Austausch vor allem im Zusammenhang mit einem veränderten Kalziumstoffwechsel zu beobachten. Diese Prozesse führen u. a. zu den Unterschieden in der Verweilzeit von Kohlenstoff im Kollagen und Apatit, wie diese mit Hilfe von ^{14}C nachgewiesen wurden und für Kollagen eine etwas längere Verweilzeit von ^{14}C andeuten (L'ORANGE UND ZIMEN 1968a, 1969a, Kap. VI 1.3.1). Weiterhin ist aus den Arbeiten zu Strontium (^{90}Sr, Kap. II 3.3) für Apatit bekannt, dass die erfasste Stoffwechselaktivität vom Kompakta- bzw. Spongiosaanteil einer Probe (Knochen) abhängig ist und in Rippen etwa das Dreifache der Aktivität in Diaphysen beträgt (KULP ET AL. 1960). Entsprechende Hinweise finden sich auch für ^{14}C in den Arbeiten von L'ORANGE UND ZIMEN (1968a, 1969a).

So zeigt Apatit im Vergleich zu Kollagen und Spongiosa im Vergleich zu Kompakta einen höheren Stoffwechsel, auch wenn diese Unterschiede nicht ausreichend quantifiziert wurden (Kap. V 1.3). Gleichzeitig beeinflusst die Umbaurate das durchschnittlich vorliegende Alter eines Gewebes. Dieses ist weiterhin von der Dicke der Kompakta abhängig. Rippen haben z. B. ein durchschnittliches Gewebealter von 30 Jahren und zeigen überwiegend vollständige Osteone im Querschnitt. Dagegen zeigen Femurdiaphysen ein durchschnittliches Gewebealter von etwa 55 Jahren und es überwiegen Osteonenfragemente im Querschnitt (Kap. II 4.4.4, STOUT UND PAINE 1994). Umbauprozesse bewirken in der Spongiosa einen Masseverlust von etwa 50 % und in der Kompakta von etwa 35 %, was zusammen zu einer etwa 40 %igen Reduktion der maximalen Skelettmasse führt.

Da die Umbauprozesse viel stärker als die Masseentwicklung oder der Korrekturwert kleinräumig beeinflusst werden, muss die Frage nach der Übertragbarkeit lokal beobachteter Werte auf das Gesamtskelett eher verneint werden.

II 5.5.3 Die jährliche Austauschrate $1/t_C$ von ^{14}C im Knochenkollagen

Aus den beiden vorangegangenen Kapiteln wird deutlich, dass sich weder ein jährlicher Korrekturwert zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ noch eine jährliche Umbaurate für das Gesamtskelett auf Grundlage der vorhandenen Literatur ausreichend genau beschreiben lässt. Daher wird zur zusätzlichen Erfassung der Stoffwechselvorgänge für Radiocarbon im Knochenkollagen eine jährliche Austauschrate $1/t_C$ herangezogen.

Die Austauschrate steht zwar mit dem Korrekturwert und der Umbaurate in positiver Beziehung, da diese beiden Prozesse eine Art Obergrenze für einen messbaren ^{14}C-Austausch definieren. Dieser Austausch wird jedoch nur dann erkennbar, wenn dabei auf ein Reservoir mit einem abweichenden ^{14}C-Angebot im Vergleich zu der bereits im Gewebe vorliegenden ^{14}C-Konzentration zurückgegriffen wird. Dieses Reservoir kann sich extra- oder intraindividuell befinden. Das Verhältnis des primären (extraindividuellen) zum sekundären (intraindividuellen bzw. sogar intraossealen) ^{14}C-Austausch beeinflusst somit die bestimmbare Rate, wenn wie bei der Ausnutzung des Atombombeneffektes auf die veränderlichen ^{14}C-Werte in der Atmosphäre als Referenzkurve zurückgegriffen wird. Dabei gilt: Je höher der Anteil des sekundären am gesamten ^{14}C-Austausch ist, um so geringer erscheint

die Austauschrate und um so geringer fällt die Korrelation zwischen Austauschrate und tatsächlich stattfindendem Stoffwechsel im Gewebe aus. Die jährliche Austauschrate $1/t_C$ stellt somit einen eigenen Parameter dar und erfasst nur den Anteil an ^{14}C, der pro Jahr über die Nahrung mit der Atmosphäre als extraindividuellem Reservoir ausgetauscht wird.

Die jährliche Austauschrate kann weiterhin über die gesamte Lebensspanne eines Individuums entweder als veränderlich oder als konstant angenommen werden. Eine veränderliche Rate würde dabei in Anlehnung an den Korrekturwert und die Umbaurate zu verstehen sein und eine Entsprechung in den zur ^{90}Sr-Methode entwickelten Modellen finden (Kap. II 3.3). Es muss jedoch beachtet werden, dass es durch Wachstums- und Reifungsprozesse zu einer Zunahme von körpereigenen Reservoiren kommt, auf die beim sekundären Stoffwechsel zurückgegriffen werden kann. Dabei könnte es zu einer Überlagerung bzw. zum Ausgleich altersabhängiger Prozesse bis hin zu einer lebenslang zu beobachtenden konstanten Austauschrate kommen. Sekundärer Stoffaustausch bildet gleichzeitig die Grundlage dafür, dass z. B. für Femur-Kompakta mit einem durchschnittlichen Gewebealter von etwa 55 Jahren (STOUT UND PAINE 1994) niedrige Austauschraten berechnet werden können (z. B. von 3,5 %, dass heisst nach 59,4 Jahren sind 87,5 % des ursprünglichen ^{14}C umgesetzt). Dagegen findet sich eine lebenslang als konstant angenommene jährliche Austauschrate bereits in den meisten der vorliegenden Modellen zur ^{14}C-Methode (Kap. II 3.2).

Unabhängig von diesen Anmerkungen errechnet sich eine Austauschrate als Durchschnittswert über eine bestimmte Anzahl von Jahren – entweder innerhalb bestimmter Entwicklungsabschnitte oder über die gesamte Lebensspanne eines Individuums hinweg. Besonders bei Kindern und Jugendlichen muss im Rahmen dieser Arbeit damit gerechnet werden, dass sich deutliche individuelle Abweichungen von einer als durchschnittlich angenommenen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ auf die Austauschrate auswirken und durch diese bis zu einem gewissen Umfang „ausgeglichen“ werden. Je älter ein Individuum wird, um so weniger werden sich entsprechende Abweichungen auswirken.

In der Literatur finden sich für ^{14}C im Knochenkollagen Austauschraten zwischen 1 und 630 % (Kap. II 3.2). Da für die nachfolgenden Untersuchungen nur Jahresdurchschnittswerte für ^{14}C zur Verfügung stehen (Anhang 1, Kap. II 2.4), können Austauschraten von > 100 % nicht beurteilt werden. Eine weitere Einschränkung auf Grundlage des derzeitig vorliegenden Forschungsstandes erscheint nicht möglich. In Tabelle 11 werden daher für 24 ausgewählte Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1 und 66 % die Verweilzeiten t_C und die sich daraus ergebenden HWZ_{bio} angegeben. Jede dieser Raten wird bei der nachfolgenden Untersuchung

zu berücksichtigen sein. Änderungen von 0,5 Prozentpunkten nehmen dabei auf die Verweilzeit und besonders auf die HWZ_{bio} einen unterschiedlich starken Einfluss, wobei ab einer Rate von 8 % zunehmend größere Abstände zwischen zwei Raten tolerierbar sind.

Tabelle 11: Zusammenstellung der Austauschraten ($1/t_C$), Verweilzeiten t_C sowie biologischen Halbwertzeiten (HWZ_{bio}, 0,693 x t_C) von Kohlenstoff im Knochenkollagen.

Austausch-rate $1/t_C$ (%)	Verweil-zeit t_C (Jahren)	HWZ_{bio} (Jahren)	Austausch-rate $1/t_C$ (%)	Verweil-zeit t_C (Jahren)	HWZ_{bio} (Jahren)	Austausch-rate $1/t_C$ (%)	Verweil-zeit t_C (Jahren)	HWZ_{bio} (Jahren)
1,0	100,0	69,3	5,0	20,0	13,9	10,0	10,0	6,9
1,5	66,7	46,2	5,5	18,2	12,6	12,5	8,0	5,5
2,0	50,0	34,6	6,0	16,7	11,6	15,0	6,7	4,6
2,5	40,0	27,7	6,5	15,4	10,7	20,0	5,0	3,5
3,0	33,3	23,1	7,0	14,3	9,9	25,0	4,0	2,8
3,5	28,6	19,8	7,5	13,3	9,2	40,0	2,5	1,7
4,0	25,0	17,3	8,0	12,5	8,7	50,0	2,0	1,4
4,5	22,2	15,4	9,0	11,1	7,7	66,0	1,5	1,0

Anzumerken ist, dass die in dieser Arbeit verwendeten Austauschraten somit *nicht* mit den in der Literatur zur ^{14}C-Methode (Kap. II 3.2) bereits ausgewiesenen Raten identisch sind. Denn es wird versucht, das Skelettwachstum durch einen unabhängigen Parameter zu beschreiben. Je höher die Austauschrate jedoch ist, um so eher kann dieser Unterschied vernachlässigt werden. Eine Zusammenstellung, wieviel Kohlenstoff in welchen Zeiträumen bei verschiedenen Austauschraten und damit HWZ_{bio} umgesetzt wird, ist Tabelle 12 zu entnehmen. So ergibt sich bei einer Austauschrate von mindestens 8 %, dass bei Individuen ab dem 50. Lj. nur noch etwa 9 % des ^{14}C aus den ersten 20 Lj. vorhanden ist (30 Jahre/8,7 Jahre = 3,45; $100\%/2^{3,45}$ = 9,15 %) bzw. bei einer Austauschrate von mindestens 20 % das Skelett in diesem Zeitraum theoretisch komplett umgebildet wurde (100 % – $100\%/2^{8}$ = 99,6%; 8 x 3,5 Jahre = 28 Jahre). Bei einer Austauschrate von 630 % und damit einer Verweilzeit von nur ca. 60 Tagen sollten nach einem Jahr fast 100 % des aufgenommenen ^{14}C ersetzt sein (1 Jahr/0,11 Jahre = 9,09; 100 % – $100\%/2^{9,09}$ = 99,8 %). Bei Vernachlässigung von Reservoir-Effekten (Kap. II 2.2) sollten im Gewebe die Werte aus der Atmosphäre des jeweiligen Kalenderjahres bzw. während der Vegetationszeit sogar des jeweiligen Kalendermonats gemessen werden. Letzteres ist aber bei der Verwendung von Jahresdurchschnittswerten für ^{14}C nicht nachzuweisen. In Abhängigkeit von der HWZ_{bio} wird ^{14}C in unterschiedlichen Zeiträumen im Kollagen umgesetzt. In Tabelle 12 sind für 13 Austauschraten entsprechende Angaben zusammengestellt.

Tabelle 12: Vollständiger ^{14}C-Austausch (in Jahren) in Abhängigkeit von der Anzahl (n) biologischer Halbwertzeiten (HWZ_{bio}) für verschiedene Austauschraten von Kohlenstoff ($1/t_C$) von 1 bis 630 % im Knochenkollagen.

n	Austausch von x % nach n x biol. HWZ	Vollständiger ^{14}C-Austausch (in Jahren) bei Austauschraten von 1 bis 630 %												
		1%	3,5%	6%	8%	10%	12,5%	15%	20%	25%	40%	50%	66%	630%
1,0	50,00%	69,30	19,80	11,55	8,66	6,93	5,54	4,62	3,47	2,77	1,73	1,39	1,05	0,11
1,5	64,64%	103,95	29,70	17,33	12,99	10,40	8,32	6,93	5,20	4,16	2,60	2,08	1,58	0,17
2,0	75,00%	138,60	39,60	23,10	17,33	13,86	11,09	9,24	6,93	5,54	3,47	2,77	2,10	0,22
2,5	82,32%	173,25	49,50	28,88	21,66	17,33	13,86	11,55	8,66	6,93	4,33	3,47	2,63	0,28
3,0	87,50%	207,90	59,40	34,65	25,99	20,79	16,63	13,86	10,40	8,32	5,20	4,16	3,15	0,33
4,0	93,75%	277,20	79,20	46,20	34,65	27,72	22,18	18,48	13,86	11,09	6,93	5,54	4,20	0,44
5,0	96,88%	346,50	99,00	57,75	43,31	34,65	27,72	23,10	17,33	13,86	8,66	6,93	5,25	0,55
6,0	98,44%	415,80	118,80	69,30	51,98	41,58	33,26	27,72	20,79	16,63	10,40	8,32	6,30	0,66
7,0	99,22%	485,10	138,60	80,85	60,64	48,51	38,81	32,34	24,26	19,40	12,13	9,70	7,35	0,77
8,0	99,61%	554,40	158,40	92,40	69,30	55,44	44,35	36,96	27,72	22,18	13,86	11,09	8,40	0,88

Beispiel: Bei einer Austauschrate von 6 % erfolgt in 3 biologischen Halbwertzeiten (HWZ_{bio}, n = 3) ein Umsatz von 87,5 % (100% - 100%/2^3)
Dieser Austausch erfolgt innerhalb von 3 x ln 2 x 1 / 0,06 = 34,65 Jahren.

II 5.6 Schlussfolgerungen

In der Literatur findet sich eine umfangreiche und z. T. kontrovers geführte Diskussion zu den einzelnen Einflussfaktoren auf die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ und den Knochenumbau. Diese Diskussion wurde hier unter eher allgemeinen Gesichtspunkten und im Hinblick auf die Beschreibung des Kohlenstoffaustausches im Knochen aufgegriffen. Gleichzeitig kann wegen der äußerst umfangreich zur Verfügung stehenden Literatur in keiner Weise ein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Vielmehr sollte auf Probleme schlaglichtartig aufmerksam gemacht werden. An dieser Stelle werden diese übersichtlich mit ihren Zusammenhängen dargestellt (Abb. 13 a, in Ergänzung von Abb. 5 b):

Die Beziehung zwischen den Merkmalen *Skelettlänge, -proportionen* einschließlich *-robustizität* einerseits und der Skelettmasse andererseits stellt sich einleuchtend dar. Jedoch werden in der Literatur diese Faktoren zu selten beachtet und finden vorwiegend über das Merkmal *Rasse* Eingang in die Diskussion. Gleichzeitig wurde das mit der Rasse ‚verwandte' Merkmal *Körperbautyp* nur ungenügend und eher indirekt über dieses und zusätzlich über die Merkmale *Geschlecht* und *Alter* in der Literatur berücksichtigt: So zeigen

Frauen im Vergleich zu Männern einen kindlicheren und pyknischeren Körperbautyp, das heißt, sie sind von grazilerem Skelettbau und haben im Verhältnis zur Körperlänge kürzere Gliedmaßen.

Weiterhin stellt die enge Beziehung von Rasse und Körperbautyp einerseits und *sozio-ökonomischen Faktoren* anderseits ein Problem dar, die zu einer unüberschaubaren Flut an Literatur führte. Dazu trugen vor allem zwei unterschiedliche Aspekte bei:

Ein Grund liegt – und nicht zuletzt beim Rasse-Begriff – in der Vermengung von ungenügend kommunizierten wissenschaftlichen Konzepten zwischen den einzelnen Skelettwissenschaften. Das beinhaltet auch ein Zurückgreifen auf ältere und z. T. überholte Erkenntnisse in Zitationsbäumen zwischen benachbarten Wissensgebieten und ihre teilweise umgangssprachlich bis politisch gefärbte Anwendung.

Ein zweiter Grund ist in den zur Verfügung stehenden Methoden zur Skelettmasse-Bestimmung selbst zu sehen. Diese sind weder präzise noch sensitiv genug, die geringen Veränderungen im Skelett vor allem nach dem 2. Ljz. für kurze Zeitintervalle zu erfassen. Daraus erklärt sich das Vorherrschen von Querschnittstudien sowie Fall-Kontroll- und Kohorten-Studien. Jedoch sind die Fallzahlen oft recht klein und selbst die wichtigsten Einflussfaktoren werden in den einzelnen Studien nur ungenügend erhoben. Gleichzeitig ermöglichen vor allem die indirekten und nicht-invasiven Methoden nur in unterschiedlichem Umfang, Knochenwachstum, -modellierung und -umbau als eigenständige Prozesse zu erfassen, die jeweils nur anteilig und zum Teil gegensätzlich an der Masse-Entwicklung beteiligt sind.

Weiterhin bedarf jede zu erarbeitende Methode eines Studienkollektivs. Mit diesem tritt jedes nachfolgend mit dieser Methode untersuchte Individuum in ‚Beziehung' – und ist fast immer zu dem im Modell angegebenen Durchschnitt bzw. Referenzwert entwicklungsbeschleunigt oder -verzögert. Wie sich diese Beschleunigung bzw. Verzögerung im Vergleich zum Durchschnitt darstellt, wird durch das Geschlecht, sozioökonomische und andere Faktoren zusätzlich beeinflusst und wirkt sich auf das ‚Alter' eines Individuums aus, die sich als Abweichung zwischen seinem chronologischen und dem mit dieser Methode bestimmten (biologischen) Alter darstellt, oder es führt z. B. zu der Unterscheidung von gesund bzw. krank .

Methodisch bedingt erfolgt die Berechnung der Skelettmasse sehr häufig nur an Teilen des Skelettes, teilweise sogar nur an Teilen eines Knochens. Auch die Probenentnahme für die ^{14}C-Bestimmung im Knochengewebe und die Interpretation der Messwerte – dem nicht

aus den Augen zu verlierenden Ziel dieser Arbeit – erfolgt an konkreten Fragmenten. Wünschenswert wäre es daher, das Alter als biologisches Alter und zwar als Gewebealter für das jeweils zur Verfügung stehende Fragment anzugeben. Dies ist aber bei dem derzeit vorliegenden Forschungsstand nicht möglich.

Wenn Bezug auf die Skelettmasse-Entwicklung und die Austauschrate gesunder Individuen genommen wird, muss geschaut werden, wie diese in der Anthropologie beschrieben werden, also der Wissenschaft, die sich mit der *Variabilität* des Menschen in Zeit und Raum befasst und versucht, das *Typische* oder *Normale* quantitativ zu beschreiben. Es wurde im Zuge der geführten Diskussion deutlich, wie ungenügend sich diese Grundlagen darststellen. Doch muss dies nicht zum Scheitern des vorliegenden Projektes führen, da sich die benannten Einflussgrößen sowohl anthropologisch als auch im Hinblick auf das Anliegen dieser Arbeit sinnvoll zusammenführen lassen. Als Fazit ist festzuhalten (Abb. 13 b):

Erstens implizieren Entwicklungsprozesse den Einfluss von Zeit. Diese wird bei der $Skelettmasse_{netto}$ und weniger deutlich bei der Austauschrate mit dem Alter des Individuums erfasst. Abweichungen zwischen chronologischem und biologischem Alter ergeben sich durch unterschiedliche Entwicklungstempi in den Skelettregionen und den Einzelknochen (intraindividuelle Variabilität) bzw. Teilen desselben (Gewebealter). Dies stellt sich als Unterschied zwischen dem konkret untersuchten Teil eines Individuums und dem in der Referenzserie berechneten Durchschnitt für das entsprechende Alter dar. Der Einfluss der Methode muss daher so gering wie möglich gehalten werden und sollte daher keine Spezialanwendung darstellen. Beim späteren Einsatz der Methode, wie hier zur Liegezeitbestimmung von Knochen, sollte diese möglichst für Fragmente vorgenommen werden, anhand derer die Methode entwickelt wurde bzw. die diesen weitestgehend entsprechen.

Zweitens kann ein Großteil der zu beobachtenden Variabilität neben dem Alter dem Geschlecht zugewiesen werden, welches Einfluss auf den Zeitpunkt des Eintretens eines Individuums in einen Entwicklungsabschnitt sowie dessen Länge nimmt, also den Entwicklungsprozess modifiziert und damit qualitativ wirksam wird. Wie groß die verbleibende Variabilität innerhalb einer Geschlechts- und Alterskohorte sein kann, wurde anhand der körperlichen Entwicklung zum Eintritt in die Pubertät (Kap. II 5.4.2 Abb. 7) dargestellt.

Drittens bestimmen alle anderen bekannten Einfluss- oder unbekannten Störgrößen die interindividuelle Variabilität der Individuen zu einem Zeitpunkt. Wie groß sich diese darstellt, ist von der untersuchten Zielgröße – z. B. der $Skelettmasse_{netto}$ – und dem Zeitpunkt der Betrachtung abhängig. Denn berücksichtigt man, dass es sich bei dem Material, an dem die

Methode zur Kurzzeitdatierung mit Hilfe von ^{14}C angewendet werden soll, um Skelettfunde handelt, bei denen selbst die Bestimmung von Alter und Geschlecht schon ein Problem darstellen kann, erscheint es sinnvoll, in der zugrundeliegenden Methode nicht zu sehr zwischen Einflussgrößen zu differenzieren, wie hier für das Merkmal Rasse dargestellt, sondern diese als methodisch bedingte interindividuelle Variabilität zuzulassen.

Im Ergebnis dieses Kapitels steht also zur Beschreibung der ^{14}C-Konzentration im Knochengewebe auf Grundlage der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ und der Austauschrate kein differenzierter, sondern ein sehr verallgemeinerter theoretischer Ansatz. Dieser stellt eine Erweiterung der bisherigen ^{14}C-Modelle dar (Kap. II 3.2) und entspricht weitestgehend den für die ^{90}Sr-Methode entwickelten Modellen. Dass damit ein Rückschritt hinter die eigenen Ausgangsüberlegungen erfolgt (Kap. II 5.1, Kap. II 5.2), mag ein richtiger Eindruck sein. Doch spiegelt dieser den gegenwärtigen und sich auch mittel- bis langfristig nicht ändernden Forschungsstand wider. Die Tragfähigkeit dieser Überlegungen wird sich in der Anwendung der ^{14}C-Methode zur Kurzzeitdatierung von Skelettfunden herausstellen.

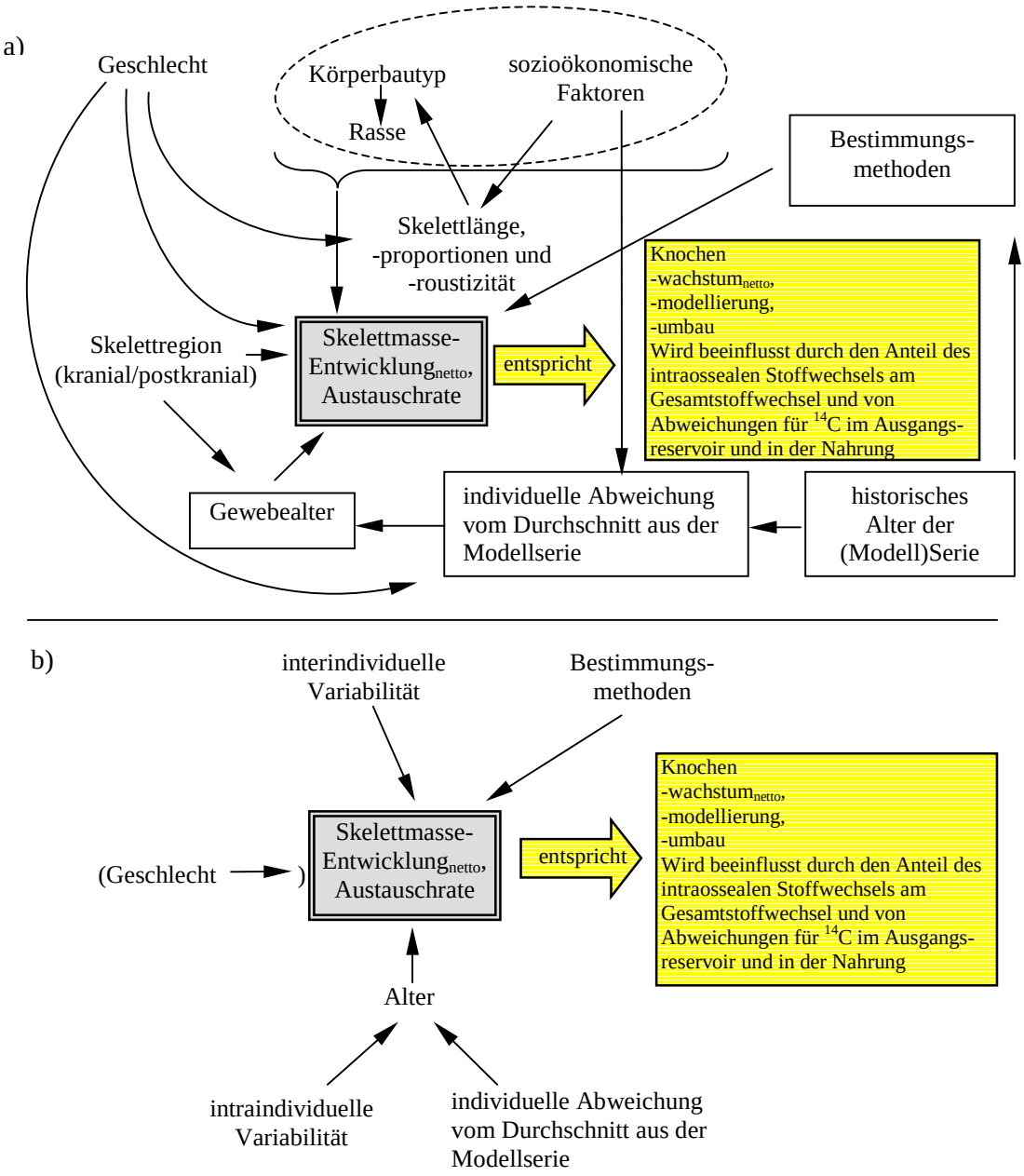


Abbildung 13: Beziehungsdiagrmm zwischen Einflussfaktoren und Skelettmasse (Entwicklung$_{netto}$ und Umbau) im Ergebnis von Knochenwachstum, -modellierung und -umbildung für gesunde Individuen:

a) Beziehungen, zwischen den Einflussfaktoren, wie sich diese in Ergänzung zu Abbildung 5 b und der in diesem Kapitel geführten Diskussion darstellen

b) Reduktion von Darstellung a) auf die Einflussfaktoren, wie diese in einem Modell zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ zu berücksichtigen sind

Rahmen = Zielgröße
– ‚neue' Einflussgrößen
- - - in der Literatur ungenügend berücksichtigte Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen

Kapitel III

Forschungsstand und Aufgabenstellung

Aus dem Mangel einer geeigneten Methode zur Bestimmung der Liegezeit von humanem Knochenmaterial erklärt sich die seit fast zwei Jahrhunderten anhaltende Suche nach objektivierbaren Verfahren. Denn der Zustand der sachverständigen Einschätzung oder des sehr überspitzt formulierten „wissenschaftlichen Ratens" (RHINE 1984, WATSON 1989) kann auch in der forensischen Osteologie auf Dauer nicht zufriedenstellen. Vor diesem Hintergrund ist auch die vorliegende Arbeit zu sehen, die sich erneut der Möglichkeit zuwendet, Radiocarbon für die Kurzzeitdatierung von rezentem Knochenmaterial und damit zur Bestimmung der Liegezeit oder des postmortalen Intervalls (PMI) zu verwenden. Hierfür soll jedoch nicht der radioaktive Zerfall, sondern die durch oberirdische Atombombenabwürfe nach 1950 hervorgerufenen deutlichen Konzentrationsänderungen von ^{14}C in der Atmosphäre genutzt werden. Da es sich beim Menschen um einen langlebigen Organismus handelt, stellen die in den Geweben vorliegenden ^{14}C-Werte gleichzeitig eine über die Lebenszeit des Menschen entstandene „Mischung" aus dem mit der Nahrung aufgenommenen ^{14}C dar. Diese Mischung ist somit abhängig von dem ^{14}C-Angebot und von Stoffwechselprozessen im Knochen. Diesem wesentlichen Unterschied zur klassischen Radiocarbon-Datierung wird mit einer begrifflichen Abgrenzung Ausdruck gegeben: Der hier vorgestellte methodische Ansatz wird als *Forensische Radio-Carbon-Datierung* (forensic radiocarbon dating) oder kurz FoRCaDa bezeichnet.

Die begriffliche Gegenüberstellung von FoRCaDa und klassischer Radiocarbon-Methode beinhaltet mehr, als die relativ einfach zu realisierende und sehr präzise Konzentrationsbestimmung aus humanem Knochengewebe und deren Bewertung in Relation zum ^{14}C-Angebot in der Atmosphäre. Damit verbunden ist vor allem das Abrücken von dem Anspruch, mit der vorliegenden Arbeit ein absolut datierendes physikalisches Verfahren zur Liegezeitbestimmung zu erarbeiten. Denn der postmortal von abiotischen und biotischen Faktoren annähernd unbeeinflusste radioaktive Zerfall findet bei dieser Methode keine Berücksichtigung. Aus der kritischen Sicht der vorliegenden Literatur in Kapitel II wird

deutlich, dass es sich dabei um eine zwar ebenfalls absolut datierende, aber eben physiologische Methode handelt. Im Gegensatz zu den bisher in der Rechtsmedizin angewendeten Methoden erfolgt die Liegezeitbestimmung anhand von ‚Stoffwechselvorgängen', die zu Lebzeiten des Menschen im Knochen selbst abgelaufen sind sowie anhand der Zurordnung zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre aufgrund seiner Lebensdaten. Sie erfolgt nicht anhand von postmortal auftretenden und kaum zu kontrollierenden Einflüssen während der Liegezeit.

Die in der Literatur zur ^{14}C-Methode vorgefundenen Erklärungsmodelle erbrachten eine nur sehr eingeschränkte Übereinstimmung von beobachteten und erwarteten ^{14}C-Konzentrationen (Abb. 2, Kap. II 3.2). Wie diese Modelle den Gegebenheiten besser angepasst werden könnten, ergab sich aus der Literatur zur ^{90}Sr-Methode (Kap. II 3.3) und den physiologisch-biologischen Grundlagen zum Stoffwechsel im Knochen (Kap. II 4). Der Stoffwechsel wird von Auf- und Abbauprozessen im Knochen bestimmt. Deren Komplexität kann offensichtlich nicht, wie bisher in der Literatur zur ^{14}C-Methode üblich, durch eine konstante mittlere Verweilzeit und/oder durch die Berücksichtigung einiger qualitativer Entwicklungsstadien und -sprünge bei der Entwicklung der Knochenmasse ausreichend beschrieben werden. Es erscheint vielmehr notwendig, die Prozesse beim Knochenwachstum, der -modellierung und dem -umbau in ausreichend quantifizierter Form zu erfassen. Allerdings lassen sich aus den Bereichen Anthropologie, Humanbiologie und -medizin keine Studien recherchieren, aus denen diese Angaben unmittelbar entnommen werden können.

Zur Erarbeitung der Methode FoRCaDa ist es somit nicht ausreichend, für eine umfangreiche Stichprobe die Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im Gewebe vorzunehmen. Wie bereits ausgeführt, beinhaltet diese Methode vielmehr die Interpretation der Messwerte im Vergleich zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre als Referenz- bzw. Kalibrierungskurve (Abb. 1, Kap. II 2.4) und zwar unter Berücksichtigung der Stoffwechselvorgänge im Knochen. Diese Methode zu entwickeln, stellt das Ziel dieser Arbeit dar. Dieses Vorhaben lässt sich nur in Teilschritten lösen. Doch bevor diese beschrieben werden, sollen die biologischen und physikalischen Einflussgrößen benannt werden, die wegen ihrer Komplexität und in ihren Wechselwirkungen weder für lebende noch rückwirkend für bereits verstorbene Individuen ermittelt werden können. Sie beeinflussen nachhaltig die Präzision, vor allem aber die Richtigkeit der FoRCaDa und entscheiden damit über die nachfolgende, erfolgreiche Anwendung in der forensischen Routine. Die Einflussgrößen lassen sich mit den Begriffen Reservoir-Effekt, intraindividueller und intraossealer Stoffaustausch sowie chronologisches,

biologisches und Gewebealter mit inter- und intraindividueller Variabilität zwischen Skelettregionen, Einzelknochen und Gewebearten und ihren Abweichungen im Vergleich zu einer durchschnittlichen Entwicklung schlaglichtartig benennen.

Der Mensch nimmt nicht direkt, sondern nur indirekt als Endglied unterschiedlicher Nahrungsketten am globalen Kohlenstoffzyklus teil. Damit werden Prozesse wirksam, die als Reservoir-Effekte beschrieben werden. Die Ernährung unterliegt vielen kulturellen und individuellen Entscheidungen (z. B. Vegetarier, Anteil von Meerestieren oder Konserven in der Nahrung). Deren Rekonstruktion ist im Einzelfall und erst recht postmortal kaum mehr möglich. In der vorliegenden Literatur wurde zwar versucht, die Zusammensetzung einer Durchschnittsnahrung zu erfassen, jedoch wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit dieser Ansatz nicht übernommen. Vielmehr werden die Jahresdurchschnittswerte von ^{14}C in der Atmosphäre für Mitteleuropa berücksichtigt, wie sich diese in der Literatur finden (Kap. II 2.4, Abb. 1). Weiterhin kann mit der ^{14}C-Methode nicht zwischen extraindividuellem und intraindividuellem bzw. sogar intraossealem Stoffwechsel unterschieden werden, so dass die tatsächlich stattfindenden Stoffwechselvorgänge im Gewebe durch die Konzentrationsänderung von ^{14}C nicht vollständig erfasst werden können. Darauf aber kommt es hier auch nicht an.

Es wurde deutlich, dass sich Stoffwechselprozesse nur für das Gesamtskelett erfassen lassen und somit Durchschnittswerte darstellen. Von diesen weicht die Entwicklung eines jeden Knochens mehr oder weniger deutlich ab, was z. B. im Zusammenhang mit dem jeweiligen Anteil von Kompakta und Spongiosa im Gewebe zu sehen ist. Dies konnte sowohl durch Arbeiten zur ^{14}C- als auch zur ^{90}Sr-Methode nachgewiesen werden. Gleichzeitig ergibt sich aus dem Längen- und Dickenwachstum sowie aus den Umbauvorgängen im Knochengewebe selbst, dass sich das Gewebealter und das chronologische Alter des Individuums nur selten entsprechen. Durch Wachstumsvorgänge kann es zwischen chronologischem Alter und Gewebealter zu Abweichungen von über 20 Jahren kommen, durch Umbauvorgänge können diese Unterschiede noch erhöht werden. Insgesamt ergibt sich daraus eine hohe intraindividuelle Variabilität. Besondere Bedeutung gewinnen diese Überlegungen, wenn man berücksichtigt, dass in Routinefällen zur Beprobung selten ganze Knochen eingesetzt werden und mit der AMS-Technik gleichzeitig eine materialsparende Beprobungsmethode zur Verfügung steht, bei der die erwünschten Ergebnisse zudem wesentlich schneller vorliegen. Daher sollten kompaktareiche ganze Knochen des postkranialen Skelettes bzw. physiologisch gleichwertige Anteile derselben der Beprobung zuge-

führt werden, um die genannten Einflüsse so gering wie möglich zu halten. Bei Beachtung dieses Vorgehens erscheint es unwichtig, welche Methode (AMS oder Zählrohr) zur Konzentrationsbestimmung von ^{14}C im Gewebe gewählt wird.

In der klassischen Radiocarbon-Methode wird aus Knochengewebe vorzugsweise Kollagen extrahiert, die organische extrazelluläre Substanz. Als weniger geeignet wird Apatit angesehen, die anorganische extrazellulare Substanz, weil es sich unter Liegebedingungen als recht anfällig für Kontamination darstellte. Es wird daher vorrangig Kollagen beprobt, bei einigen Individuen zusätzlich jedoch auch Proben von Apatit und Fett, so dass ein Vergleich mit entsprechenden Literaturdaten vorgenommen werden kann.

Es wird weiterhin über die gesamte Lebensspanne, für beide Geschlechter und in allen Knochengeweben ein konstantes Verhältnis von Kollagen und Apatit untereinander und zu anderen Zellbestandteilen angenommen, welches in dieser verallgemeinerten Annahme nicht gegeben ist und sich z. B. in der primären und sekundären Mineralisation sowie der zunehmenden Sprödigkeit des Knochengewebes zu erkennen gibt. Eine Quantifizierung dieser Verhältnisse ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht möglich.

Zur Aufnahme von ^{14}C in das Skelett führen zu Lebzeiten eines Individuums Prozesse des Knochemwachstums, der -modellierung und des -umbaus. Bis zum Abschluss der Geschlechtsreifung und des Längenwachstums zur Mitte des dritten Lebensjahrzehnts bewirken Knochenwachstum und -modellierung mit einer insgesamt positiven Bilanz die Zunahme der Skelettmasse und überlagern fast vollständig die Effekte der ebenfalls stattfindenden Umbildungsprozesse. Ab Mitte des dritten Lebensjahrzehnts sind dagegen die Veränderungen der Skelettmasse fast ausschließlich auf Modellierungs- und Umbauprozesse mit ihrer insgesamt negativen Bilanz zurückzuführen. Bei dem sich in der Literatur darstellenden Forschungsstand lassen sich diese komplexen Vorgänge nur zu zwei Parametern zusammenfassen, auf deren Grundlage das Modell FoRCaDa entwickelt wird. Bei diesen Parametern handelt es sich um die j*ährliche relative Änderung der Skelettmasse ΔSM* auf Grundlage der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ und um die j*ährliche Austauschrate von Kohlenstoff im Knochengewebe* $1/t_C$. Diese zwei Parameter lassen sich der vorhandenen Literatur ebenfalls nicht in ausreichend quantifizierter Form entnehmen. Unter Berücksichtigung der vorausgeschickten allgemein-einschränkenden Bedingungen ist aber die Erarbeitung nach folgenden Teilaufgaben möglich:

(1) Zusammenstellen einer Stichprobe von ^{14}C-Werten für humanes Knochengewebe (Kollagen, Apatit, Fett) aus Literaturdaten und eigenen Gewebeproben

(2) Zuordnung der Messwerte zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre und Selektion von Einflussgrößen auf die gemessenen ^{14}C-Konzentrationen, wie z. B. Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Skelettregion, Geschlecht

(3) Berechnung der jährlichen relativen Skelettmasseänderung ΔSM auf Grundlage einer auf Literaturdaten basierenden ausreichenden Erfassung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ getrennt für Männer und Frauen:

- Von der Geburt bis zum Wachstumsabschluss und
- Vom Wachstumsabschluss bis zum Lebensende

(4) Formulierung des Modells FoRCaDa zur Berechnung von ^{14}C-Werten unter Bezugnahme auf:

- Die zu Lebzeiten eines Individuums vorliegenen ^{14}C-Werte in der Atmosphäre
- Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse ΔSM und
- Die jährliche Austauschrate von Kohlenstoff im Knochenkollagen $1/t_C$

(5) Vergleich von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten und Bewertung der Ergebnisse

(6) Erste Überprüfung der FoRCaDa durch den Vergleich von gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten und Methodenkritik.

Die Methode der forensischen Radio-Carbon-Datierung FoRCaDa stellt sich somit als ein Verfahren dar, welches viel stärker physiologischen (biologischen) als physikalischen Methoden ähnelt. Es muss daher mit einer wesentlich größeren interindividuellen Variabilität bei den ^{14}C-Messwerten gerechnet werden, als zu Beginn der Methodenerarbeitung im Jahr 1991 erhofft wurde und sich auch gegenwärtig noch in der Literatur findet (WILD ET AL. 2000, LYNNERUP ET AL. 2005). Es wird sich zeigen müssen, ob durch den hier verfolgten Ansatz diese Variabilität ausreichend erfasst und interpretiert werden kann, so dass unter kalkulierbaren methodischen Unsicherheiten und Kosten eine differenziertere Liegezeitbestimmung von humanem Skelettmaterial auch nach 1950 möglich wird und den bisherigen qualitativen Vorgehen überlegen ist.

Kapitel IV

Material und Methoden der FoRCaDa

Inhaltsverzeichnis

IV		Material und Methoden der FoRCaDa	153
IV	1	Material und Methoden zur Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe	155
IV	1.1	Einführung	155
IV	1.2	Die Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen: Zusammensetzung und Deskription der Einzelproben	158
IV	1.2.1	Alter und Geschlecht	159
IV	1.2.2	Sterbejahr, Alter und Geburtsjahr	161
IV	1.2.3	Pathologien, Skelettregion, Fragmentationsgrad, Kompakta vs. Spongiosa	163
IV	1.3	Die Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im Apatit: Zusammensetzung und Deskription der Einzelproben	164
IV	1.3.1	Alter und Geschlecht	165
IV	1.3.2	Sterbejahr, Alter und Geburtsjahr	165
IV	1.3.3	Skelettregion, Kompakta vs. Spongiosa	167
IV	1.4	Die Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im Knochenfett: Die Einzelproben	167
IV	1.5	Angewendete Messverfahren und Methoden der Probenaufbereitung zur Bestimmung von ^{14}C im Knochen	168
IV	1.5.1	Proportionalzählrohre	168
IV	1.5.2	Teilchenbeschleuniger (Akzelerator-Massen-Spektrometrie, AMS)	169
IV	1.5.3	Methoden der Probenaufbereitung	170
		Mechanische Aufbereitung	170
		Apatit	171
		Kollagen	172
		Fett	173
IV	2	Das Material zur Bestimmung der jährlichen relativen Skelettmasse-Änderung (ΔSM)	174
IV	2.1	Einführung	174
IV	2.2	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$	175
IV	2.2.1	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ von der Geburt bis zum 3. Ljz. (0 bis 22,5 Jahre)	175
IV	2.2.2	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ ab dem 3. Ljz. (20,5 bis 83,5/84,5 Jahre)	177

IV	3	Methoden der Statistik	180
IV	3.1	Einführung	180
IV	3.2	Auswahl von Einflussgrößen auf die ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe	184
IV	3.2.1	Der Einfluss von Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Pathologie und Skelettregion auf die ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen	186
IV	3.2.2	Der Einfluss der Gewebefraktion, der Aufbereitungsmethode und der Gewebeart auf die ^{14}C-Konzentration im Knochen	189
IV	3.3	Die Bestimmung der jährlichen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$	189
IV	3.3.1	Beurteilung der Homoskedastizität	189
IV	3.3.2	Selektion von Einflussgrößen auf die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$	191
IV	3.3.3	Die Modellierung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ in Abhängigkeit von Geschlecht und Alter	194
IV	3.3.4	Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse (ΔSM)	195
IV	3.3.5	Auswahl des bestgeeigneten Polynoms für Individuen ab 20,5 Jahre	196
IV	3.4	Entwicklung, Überprüfung und Beurteilung des Modells FoRCaDa	197
IV	3.4.1	Entwicklung des Modells FoRCaDa	198
IV	3.4.2	Präzisierung und Überprüfung des Modells FoRCaDa	200
IV	3.4.3	Beurteilung des Modells FoRCaDa	202

IV 1 Material und Methoden zur Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe

IV 1.1 Einführung

Mit den Vorarbeiten zu der vorliegenden Arbeit wurde 1990 begonnen. In einem Rundbrief an Institute für Rechtsmedizin und für Anatomie wurde das Anliegen dieser Studie skizziert und um nicht mehr benötigte Knochenproben gebeten. Der Rücklauf betrug insgesamt 110 Asservate*. Es wurden Proben einbezogen, bei denen die Angaben zu Geschlecht und Geburts- und Sterbedatum, ggf. Auffindungsdatum mit bekannter oder vermuteter Leichen- oder Liegezeit vorlagen. Zusätzlich wurden Informationen zur Todesursache, zu Pathologien, zur Technik der Mazeration und Präparation sowie einer genauen Beschreibung des Skelettelementes erhoben. Im Anhang 12 findet sich eine Auflistung der erhobenen Merkmale. Ausschlaggebend für die Auswahl zur Beprobung aus den verfügbaren 110 Asservaten waren fünf Kriterien, wobei in unsicheren Fällen alle anderen Bedingungen der ersten Forderung untergeordnet wurden:

(1) *Altersstruktur:* Die Individuen der Altersklassen infantil, juvenil, adult, matur und senil sollten mit möglichst unterschiedlichen Geburts- bzw. Sterbedata vertreten sein. Alter wie Liegezeit mussten bekannt sein

(2) *Pathologien:* Die Knochenprobe sollte von einem möglichst gesunden, zumindest nicht chronisch kranken Individuum stammen. Es durften am Knochen keine Hinweise auf entzündliche Prozesse erkennbar sein bzw. sollten sich diese als lokal abgrenzbare Prozesse, wie bei Brüchen oder operativen Eingriffen mit nachfolgenden Heilungsprozessen, erkennen lassen

(3) *Geschlecht:* Das Geschlecht musste bekannt und nicht diagnostiziert sein und es sollten möglichst gleichviele Proben von Frauen bzw. Männern berücksichtigt werden

(4) *Skelettregion:* Es sollten Fragmente des kranialen bzw. des postkranialen Skelettes berücksichtigt werden

(5) *Fragmentationsgrad:* Das Knochenfragment sollte repräsentativ für den Einzelknochen sein, d. h., es sollte sich bei den Langknochen um die Längshälfte bzw. ein -viertel bzw. um die distale oder proximale physiologische Diaphysenhälfte handeln.

* Die Proben stammen aus nachfolgenden Einrichtungen:
Institut für Rechtsmedizin der Universität Düsseldorf
Institut für Rechtsmedizin der Universität Erfurt
Institut für Rechtsmedizin der Universität Jena
Institut für Rechtsmedizin der Universität München
Institut für Rechtsmedizin der Universität Ulm
Abteilung Anthropologie/Erbbiologische Beratungsstelle der Universität Ulm
Institut für Rechtsmedizin der Universität Würzburg

Weiterhin wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Es interessierten Messproben von Menschen mit einem Sterbejahr nach 1950, von denen die gemessene ^{14}C-Konzentration für Kollagen, Apatit oder Fett, das Alter, das Geschlecht und ggf. die Skelettregion bekannt waren. Die Literaturrecherche ergab 8 Arbeiten (LIBBY ET AL. 1964, BERGER UND LIBBY 1967, L'ORANGE UND ZIMEN 1968a, 1969a, HARKNESS UND WALTON 1972, STENHOUSE UND BAXTER 1977b, ROM ET AL. 1998, WILD ET AL. 2000).

Insgesamt konnten von 88 Individuen 99 Messwerte für Kollagen zusammengetragen werden. Für 29 Kollagenproben wurden parallel auch Apatitproben und 6 Fettproben gemessen. Diese werden in Kapitel IV 1.3 und IV 1.4 kurz beschrieben (Anhang 13 bis 16).

Bei den 99 Kollagenproben handelt es sich um 62 eigene und 37 Literatur-Werte (Anhang 13). Alle Proben werden nachfolgend nur noch mit ihrer Identifikations-Nummer (ID) entsprechend dieser Tabelle bezeichnet. Nach der Zusammenstellung der Messwerte lassen sich 3 qualitativ recht unterschiedliche Gruppen benennen:

(1) *Gruppe 1 (prämoderne und forensische Fälle; ID 1 bis 18):* Hierbei handelt es sich um Proben, die dem Routinefall forensischer Arbeit entsprechen. Es handelt sich um Skelett- oder Knochenfunde, die in einem ungewöhnlichen Fundzusammenhang auftraten. Nur ID 2 kann anhand des ^{14}C-Wertes eindeutig im Sinne von TAYLOR (1989, S. 1200) als nicht-modern/historisch (vor 1650) klassifiziert werden. Für alle anderen Proben lässt sich anhand der ^{14}C-Werte ein Sterbedatum kurz nach 1950 (ID 1, 3 bis 5 und 12) nicht ausschließen. Denn für diese Proben wäre bei Vernachlässigung des radioaktiven Zerfalls und der Interpretation der gemessenen ^{14}C-Konzentration allein im Vergleich mit der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre auch eine Zuordnung kurz nach 1950 möglich (vgl. Kap. II 2.2). Für ID 1 ergibt sich eine prämoderne Zuordnung allein aus dem Befund (Fundzusammenhang: Grabauflassung eines Friedhofes).
Für die Proben mit einer ^{14}C-Konzentration deutlich über 100 % muss dagegen von einem Sterbejahr nach 1950 ausgegangen werden. Sie besitzen somit eine hohe forensische und eventuell strafrechtliche Relevanz. Da dieser Zeitraum auch schon wieder über 50 Jahre umfasst, ist diese Zuordnung nicht ausreichend. Diese Gruppe wurde nicht zur Erarbeitung, sondern eher zur Überprüfung der ^{14}C-Methode FoRCaDa in die Arbeit aufgenommen.
ID 12 bis 14 wurden nicht am ^{14}C-Labor in Hannover gemessen, sondern ihre Bearbeitung erfolgte an der ETH Zürich mit Hilfe der AMS-Methode. Bei ID 15 bis 18 handelt es sich um Literatur-Werte, die am ^{14}C-Labor in Wien ebenfalls mit der AMS-Methode gemessen wurden.

(2) *Gruppe 2 (Sektionsmaterial, Literaturdaten; ID 19 bis 51):* Hierbei handelt es sich durchweg um Literaturdaten, für die Sterbealter und -datum und ab ID 23 auch das Geschlecht bekannt sind. Die Literaturquelle, die Probenart (Knorpelkollagen, Kompakta bzw. Spongiosa) und evtl. pathologische Befunde wurden im Kommentar vermerkt. Lagen mehrere Messungen für ein Individuum vor, wurden diese mit a) und b) in der Institutsnummer gekennzeichnet.
Bei ID 36 handelt es sich um den Mittelwert aus den Messwerten für ID 27 bis 35. Wurden für dasselbe Individuum auch andere Gewebefraktionen (Apatit und Fett)

beprobt, wurde dies mit einem bzw. mit bis zu drei Sternen nach der Probennummer gekennzeichnet.

(3) *Gruppe 3 (Asservate, eigene Proben; ID 52 bis 99):* Hierbei handelt es sich um eigene Messungen, die am ^{14}C-Labor in Hannover durchgeführt wurden. Die Auswahl der Proben erfolgte aus der insgesamt 110 Proben umfassenden Materialsammlung. Ziel war es, die ^{14}C-Kurve der Atmosphäre gleichmäßig mit gesunden Individuen beiderlei Geschlechts für unterschiedliche Sterbe- und Geburtsjahre und Sterbealter und unter Berücksichtigung der vorliegenden Literaturdaten zu begleiten.

Die 99 Proben wurden 13mal dem kranialen, 74mal dem postkranialen, 2mal dem kranialen und postkranialen Skelett entnommen und 10mal war die Skelettregion den Literaturangaben nicht zu entnehmen. Für 94 der vorliegenden 99 Proben war das Geschlecht bekannt bzw. konnte anthropologisch bestimmt werden, wobei 61 männlich, 4 eher männlich, 2 unbestimmt, 2 eher weiblich und 25 weiblich waren. Der nachfolgenden Tabelle 13 ist zu entnehmen, wie sich die 99 Proben nach Sterbe- bzw. Auffindungsjahr, Alter und Geburtsjahr verteilen. Angegeben werden in dieser wie in den nachfolgenden Tabellen folgende statistischen Parameter: Vorhandene Werte (n), fehlende Werte (nMiss), Mittelwert (MW), Standardabweichung (s), Minimum (Min), 1. Quartil (Q1), Median, 3. Quartil (Q3) und Maximum (Max; vgl. Kap. IV 3.1). Die unvollständigen Datensätze gehören alle in die Gruppe 1, also zu den forensischen bzw. prämodernen Fällen.

Tabelle 13: Das Sterbe- bzw. Auffindungsjahr, Alter und Geburtsjahr der 99 für Knochenkollagen vorliegenden Datensätze: 62 eigene Proben und 37 Literaturdaten.

	n	nMiss	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Sterbe- bzw. Auffindungsjahr	99	0	1979,7	12,2	1928	1968	1983	1991	1995
Alter	83	16	46,3	23,4	0	24,0	46,0	65,0	88
Geburtsjahr	85	14	1929,4	28,6	1869	1903	1937	1955	1975

IV 1.2 Die Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen: Zusammensetzung und Deskription der Einzelproben

In die Auswertung zur Selektion von Einflussfaktoren auf die gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen (Punkt 2 der Aufgabenstellung in Kap. III) und teilweise auch in die Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten (Punkt 5 der Aufgabenstellung in Kap. III) werden nicht alle 99 Kollagenproben einbezogen:

- Es werden alle Proben ausgeschlossen, bei denen die Angaben zum Alter oder dem Geburtsdatum bzw. Sterbedatum oder das Geschlecht nicht bekannt waren oder letzteres anthropologisch mit „unbestimmt“ angegeben wurde (ID 2 bis 18)
- Es sich beim Probenmaterial um Knorpelkollagen handelt (ID 19 bis 22)
- Die beiden Wiederholungsmessungen ID 25 und 26 für eine 20jährige Frau nach L'ORGANGE UND ZIMEN (1968a) gehen mit dem Mittelwert (als ID 100 geführt) für die 2 gemessenen ^{14}C-Werte ein (da die Standardabweichung für beide Messungen gleich groß ist, kann dieser Mittelwert ungewichtet berechnet werden, ansonsten müsste die Formel 12, Kap. IV 3.2, nach GEYH 1983 angewendet werden). Aus der Probenbeschreibung geht leider nicht deutlich hervor, worin die „Wiederholung“ besteht (gleiche oder andere Gewebeprobe bzw. gleiches oder anderes Skelettelement, Wiederholungsmessung derselben Probe)
- Die Probe ID 36 wird ausgeschlossen, da es sich um den Mittelwert aus den 8 Messwerten der Proben ID 28 bis 35 handelt
- Die von L'ORANGE UND ZIMEN (1969a) gemessenen ^{14}C-Werte für Spongiosa werden nur eingeschränkt berücksichtigt (ID 38, 40, 42, 44, 46, 48). Die erkennbaren Unterschiede in den ^{14}C-Werten für Kompakta und Spongiosa eines Individuums verdeutlichen die bereits diskutierten Probleme zur Probengewinnung und werden erneut in den Kapiteln V 1.3.2 und VI 1.3.2 aufgegriffen
- Die Proben ID 94 und 95 werden ausgeschlossen, da es sich um eine Zweit- und Drittmessung an Teilfragmenten zu ID 96 handelt. Diese drei Proben werden in Kapitel V 1.3.3 dargestellt und in Kapitel VI 1.3.3 im Zusammenhang mit dem Einfluss des Gewebealters diskutiert.

Somit kommen maximal 66, nämlich 47 eigene Messwerte und 19 Literaturdaten, in die beiden Auswertungen: Eine Probe (2 %) gehört in Gruppe 1, 19 Proben (29 %) in Gruppe 2 und 46 Proben (70 %) in Gruppe 3. Nachfolgend wird jedoch nicht mehr zwischen diesen drei Gruppen unterschieden.

IV 1.2.1 Alter und Geschlecht

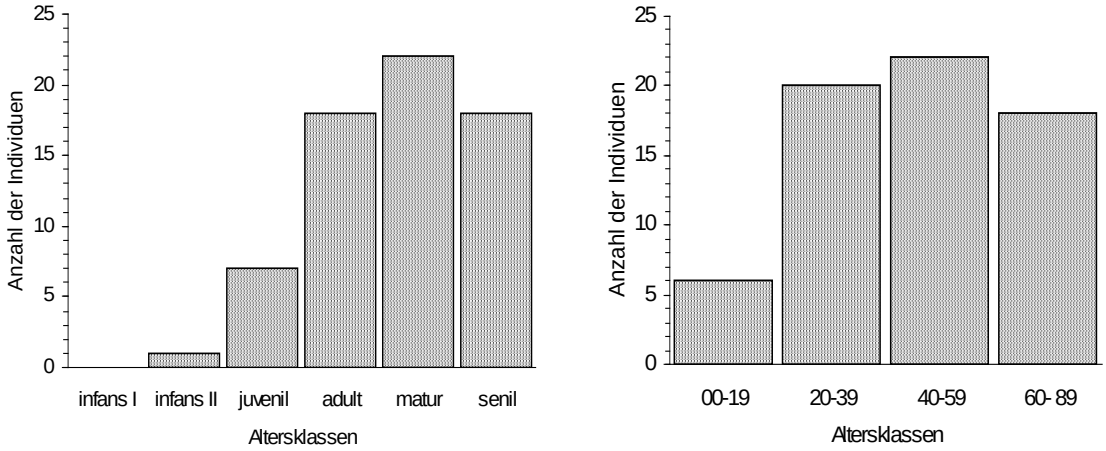
Bei der stetigen Einflussgröße ‚Alter' handelt es sich bei identifizierten Individuuen um das chronologische Alter, bei nicht identifzierten Individuen entsprechend um ein biologisches Alter. Wenn nachfolgend vom Alter gesprochen wird, bedeutet dies, dass zwischen beiden Altern nicht differenziert wird. Wie wie Tabelle 14 zu entnehmen ist, ergibt sich für das Alter eine annähernd symmetrische Verteilung.

Tabelle 14: Das Alter der 66 für Knochenkollagen zur Auswertung vorliegenden Datensätze: 47 eigene Proben und 19 Literaturdaten.

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Alter	66	47,0	20,8	9	30,0	46,0	65,0	88

Klassiert man das Alter der Individuen nach anthropologischen Entwicklungsstufen mit ungleich großen Klassenbreiten in infans I (0-6 Jahre), infans II (7-12 Jahre), juvenil (13-21 Jahre), adult (22-39 Jahre), matur (40-59 Jahre), senil (≥ 60 Jahre) oder vereinfacht in 20-Jahres-Klassen, so zeigt sich deutlich: Die Altersstruktur ist nicht optimal (Abb. 14 a, b). Die Stichprobe wird deutlich von Individuen (n = 40, 61 %) dominiert, die mindestens 40 Jahre alt sind. Kinder der Alterstufe infans I fehlen vollständig. Demgegenüber wäre eine linksgipflige Verteilung der Proben wünschenswert gewesen, da gerade die frühen Lebensabschnitte durch komplexe und sich überlagernde Entwicklungs- und Reifungsprozesse geprägt sind, die eine breitere (aber eben nicht zu realisierende) Datenbasis erfordert hätten:

So stammen die 66 Proben von 18 Frauen (23 %) und 48 Männern (69 %), die über die Altersgruppen nicht gleichmäßig verteilt sind, wie Tabelle 15 zu entnehmen ist. Dieses Problem konnte aber im Rahmen dieser Arbeit nicht gelöst werden und leitet sich direkt aus der Herkunft der Proben vor allem aus forensischen Instituten her. Zusammenfassend unterstreicht auch die vorliegende Materialbasis die Beobachtung, dass der unzeitige Tod eher männlich ist.



a) Anthropolgische Entwicklungsstufen b) 20-Jahresklassen

Abbildung 14: Altersstruktur der 66 zur Auswertung vorliegenden Datensätze für Kollagen (47 eigene Proben und 19 Literaturdaten)

a) Klassiert nach den anthropologischen Entwicklungsstufen: infans I (0-6 Jahre), infans II (7-12 Jahre), juvenil (13-21 Jahre), adult (22-39 Jahre), matur (40-59 Jahre), senil (≥ 60 Jahre)

b) Klassiert in 20-Jahres-Klassen

Tabelle 15: Verteilung nach Alter (klassiert in 20-Jahres-Klassen) und Geschlecht der für Knochenkollagen zur Auswertung vorliegenden 66 Datensätze: 47 eigene Proben und 19 Literaturdaten.

Alter	Geschlecht				Gesamt	
	männlich		weiblich			
	n	%	n	%	n	%
00-19 Jahre	5	8	1	2	6	9
20-39 Jahre	16	24	4	6	20	30
40-59 Jahre	17	26	5	8	22	33
60- Jahre	10	15	8	12	18	27
Gesamt	48	73	18	27	66	100

IV 1.2.2 Sterbejahr, Alter und Geburtsjahr

Der nachfolgenden Tabelle 16 ist die Beschreibung der Individuen nach ihrem Sterbe- und Geburtsjahr zu entnehmen: Sowohl Sterbe- als auch Geburtsjahr sind nicht symmetrisch, sondern schief verteilt. Besonders augenfällig ist dies für das Sterbejahr: Die ersten 50 % der nach aufsteigendem Kalenderjahr sortierten Beobachtungen umfassen einen Zeitraum von 54 Jahren (1928 bis 1982,5), die zweiten 50 % dagegen nur 13 Jahre (1982,5 bis 1995). Auch hier wirkt sich die Herkunft der Proben aus: Asservate werden nicht unbegrenzt in den Instituten aufbewahrt.

Tabelle 16: Das Sterbe- und Geburtsjahr der 66 für Knochenkollagen zur Auswertung vorliegenden Datensätze: 47 eigene Proben und 19 Literaturdaten.

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Sterbejahr	66	1979,4	12,0	1928	1968	1982,5	1990	1995
Geburtsjahr	66	1932,3	27,2	1869	1910	1937,5	1954	1975

Für einen weiteren Überblick über die Zusammensetzung der Stichprobe wird für jedes Individuum in Tabelle 17 das Alter mit dem Sterbejahr bzw. in Tabelle 18 das Alter mit dem Geburtsjahr in Beziehung gesetzt. Dazu wurden sowohl die Sterbejahre als auch die Geburtsjahre klassiert.

Die Klassierung des Sterbejahres erfolgte für die gesamte Stichprobe einheitlich in 10-Jahres-Klassen (Tabelle 17). Eine feinere Unterteilung, z. B. in 5-Jahres-Klassen, ist wenig sinnvoll, da die Werte zu stark klumpen: Zum Beispiel verstarben in der Dekade von 1980 bis 1989 12 von den 17 Individuen erst nach 1984.

Tabelle 17: Verteilung nach Alter (klassiert in 20-Jahres-Klassen) und Sterbejahr (klassiert in Dekaden) der 66 für Knochenkollagen zur Auswertung vorliegenden Datensätze: 47 eigene Proben und (19 Literaturdaten).

	Sterbejahre						
Altersklasse	1920 -1929	...	1960 - 1969	1970 - 1979	1980 -1989	1990 - 1999	Gesamt
00-19 Jahre			1		2	3	6
20-39 Jahre			2 + (3)	2	2	10 + (1)	16 + (4)
40-59 Jahre	1		(3)	4	9	5	19 + (3)
60- Jahre			(11)	1 + (1)	4	1	6 + (12)
Gesamt	1		3 + (17)	7 + (1)	17	19 + (1)	47 + (19)

Tabelle 18: Verteilung nach Alter (klassiert in 20-Jahres-Klassen) und Geburtsjahr (klassiert, s. u.) der 66 für Knochenkollagen zur Auswertung vorliegenden Datensätze: 47 eigene Proben und (19 Literaturwerte).

	Geburtsjahre							
Altersklasse	1860 - 1899	1900 - 1929	1930 - 1939	1940 - 1949	1950 - 1959	1960 - 1969	1970 - 1979	Gesamt
00-19 Jahre				1		1	4	6
20-39 Jahre			2 + (2)	2 +(1)	6	6 + (1)		16 + (4)
40-59 Jahre	1	2 + (3)	11	4	1			19 + (3)
60- Jahre	(8)	6 + (4)						6 + (12)
Gesamt	1+ (8)	8 + (7)	13 + (2)	7 + (1)	7	7 + (1)	4	47 + (19)

Für das Geburtsjahr waren neben biologischen vor allem pragmatische Aspekte in Bezug auf das Referenzjahr 1950 für die Klassierung ausschlaggebend:

- Individuen mit einem Geburtsjahr vor 1900 waren 1950 mindestens 50 Jahre alt, und befanden sich damit auf einem ontogenetischen Entwicklungsniveau, in dem abbauende Stoffwechselprozesse in den Vordergrund treten. Mit einer hohen Konzentration an ^{14}C aus den Atombombenabwürfen im Knochenkollagen ist daher nicht zu rechnen (Kap. II 5) und sie werden hier zu einer Klasse zusammengefasst.
- Individuen mit einem Geburtsjahr zwischen 1900 und 1929 waren 1950 mindestens 20 Jahre alt und befanden sich damit auf einem ontogenetischen Entwicklungsniveau, bei dem sich aufbauende und abbauende Stoffwechselprozesse zunehmend im Gleichgewicht befanden (quasi stabiles Gewebe, Kapitel II 5). Bei diesen Individuen ist mit einer höheren ^{14}C-Konzentration als bei den Individuen der ersten Klasse, aber mit geringeren ^{14}C-Konzentrationen als bei den Individuen der nachfolgenden Klassen zu rechen. Diese werden daher zu einer Klasse zusammengefasst.

- Individuen mit einem Geburtsjahr nach 1929 waren 1950 noch nicht erwachsen und damit überwiegen bei ihnen aufbauende Stoffwechselvorgänge. Bei ihnen sollte sich die Änderung der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre nach 1950 deutlich nachweisen lassen. Da der Anstieg bis 1964 sehr rasch erfolgte und seitdem wieder deutlich abfällt, erscheint es notwendig, eine feinere Synchronisierung zwischen Lebensdaten und ^{14}C-Kurve der Atmosphäre herbeizuführen und zu untersuchen. Daher werden diese Individuen nach ihrem Geburtsdatum in 10-Jahres-Klassen unterteilt.

IV 1.2.3 Pathologien, Skelettregion, Fragmentationsgrad, Kompakta vs. Spongiosa

Die Frage nach Pathologien, vor allem systemischen Erkrankungen, war nur in Ausnahmefällen zu beantworten (Anhang 13). Bei den eigenen Proben konnte diese Frage fast ausschließlich weder anhand der Sektionsprotokolle noch anhand einer makroskopischen Inspektion der Knochen beantwortet werden. Dies gelang nur für ID 52 (^{14}C-Wert 132,8 ± 1,6 pMC), die deutlich osteoporotisch verändertes Knochengewebe und einen mächtigen Knochenkallus (Knochenneubildung) nach einer Kollumfraktur und Hüftgelenksprothese aufwies, und für ID 53 (^{14}C-Wert 122,9 ± 0,9 pMC), die ebenfalls an Osteoporose litt und dagegen medikamentös therapiert wurde. Desweiteren war ID 62 auf einem Auge erblindet und hatte prämortal sämtliche Zähne verloren, ID 81 war obdachlos und es wurde ein chronischer Alkoholabusus festgestellt. Für ID 50 wurde von HARKNESS UND WALTON (1972) eine Erkrankung der Herzkranzgefäße angegeben.

Bei den 66 auszuwertenden Proben wurden 51 Fragmente (77 %) vom postkranialen, 11 Fragmente (17 %) vom kranialen, 2 Fragmente (3 %) vom postkranialen und kranialen Skelett entnommen und für 2 Proben (3 %) aus der Literatur waren die Angaben nicht verfügbar.

Es wurde, wenn möglich, der ganze Knochen für die Messung aufbereitet. War dies nicht möglich, wurden äquivalente Fragmentgrößen gewählt, d. h. proximale bzw. distale Diaphysenhälften oder diese nochmals medial in anterior-posteriorer, seltener medio-lateral geteilt. Somit konnte der Einfluss des Gewebealters (siehe auch Kap. II 5.4.4) weitestgehend ausgeschlossen werden. Oft überschritt die Knochenmasse deutlich die erforderliche Probenmenge. Dies wird in der forensischen Praxis nur sehr selten der Fall sein.

Für 6 im Jahr 1968 verstorbene Individuen wurden durch L'ORANGE UND ZIMEN (1969a) die Kompakta und Spongiosa vom Femur separat beprobt (Anhang 13b). In der nachfolgenden Tabelle 19 sind die Einzelwerte und die entsprechend der Formel 12 (Kap. IV 3.2) berechneten Differenzen zwischen den ^{14}C-Messwerten und Standardabweichungen dargestellt.

Tabelle 19: Die 6 Messproben für Kollagen aus Kompakta und Spongiosa (nach L'ORANGE UND ZIMEN 1969a; Berechnung der Differenz nach Formel 12, Kap. IV 3.2, sortiert nach Geschlecht und Geburtsjahr, Sterbejahr: 1968).

			Kompakta			Spongiosa			Differenz (Kompakta-Spongiosa)	
Geschlecht	Alter	Geburtsjahr	ID	$\Delta^{14}C$	s	ID	$\Delta^{14}C$	s	$\Delta^{14}C$	s
männlich	88	1880	47	110,3	0,5	48	118,2	0,6	-7,9	0,8
männlich	56	1912	37	107,5	0,7	38	119,1	1,0	-11,6	1,2
männlich	56	1912	39	111,7	1,3	40	114,5	0,9	-2,8	1,6
weiblich	85	1883	43	107,6	1,1	44	125,7	0,8	-18,1	1,4
weiblich	85	1883	45	102,1	0,8	46	114,9	0,8	-12,8	1,1
weiblich	57	1911	41	116,6	0,8	42	114,1	0,8	2,5	1,1

IV 1.3 Die Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im Apatit: Zusammensetzung und Deskription der Einzelproben

Insgesamt liegen von 21 Individuen 29 ^{14}C-Werte für Apatit vor (Anhang 14a), wobei es sich um 6 eigene und 23 Literaturwerte handelt. Von den 29 Einzelwerten für Apatit werden von der nachfolgenden Deskription die 8 Messwerte für Spongiosa (ID 38, 40, 42, 44, 46, 48) und die Messung ID 36 (Mittelwert aus den 8 Messungen von ID 28 bis 35) ausgeschlossen. Die Werte für ID 25 und 26 werden durch den Mittelwert beider Messungen ersetzt (in den Tabellen mit ID 100 gekennzeichnet). Da für beide Messungen die Standardabweichung gleich groß ist, kann diese Berechnung ungewichtet erfolgen (GEYH 1983).

IV 1.3.1 Alter und Geschlecht

Die Stichprobe wird deutlich von senilen Individuen dominiert, wie nachfolgender Tabelle 20 zu entnehmen ist. Nur 3 Proben stammen von juvenilen (ID 100, 79, 87) und 4 Proben von maturen Individuen (ID 58, 59, 66, 72).

Tabelle 20: Das Alter der 21 für Apatit zur Auswertung vorliegenden Datensätze: 6 eigene Proben und 15 Literaturdaten.

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Alter	21	58,2	20,7	19	48,0	61,0	70,0	88

Die Proben stammen von 8 Frauen (38 %) und 13 Männern (62 %). Diese sind über die Altersgruppen nicht gleichmäßig verteilt, wie Tabelle 21 zu entnehmen ist.

Tabelle 21: Verteilung nach Alter (klassiert in 20-Jahres-Klassen) und Geschlecht der 21 für Apatit zur Auswertung vorliegenden Datensätze: 6 eigene Proben und 15 Literaturdaten.

Alter	Geschlecht				Gesamt	
	männlich		weiblich			
	n	%	n	%	n	%
00-19 Jahre	2	10	0	0	2	10
20-39 Jahre	0	0	1	5	1	5
40-59 Jahre	6	29	1	5	7	33
60- Jahre	5	24	6	29	11	52
Gesamt	13	62	8	38	21	100

IV 1.3.2 Sterbejahr, Alter und Geburtsjahr

Der nachfolgenden Tabelle 22 ist die Beschreibung der Individuen nach ihrem Sterbe- und Geburtsjahr zu entnehmen. Sowohl Sterbe- als auch Geburtsjahr sind nicht symmetrisch verteilt, was sich aus dem Überwiegen von Proben spätmaturer und seniler Individuen mit den Sterbejahren 1967 und 1968 aus den Arbeiten von L'ORANGE UND ZIMEN (1968a, 1969a) erklärt.

Tabelle 22: Das Geburts- und Sterbejahr der 21 für Apatit zur Auswertung vorliegenden Datensätze: 6 eigene Proben und 15 Literaturdaten.

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Sterbejahr	21	1970,3	5,7	1967	1967	1968,0	1968	1985
Geburtsjahr	21	1912,0	23,5	1880	1897	1906,0	1928	1960

Weiterhin wird für jedes Individuum in Tabelle 23 das Alter mit dem Sterbejahr bzw. in Tabelle 24 mit dem Geburtsjahr, jeweils klassiert nach den Vorgaben in Kap. IV 1.2.2, in Beziehung gesetzt.

Tabelle 23: Verteilung nach Alter (klassiert in 20-Jahres-Klassen) und Sterbejahr (klassiert in Dekaden) der 21 Messproben für Apatit: 6 eigene Proben und (15 Literaturdaten).

	Sterbejahre						
Altersklasse	1920 -1929	...	1960 - 1969	1970 - 1979	1980 -1989	1990 - 1999	Gesamt
00-19			1		1		2
20-39			(1)				(1)
40-59			(3)	2	2		4 + (3)
60-			(11)				(12)
Gesamt			1 + (15)	2	3		6 + (15)

Tabelle 24: Verteilung nach Alter (klassiert in 20-Jahres-Klassen) und Geburtsjahr (klassiert, siehe Kap. IV 1.2.2) der 21 Messproben für Apatit: 6 eigene Proben und (15 Literaturdaten).

	Geburtsjahre							
Altersklasse	1860 - 1899	1900 - 1929	1930 - 1939	1940 - 1949	1950 - 1959	1960 - 1969	1970 - 1979	Gesamt
00-19 Jahre				1		1		2
20-39 Jahre				(1)				(1)
40-59 Jahre		2 + (3)	2					4 + (3)
60- Jahre	(7)	(4)						(12)
Gesamt	(7)	2 + (7)	2	1 + (1)		1		6 + (15)

IV 1.3.3 Skelettregion, Kompakta vs. Spongiosa

Bei den 21 Proben wurden 20 (95 %) Fragmente dem postkranialen und nur 1 Fragment dem kranialen Skelett entnommen.

Für 6 im Jahr 1968 verstorbene Individuen wurden durch L'ORANGE UND ZIMEN (1969a) die Kompakta und Spongiosa vom Femur separat beprobt (Anhang 16). In der nachfolgenden Tabelle 25 sind die Einzelwerte und die entsprechend der Formel 12 (Kap. IV 3.2, GEYH 1983) berechneten Differenzen zwischen den ^{14}C-Messwerten und Standardabweichungen dargestellt.

Tabelle 25: Die 6 Messproben für Apatit aus Kompakta und Spongiosa (nach L'ORANGE UND ZIMEN 1969a; Berechnung der Differenz nach Formel 12, Kap. IV 3.2, sortiert nach Geschlecht und Geburtsjahr, Sterbejahr: 1968).

			Kompakta			Spongiosa			Differenz (Kompakta-Spongiosa)	
Geschlecht	Alter	Geburtsjahr	ID	$\Delta^{14}C$	s	ID	$\Delta^{14}C$	s	$\Delta^{14}C$	s
männlich	88	1880	47	123,2	1,4	48	125,8	1,1	-2,6	1,8
männlich	56	1912	37	123,8	1,1	38	125,3	1,2	-1,5	1,6
männlich	56	1912	39	115,0	1,1	40	119,9	0,9	-4,9	1,4
weiblich	85	1883	43	121,8	1,6	44	130,9	1,9	-9,1	2,5
weiblich	85	1883	45	113,2	1,1	46	120,3	1,1	-7,1	1,6
weiblich	57	1911	41	114,9	1,0	42	121,8	1,2	-6,9	1,6

IV 1.4 Die Bestimmung der ^{14}C-Konzentration im Knochenfett: Die Einzelproben

Insgesamt liegen von 6 Individuen 6 ^{14}C-Werte für Knochenfett vor. Dabei handelt es sich um 3 eigene und 3 Literaturwerte. Von diesen Proben muss noch die eigene Messprobe ID 65 ausgeschlossen werden: Die gemessene ^{14}C-Konzentration von 51,7 pMC stellt einen Unsinns-Wert dar, der auf eine fehlerhafte Probenaufbereitung zurückzuführen ist. Die verbleibenden 5 Proben stammen von 2 senilen Frauen und 1 adulten und 2 maturen Männern und wurden bis auf ein Fragment dem postkranialen Skelett entnommen. Für die Proben ID 59 und 66 wurden alle drei Fraktionen (Kollagen, Apatit und Fett) bestimmt.

IV 1.5 Angewendete Messverfahren und Methoden der Probenaufbereitung zur Bestimmung von ^{14}C im Knochen

Die Anwendung der Radiocarbon-Methode erfordert eine enge Zusammenarbeit mit einem ^{14}C-Labor. Die Anforderungen an die Messproben hängen von der verwendeten Messmethode ab und sind von Labor zu Labor verschieden. Zwar lässt sich ein guter Überblick durch die Literatur gewinnen (z. B. GEYH 1983, GEYH UND SCHLEICHER 1990, MOOK UND WATERBOLK 1985, BOWMAN 1990, www.c14dating.com), dennoch sollte rechtzeitig der Kontakt zum Labor gesucht werden. Bei der vorliegenden Studie wurde eine Zusammenarbeit mit dem ^{14}C-Labor des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung in Hannover vereinbart. Die Studie wurde mit DFG-Mitteln gefördert (Sachbeihilfe der DFG RO 475/11-1). Die Messungen wurden von 1992 bis 1995 durchgeführt.

Am ^{14}C-Labor in Hannover werden die Bestimmungen mit Hilfe eines Proportional- bzw. eines Miniatur-Zählrohres durchgeführt. Bei diesen Methoden ist es erforderlich, aus den Proben Kohlenstoff in der Form von Gas (Kohlendioxid: CO_2 bzw. Acetylen: C_2H_2) zu gewinnen. Je nach verwendetem Zählrohr werden 0,1 bis 25 g Kohlenstoff (Proportionalzählrohr) bzw. zwischen 10 und 50 mg Kohlenstoff (Miniatur-Zählrohr) benötigt. Da nur ca. 1 bis 5 % Kohlenstoff aus einer Knochenprobe gewonnen werden können, sollte diese somit 100 bis 500 g umfassen. Da mit der Probengröße die Datierungsgenauigkeit wesentlich beeinflusst werden kann (die Breite des Mutungsintervalls verdoppelt sich, wenn das Probengewicht um ein Viertel abnimmt), sollte man lieber zu große als zu kleine Proben einsenden, auch wenn das Volumen durch die Zählrohre nach oben hin begrenzt wird.

IV 1.5.1 Proportionalzählrohre

Am ^{14}C-Labor in Hannover wurden die Messungen mit einem low-level-Proportionalzählrohr und für kleine Proben mit Hilfe eines Miniatur-Zählrohres durchgeführt. In diesen wird der Zerfall des ^{14}C-Isotops gemessen. Dieser besteht darin, dass ein Neutron unter Emission eines Negatrons (Kernelektrons; β^--Strahlung) zu einem Proton zerfällt: Die

Atommasse bleibt konstant, die Atomzahl erhöht sich um eins, da Radiocarbon zum stabilen Stickstoff-Isotop ^{14}N zerfällt.

Im gasgefüllten, dichten Zählrohr wird durch das Anlegen einer hohen Spannung (Mantel der Röhre: Katode; achsial in der Röhre gespannter Draht: Anode) eine ionisierende Strahlung und damit freie Elektronen und Ionen erzeugt. Bei dem Zusammenstoß dieser Elektronen und Ionen mit den Gasmolekülen setzt ein lawinenartiger Zerfall von ^{14}C zu ^{14}N und freien Elektronen ein. Dieser Zerfall wird als elektrischer Impuls messbar. Nach dem ersten Impuls wird bald ein Zustand mit annähernd konstanter Zerfallsrate (Aktivität) erreicht, wobei diese Rate unabhängig von der anliegenden Spannung ist. Mit Hilfe von Proportionalzählrohren kann die Hintergrundstrahlung eliminiert werden, indem nur Impulse mit einem Ausschlag in einem Bereich zwischen einer festgelegten Ober- und Untergrenze gezählt werden. Dies ist möglich, da der Impuls proportional zur erzeugenden ionisierenden Strahlung ist (GEYH UND SCHLEICHER 1990). Die Messdauer ist auf ca. 2 Tage begrenzt.

IV 1.5.2 Teilchenbeschleuniger (Akzelerator-Massen-Spektrometrie, AMS)

Mit der Akzelerator Massen-Spektrometrie (AMS, Teilchen-Beschleuniger-Spektrometrie) können Häufigkeitsverhältnisse stabiler Isotope und langlebiger kosmogener Radionuklide gemessen werden. Dabei muss das feste Probenextrakt nur einige Milli- bis Mikrogramm umfassen. Bei einer Messdauer von wenigen Stunden (ca. 2 h) wird eine Messgenauigkeit im Bereich von Präzisionsdatierungen mit Hilfe der Proportionalzählrohrtechnik erreicht. Die hohe Datierungsgenauigkeit liegt darin begründet, dass alle in der Probe vorhandenen Isotope gezählt werden (LONG ET AL. 1989, GEYH UND SCHLEICHER 1990, STAFFORD ET AL. 1991).

Die Vorteile dieser Methode für eine Routine im Sinne von FoRCaDa liegt auf der Hand: Kleinste Mengen reichen. Die Probenaufbereitung ist wesentlich unkomplizierter, da z. B. die Kollagenprobe nicht noch weiter zu Acetylen verbrannt werden muss. Auch entfällt eine Zwischenlagerung des Probengases von ca. 6 Wochen. Damit liegt das Messergebnis sehr schnell vor.

Jedoch führten die deutlich höheren Kosten dieser Methode dazu, dass sie für diese Studie nicht zur Verfügung stand. Allerdings wurden ID 12 bis 14 mit dieser Technik am Institut für Mittelenergiephysik in Zürich gemessen und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt, ohne ursprünglich geplanter Bestandteil dieser Arbeit zu sein, bzw. wurden entsprechende Literaturdaten aufgenommen (ROM ET AL. 1998 bzw. WILD ET AL. 2000; ID 15 bis 18, ID 49, siehe Anhang 13 und Anhang 14). Bei deren Beurteilung wurde deutlich, dass biologische Effekte die Ergebnisse stark beeinflussen (Stichwort: Gewebealter).

IV 1.5.3 Methoden der Probenaufbereitung

Zur Datierung von Knochenmaterial eignen sich sowohl aufbereitete Apatit- als auch Kollagenproben. Allerdings wird Apatit wegen der ungleich größeren Kontaminationsgefahr nur äußerst ungern verwendet (siehe Kap. II 2.2.5). Auch in dieser Arbeit wurden das CO_2 bzw. C_2H_2 hauptsächlich aus Kollagen dargestellt. In einigen Fällen wurden beide Fraktionen aufbereitet, um die Messergebnisse vergleichen zu können. In drei weiteren Fällen wurden zusätzlich Fettproben gemessen. Die einzelnen Aufbereitungsschritte werden nachfolgend kurz beschrieben. Diese sind zwar Bestandteil dieser Studie jedoch nicht auf andere Labore vollständig übertragbar.

Mechanische Aufbereitung

Vor der chemischen ist eine mechanische Aufbereitung der Knochen erforderlich. Diese umfasst die Entfernung sichtbarer Fremdsubstanzen und die Zerkleinerung der Probe. Die vorliegenden Asservate zeigten bis auf ID 52 keine sichtbaren Verunreinigungen (siehe Anhang 13). Bei der genannten Probe handelte es sich um Zement, mit der eine Hüftgelenksprothese im Femur befestigt war.

Die Zerkleinerung der Proben gestaltete sich schwierig, da es sich bei den Asservaten fast ausschließlich um rezente und damit äußerst harte Knochen handelte. Um die erforderliche Zerkleinerung auf 2 x 2 bis maximal 4 x 4 mm zu erreichen, waren mehrere aufeinanderfolgende, z. T. improvisierte Arbeitsschritte erforderlich. Die großen Knochenfragmente wurden mindestens einmal in einem Backenbrecher zu kleineren Fragmenten zer-

brochen. Diese wurden dann in einer robusten Kaffeemühle zermahlen (Ersatzmesser und -mühlen sollten vorrätig sein). Dabei erwies es sich als sinnvoll, die Knochenfragmente vorab in Trockeneis stark zu kühlen. Die Fragmente werden dadurch spröder und lassen sich leichter zermahlen. Einige Proben wurden mit einem Mörser per Hand zerstoßen. Der entstandene Knochengrieß jeder Proben wurde separat verpackt, gekennzeichnet und bis zur Weiterverarbeitung deponiert. Nach jeder Probe wurden die Arbeitsgeräte mit Aceton gründlich gereinigt, um eine Vermischung der Proben zu verhindern.

Apatit

Etwa 70 % des Knochens besteht aus anorganischem Hydroxylapatit, welches als extrazelluläre Substanz hauptsächlich aus in kristalliner Form vorliegendem Kalziumphosphat, -carbonat, -fluorid, -hydroxid und -citrat besteht.

Vor Beginn der chemischen Aufbereitung werden die Knochenprobe und die Chemikalien bei ca. 8°C (Kühlschrank) gelagert. Die nachfolgende Reaktion im 1. Teilschritt findet ebenfalls bei 8°C im Kühlschrank statt – da diese so langsamer, gründlicher und kontrollierbarer abläuft.

1. Teilschritt:

- Knochengrieß mit 99 - 100 %iger Essigsäure (CH_3COOH) versetzen, gelegentlich umrühren: Fremdkalk wird gelöst und der Kohlenstoff entweicht als CO_2, knocheneigener Kalk bleibt erhalten
- Neutralspülen der Probe: Diese wird wiederholt mit destilliertem Wasser aufgefüllt und umgerührt, der Überstand wird jedes Mal vorsichtig abgegossen, bis ein pH-Wert 7 erreicht ist
- Im Kühlschrank bis zur Weiterverarbeitung zwischenlagern.

2. Teilschritt:

- In einer Apparatur wird unter ständigem Rühren der breiige Rückstand über mehrere Stunden tropfenweise mit 2normaler Salzsäure (2n HCl) versetzt, dabei entweicht langsam der Kohlenstoff des Apatits als CO_2. Dieses wird aufgefangen und in mehreren Stufen vom Wasser (H_2O, in sogenannten Kühlfallen) gereinigt und liegt schließlich zur Beprobung vor. Eine Teilprobe wird zur Bestimmung des $\delta^{13}C$-Wertes gewonnen (Kap. II 2.2.4).

Kollagen

Etwa 30 % des Knochens bestehen aus organischen Komponenten, wobei ca. 25 bis 27 % des Knochens aus Kollagen I bestehen. Bei Kollagen I handelt es sich um ein extrazelluläres Protein, welches als Tripel-Helix vorliegt. Während der individuellen Reifung kommt es zunehmend zur Ausbildung von Wasserstoffbrücken, die die Helix stabilisieren, und zu Querverbindungen zwischen verschiedenen Fasern. Somit nimmt die Dichte und die Stabilität des Kollagens über die Zeit zu, seine Löslichkeit dagegen ab.

Nach WILD ET AL. (2000) nimmt die Probenaufbereitung Einfluss darauf, welche Anteile des Kollagens und wie vollständig diese aus dem Knochen herausgelöst werden. Für die klassische Radiocarbon-Methode sollten diese Unterschiede keine Bedeutung haben, da in allen Reservoiren von einer Konstanz des ^{14}C ausgegangen wird. Für die forensische Anwendung kann der Einfluss der Methode jedoch nicht vernachlässigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein modifiziertes Verfahren nach LONGIN (1971) zur Gelantine-Herstellung verwendet, ein sogenanntes „hartes“ Verfahren nach WILD ET AL. (2000) im Gegensatz zu den „weichen“ Methoden der Kollagen-Darstellung wie z. B. mit Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA).

Vor Beginn der chemischen Aufbereitung werden die Knochenprobe und die Chemikalien bei ca. 8°C (Kühlschrank) gelagert. Die nachfolgende Reaktion im 1. Teilschritt findet ebenfalls bei 8°C im Kühlschrank statt – da diese so langsamer, gründlicher und kontrollierbarer abläuft.

1. Teilschritt (modifiziert nach LONGIN 1971):

- Der Knochengrieß, wird so lange, wie eine schäumende Reaktion stattfindet, mit 2n HCl versetzt und wiederholt umgerührt. Dadurch werden gleichzeitig körperfremder und köpereigener Kalk entfernt
- Abgießen des Überstandes und Neutralspülen mit destilliertem Wasser (siehe Apatit-Probe), bis ein pH-Wert 7 erreicht ist
- Rückstand mit 0,5 %igem Natriumhydroxid (NaOH) versetzen und gelegentlich umrühren, bis nach ca. vierstündiger Reaktionszeit die „Aufschwemmung” basisch reagiert. Hierdurch werden Huminsäuren (besonders bei bodengelagerten Proben wichtig) und andere organische Säuren entfernt
- Neutralspülen bis pH-Wert 7 erreicht ist und Überstand abgießen.

2. Teilschritt:

- Rückstand mit HCl auf pH-Wert 4 ansäuern und über Nacht unter ständigem Rühren auf 86 bis 90°C erwärmen. Temperatur nicht überschreiten!

- Überstand abgießen, diesen langsam über 3 Tage und Nächte eindampfen und trocknen: Damit liegt die fertige Kollagenprobe vor
- Rest wird ebenfalls getrocknet und zur Sicherheit bis zur erfolgten Messung aufbewahrt.

3. Teilschritt:

- Die getrocknete Kollagen-Probe wird unter Verwendung eines Platin-Katalysators in einem Kupferoxid-Ofen kontrolliert verbrannt
- Gase werden in Kalium-Permanganat- und Silber-Chlorid-Lösung sowie in einem zweiten Verbrennungsofen gereinigt. Das Restgas wird in Kühlfallen vom H_2O getrennt und das CO_2 wird aufgefangen.

4. Teilschritt:

- Lithium wird bei 800°C geschmolzen, das CO_2 wird darübergeleitet und entweicht (Lithiumcarbid: Li_2C_2), das Gas wird nachfolgend abgekühlt und unter Zugabe von ^{14}C-freiem, alten Brunnenwasser entsteht C_2H_2
- Herauskühlen von H_2O in Kühlfallen
- Herauskühlen von C_2H_2, wobei Wasserstoff (H_2) austritt
- C_2H_2 wird aufgefangen, eine Teilprobe zur Bestimmung des $\delta^{13}C$-Wertes gewonnen. Acetylen wird mindestens 6 Wochen zwischengelagert, damit vorhandenes Radon (^{222}Rn, HWZ 3,81 d) zerfallen kann und das Messergebnis nicht verfälscht wird.

Fett

Die Gewinnung einer Fettprobe aus Knochengewebe stellte am ^{14}C-Labor in Hannover ein Novum dar. Aus der Literatur waren drei Methoden bekannt (AMBROSE 1990, DAS UND HARRIS 1970a,b für Zähne, OLSSON ET AL. 1974), wobei die Methode nach OLSSON ET AL. zur Anwendung kam:

- Fettextraktion mit Aceton im Soxhlet-Apparat aus dem Knochengrieß bei ca. 75°C, ca. 18 h
- Die Probe wird wiederholt mit destilliertem Wasser verdünnt und eingedampft bis sicher kein Aceton mehr in der Probe ist (hier wohl zu frühzeitiger Abbruch bei Probe ID 65, Kap. IV 1.4)
- Die Probe vor dem letzten Eindampfen mit verdünnter HCl versetzen bis ein pH-Wert von 4 erreicht ist
- Probe in dem zur Verbrennung vorgesehenen Gerät eindampfen bzw. eintrocknen lassen
- Probe verbrennen zur Darstellung des Gases (siehe hier Kollagen ab dem 3. Teilschritt).

IV 2 Das Material zur Bestimmung der jährlichen relativen Skelettmasse-Änderung (ΔSM)

IV 2.1 Einführung

Für die Herleitung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse liegen keine Daten unmittelbar vor. Es ist somit zuerst notwendig, die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ auf der Grundlage von Literaturdaten zu beschreiben. Eine Literaturrecherche erbrachte elf Arbeiten (GARN UND WAGNER 1969, GARN 1970, GARN 1972, TROTTER UND PETERSON 1969a, b, 1970, TROTTER UND HIXON 1974, MERZ ET AL. 1956, GARROW ET AL. 1965, SEALE 1959, BAKER UND NEWMAN 1957, INGALLS 1931).

Als besonders wichtig können in der anthropologisch-humanbiologischen Literatur die Arbeiten von TROTTER und Co-Autoren und GARN und Co-Autoren angesehen werden. Beide Arbeitsgruppen erfassen in ihren Studien die gesamte Lebensspanne für beide Geschlechter und nach Rassen getrennt und zeichnen sich durch relativ große Stichproben aus. TROTTER und Mitarbeiter bevorzugten den direkten und invasiven Zugang zur Bestimmung der Skelettmasse über das Auswiegen der Skelette. GARN und Mitarbeiter erarbeiteten dagegen eine indirekte, nicht-invasive Methode auf der Grundlage von Röntgenbildern des Metacarpus II (MC II). In der verfügbaren Literatur konnte eine – auch zwischen den beiden Arbeitsgruppen um TROTTER bzw. GARN – rege Diskussion verfolgt werden. Die Arbeiten beider Arbeitsgruppen werden daher genauer in Kapitel VI 2.2 vorgestellt und diskutiert.

Obwohl die Methode von GARN nicht-invasiv ist, handelt es sich bei seinen Studien auch um Querschnittsstudien, d. h., die verschiedenen Alterstufen werden durch verschiedene Individuen repräsentiert. Längsschnittstudien, bei denen die Daten von denselben Individuen zu unterschiedlichen Zeitpunkten gewonnen wurden, liegen für die Bestimmung der Skelettmasse derzeit nicht vor.

Die Berechnungen zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ (Kap. VI 2.3 bis VI 2.5) erfolgen nach Diskussion der vorhandenen Daten getrennt für beide Geschlechter und jeweils getrennt für Individuen bis und ab dem 3. Ljz.. Damit werden Individuen mit wachsendem und Individuen mit quasi-stabilem bzw. schrumpfendem Gewebe voneinander unterschieden. Anhand der Berechnungen zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ wird nachfolgend auf die jährliche relative Änderung der Skelettmasse ΔSM geschlossen (Kap. V 2.2, VI 2.6).

IV 2.2 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$

IV 2.2.1 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ von der Geburt bis zum 3. Ljz. (0 bis 22,5 Jahre)

Nach Sichtung der Einzelarbeiten konnten insgesamt 194 Datensätze für Individuen im Alter von 0 Jahren bis zur Mitte des dritten Lebensjahrzehnts zusammengetragen werden, die mehr als 2789 Individuen repäsentieren (Anhang 21). Von diesen mussten jedoch 53 Datensätze bzw. mindestens 2512 Individuen ausgeschlossen werden, um einen für die Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ mit Hilfe von Regressionsmodellen (siehe Kap. IV 3.3) geeigneten Datensatz zu erhalten. Dazu wurden nachfolgende Entscheidungen getroffen:

(1) Datensätze aus verschiedenen Arbeiten einer Arbeitsgruppe, bei denen jedoch die gleiche Stichprobe anzunehmen war, wurden nur einmal erfasst, um die Unabhängigkeit der einzelnen Beobachtungen voneinander zu gewährleisten

(2) Datensätze, bei denen für mehr als ein Individuum das Altersintervall mehr als ein Jahr umfasste oder die Intervallgrenzen nicht angegeben waren, wurden von der Auswertung ausgeschlossen

(3) Das Alter wurde nachfolgend als Mittelwert aus den Intervallgrenzen (neu) berechnet

(4) Als weitere Modifikation wurden die Berechnungen anhand gewichteter kleinster Quadrate durchgeführt (weighted least squares means, siehe Kap. IV 3.3.1).

(5) Die beiden Datensätze von BAKER UND NEWMAN (1957) für insgesamt 115 Männer im Alter von 25 bzw. 26 Jahren mussten ausgeschlossen werden. Die Skelettmassen liegen deutlich unter denen der nächstjüngeren Individuen im Alter von 21,5 bzw. 22,5 Jahren, was einerseits gegen die Ergebnisse aus Kapitel II 5 steht und gleichzeitig jede Anpassung eines (linearen) Regressionsmodells beeinflusst. Diese Daten werden bei der Modellierung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ ab dem dritten Lebensjahrzehnt berücksichtigt

(6) Zu beachten ist, dass sich das Altersintervall von 0 bis 22,5 Jahren für 14 Datensätze mit dem nachfolgenden Altersintervall von 20,5 bis 83,5/84,5 Jahren überschneidet. Insgesamt 14 Individuen im Alter von 20,5 bis 22,5 Jahre (laufende Nummern 168 bis 181; Anhang 21 bzw. 25) gehen in die Berechnungen zu beiden Zeitintervallen ein. Diese Überlappung ist notwendig, um in einem nachfolgenden Schritt getrennt nach Geschlecht geeignete Gesamtmodelle für Individuen im Alter von 0 bis 84,5 Jahre zusammenstellen zu können.

Es verbleiben somit 141 Datensätze (72,7 %) in der Auswertung, die noch 277 (9,9 %) der unsprünglich zusammengetragenen Individuen repräsentieren. Nur 6 Individuen aus 6 Datensätzen stammen von GARN UND WAGNER (1969) und 4 Individuen aus 4 Datensätzen

von GARROW ET AL. (1965). Alle anderen Individuen stammen von der Arbeitsgruppe um M. TROTTER: 144 Individuen aus 115 Datensätzen von TROTTER UND PETERSON (1970), 57 Individuen aus 9 Datensätzen von TROTTER UND HIXON (1974), 39 bzw. 29 Individuen aus jeweils 4 Datensätzen von TROTTER UND PETERSON (1969a, b). Für das Wegfallen der umfangreichen Studie von GARN (1970) ist die Angabe der Werte in Zweijahres-Intervallen verantwortlich.

Die Bestimmung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ erfolgt in Abhängigkeit vom Lebensalter getrennt für beide Geschlechter. In nachfolgender Tabelle 26 wird daher eine kurze Beschreibung der Daten für das Alter und die Skelettmasse sowohl für die vorliegenden Datensätze, als auch für die dadurch repräsentierten Individuen gegeben.

In der Stichprobe sind Männer (n=133; 48,0 %) und Frauen (n=144; 52,0 %) fast gleich häufig vertreten. Es dominieren Skelette von Kleinstkindern (≥ 50 %). Da bei den Männern aber mindestens 25 % 17,5 Jahre und damit postpubertär sind, erklärt sich daraus der sowohl im Mittelwert als auch Median deutlich erkennbare Unterschied in der Skelettmasse zwischen den beiden Geschlechtern.

Tabelle 26: Beschreibung der 141 Datensätze (a) bzw. 277 Individuen (b) für Alter (Jahre) und Skelettmasse (g), getrennt nach Geschlecht (siehe Anhang 21).

a) Datensätze

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Alter (Jahre)								
männlich	73	11,93	7,85	0,00	3,50	14,50	18,50	22,50
weiblich	68	9,34	7,41	0,00	2,50	7,50	17,25	22,50
Gesamt	141	10,68	7,72	0,00	3,00	10,50	18,50	22,50
Skelettmasse (g)								
männlich	73	2494,52	1891,44	82,50	612,50	2325,00	4468,75	5587,50
weiblich	68	1537,97	1283,66	71,00	384,38	1031,25	2943,75	3900,00
Gesamt	141	2033,21	1690,73	71,00	456,25	1525,00	3450,00	5587,50

b) Individuen

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Alter (Jahre)								
männlich	133	6,73	8,18	0,00	0,00	1,50	17,50	22,50
weiblich	144	4,47	6,86	0,00	0,00	0,50	6,50	22,50
Gesamt	277	5,55	7,60	0,00	0,00	0,50	10,50	22,50
Skelettmasse (g)								
männlich	133	1424,76	1831,77	82,50	95,80	225,00	3012,50	5587,50
weiblich	144	777,71	1137,19	71,00	89,30	99,00	971,88	3900,00
Gesamt	277	1088,39	1542,61	71,00	89,30	150,00	1593,75	5587,50

IV 2.2.2 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ ab dem 3. Ljz. (20,5 bis 83,5/84,5 Jahre)

Es konnten insgesamt 103 Datensätze für Individuen ab einem Durchschnittsalter von 20 Jahren zusammengetragen werden, die mehr als 1336 Individuen repäsentieren (Anhang 25). Von diesen mussten jedoch 10 Datensätze bzw. mindestens 60 Individuen ausgeschlossen werden, um einen für die Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ mit Hilfe von Regressionsmodellen (siehe Kap. IV 3.3) geeigneten Datensatz zu erhalten. Dazu wurden nachfolgende und zu Kapitel IV 2.2.1 abweichende Entscheidungen umgesetzt:

(1) Das Altersintervall durfte mehr als ein Jahr umfassen

(2) Die Datensätze von MERZ ET AL. (1956) mit der laufenden Nummer 267 bzw. 268 im Anhang 25 für jeweils 5 im Durchschnitt 85,5jährige Männer bzw. Frauen wurden ausgeschlossen. Die Skelettmasse liegt für diese deutlich über der Skelettmasse von Individuen ab einem Alter von 75 Jahren, was gegen die Ergebnisse aus Kapitel II 5 steht. Da es sich um den jeweils einzigen Datensatz in dieser höchsten Altersklasse handelt, würde bei Beibehalt dieser Datensätze die Anpassung eines (linearen) Regressionsmodells in nicht vertretbarer Weise beeinflusst werden

(3) Da die 12 Datensätze mit 300 Individuen von GARN (1970) deutlich geringere Skelettmassen erbrachten als im Alter entsprechende Datensätze, wurden diese nach einem ersten Durchlauf ebenfalls ausgeschlossen. Die Unterschiede sind methodisch bedingt (Kap. VI 2.2 und VI 2.4) und veranschaulichen die deutlichen Unterschiede zwischen direkten und indirekten Verfahren der Skelettmasse-Bestimmung.

Es verbleiben vorerst 93 Datensätze (90,3 %) in der Auswertung, die 1276 (95,5 %) der unsprünglich zusammengetragenen Individuen repräsentieren. Nur 25 Individuen aus 25 Datensätzen stammen von TROTTER UND PETERSON (1970), dagegen 396 Individuen aus 29 Datensätzen von MERZ ET AL. (1956), 240 Idividuen aus 16 Datensätzen von TROTTER UND HIXON (1974), 115 Individuen aus 2 Datensätzen von BAKER UND NEWMAN (1957) und jeweils 100 Individuen aus 4 bzw. 5 Datensätzen von SEALE (1959) bzw. INGALLS (1931) und damit aus Arbeiten mit einem direkten-invasiven Zugang zur Bestimmung der Skelettmasse. Weiterhin wurden 300 Individuen aus 12 Datensätzen von GARN (1970) berücksichtigt. Diese werden aber vor einem zweiten Durchlauf zur Modellierung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ ausgeschlossen, so dass für die endgültige Auswertung 81 Datensätze (78,6 %) mit 976 Individuen (73,0 %) der ursprünglichen Datensammlung verwendet wurden.

Die Bestimmung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ erfolgt auch hier in Abhängigkeit vom Lebensalter getrennt für beide Geschlechter. In nachfolgender Tabelle 27 ist eine kurze Beschreibung der Daten nach Alter und Skelettmasse sowohl für die vorliegenden 93 Datensätze, als auch für die dadurch repräsentierten 1276 Individuen gegeben.

Diese Stichprobe setzt sich aus 763 (59,8 %) Männern und 513 (40,2 %) Frauen zusammen. Es fällt die deutlich geringere Skelettmasse der Frauen im Vergleich zu der Skelettmasse der Männern auf, welche, bei annähernd gleicher Altersstruktur in beiden Geschlechtern, nur etwa 70 % der Skelettmasse der Männer erreichen.

Tabelle 27: Beschreibung der 93 Datensätze (a) bzw. 1276 Individuen (b) für Alter (Jahren) und Skelettmasse (g), getrennt nach Geschlecht (siehe Anhang 25).

a) Datensätze

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Alter (Jahre)								
männlich	53	44,25	19,55	20,50	23,75	43,50	60,25	83,50
weiblich	40	48,23	19,44	20,50	33,50	49,00	63,88	84,50
Gesamt	94	45,96	19,50	20,50	24,75	44,50	62,00	84,50
Skelettmasse (g)								
männlich	53	4533,29	576,32	3184,70	4142,00	4550,00	4959,06	5621,00
weiblich	40	3136,43	524,13	2130,00	2818,30	3053,20	3578,13	4030,00
Gesamt	94	3932,49	887,50	2130,00	3167,35	3941,00	4680,00	5621,00

b) Individuen

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Alter (Jahre)								
männlich	763	49,27	17,64	20,50	34,50	54,50	62,00	83,50
weiblich	513	54,94	15,56	20,50	45,00	54,50	65,00	84,50
Gesamt	1276	51,55	17,06	20,50	35,00	54,50	62,00	84,50
Skelettmasse (g)								
männlich	763	4354,01	531,90	3184,70	3973,20	4290,00	4860,00	5621,00
weiblich	513	2944,59	474,40	2130,00	2724,00	2878,00	3138,55	4030,00
Gesamt	1276	3787,37	858,71	2130,00	2989,00	3886,00	4417,00	5621,00

Die Deskription der 81 Datensätze bzw. 976 Individuen nach Ausschluss der Daten von GARN (1970) ist in Tabelle 28 enthalten. Diese Stichprobe setzt sich aus 613 Männern (62,8 %) und 363 Frauen (37,2 %) zusammen. Bei den Frauen ergibt sich eine Erhöhung des Durchschnittsalters um ca. 2 Jahre von 55,2 ± 15,77 Jahre auf 57,05 ± 14,24 Jahre. Gleichzeitig erhöht sich sowohl die durchschnittliche als auch mediane Skelettmasse sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen um etwa 100 g. Der deutliche Unterschied zwischen den Skelettmassen zwischen Männern und Frauen bleibt jedoch erhalten. Bei annähernd gleicher Altersstruktur in beiden Geschlechtern, erreichen Frauen durchschnittlich nur etwa 68 % der Skelettmasse der Männer.

Tabelle 28: Beschreibung der 81 Datensätze (a) bzw. 976 Individuen (b) für Alter (Jahre) und Skelettmasse (g), getrennt nach Geschlecht und nach Ausschluss der Daten von GARN (1970) (siehe Anhang 25).

a) Datensätze

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Alter (Jahre)								
männlich	47	43,53	19,71	20,50	23,50	43,50	59,50	83,50
weiblich	34	47,94	19,79	20,50	32,13	48,75	62,63	84,50
Gesamt	81	45,38	19,74	20,50	24,00	44,50	61,50	84,50
Skelettmasse (g)								
männlich	47	4581,50	593,46	3184,70	4200,00	4585,00	4988,00	5621,00
weiblich	34	3198,18	542,94	2130,00	2941,38	3173,50	3669,25	4030,00
Gesamt	81	4000,85	892,19	2130,00	3328,75	3955,00	4846,49	5621,00

b) Individuen

	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Alter (Alter)								
männlich	613	49,13	17,72	20,50	26,50	54,50	61,00	83,50
weiblich	363	57,05	14,24	20,50	53,00	54,50	64,50	84,50
Gesamt	976	52,07	16,94	20,50	37,50	54,50	62,00	84,50
Skelettmasse (g)								
männlich	613	4402,54	579,59	3184,70	3941,00	4417,00	4923,65	5621,00
weiblich	363	3009,92	543,39	2130,00	2620,50	2989,00	3659,00	4030,00
Gesamt	976	3884,59	879,77	2130,00	3184,70	3941,00	4575,00	5621,00

IV 3 Methoden der Statistik

IV 3.1 Einführung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zur Liegezeitbestimmung von humanen Knochen (-geweben) unter Ausnutzung des Atombomben-Effektes und damit einhergehend von veränderlichen ^{14}C-Konzentrationen im Knochenkollagen (nach 1950) zu erarbeiten. Trotz der Nähe zur Radiocarbon-Methode handelt es sich bei der forensischen Radiocarbon-Datierung, kurz FoRCaDa, jedoch um ein mathematisches Modell, mit dem im Kollagen gemessene ^{14}C-Konzentrationen interpretiert werden sollen in Abhängigkeit von:

- Den jeweiligen Lebensdaten eines Individuums (Geburtsjahr, Sterbejahr, Alter)
- Den veränderlichen ^{14}C-Konzentrationen in der Atmosphäre, denen dieses Individuum zu seinen Lebzeiten ausgesetzt war (^{14}C-Kurve der Atmosphäre) und schließlich
- Den biologischen Prozessen, über die das ^{14}C während der Lebensspanne eines Menschen in das Gewebe aufgenommen wurde (jährliche relative Skelettmasse-Änderung ΔSM und jährliche Austauschrate $1/t_C$).

In der vorliegenden Arbeit wird diese Methode schrittweise entwickelt und auf ihre Anwendbarkeit in der forensischen Routine überprüft. Sie ist dementsprechend mehrteilig und vorrangig *deskriptiv* und *explorativ* ausgerichtet:

(1) Statistische Tests und gemischte lineare sowie Regressions-Modelle werden als Instrumente zur Modell-Entwicklung und als Entscheidungshilfe bei der Formulierung des theoretischen Modells FoRCaDa eingesetzt

(2) Mit dem Modell FoRCaDa werden anschließend für maximal 74 Proben von 66 Individuen (vgl. Kap. IV 3.4) ^{14}C-Werte berechnet. Aus dem Vergleich von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten unter Verwendung von Regressions-Analysen wird auf die prinzipielle Eignung der Methode zur Liegezeitbestimmung in der Forensik geschlossen

(3) Eine erste Überprüfung erfolgt beispielhaft für einige Proben, indem von dem gemessenen auf den berechneten ^{14}C-Wert geschlossen wird (*Prinzip* einer Umkehr-Regression).

Zur Beschreibung der Daten werden geeignete statistische, einschließlich graphische Mittel eingesetzt. Qualitative Merkmale, wie z. B. Geschlecht, Skelettregion, Rasse, werden mit absoluten und relativen Häufigkeiten, z. T. mit Häufigkeitsdiagrammen und bei einem bivariaten Vergleich in Kontingenztafeln dargestellt. Rang- und stetige Parameter, wie z. B.

^{14}C-Konzentration und Alter, werden vorrangig parameterfrei mit Minimum, 1. Quartil, Median, 3. Quartil und Maximum (Min, Q1, Median, Q3, Max) und parametrisch mit Mittelwert und Standardabweichung (MW ± s) und teilweise unter Verwendung der Spannweite (Min bis Max), des (prozentualen) Varianzkoeffizienten (cv = s / MW bzw. %cv = 100 % x s/MW) sowie unter Verwendung von 95 %-Konfindenzintervallen (95%KI) beschrieben bzw. verglichen. Bivariate Vergleiche erfolgen mit mehrteiligen Tabellen oder mit Punktewolken z. B. als Residuendiagramm (Residuenplots).

Für den gleichzeitigen (multiplen) Vergleich zwischen einer stetigen Zielgröße, z. B. ^{14}C-Konzentration und Skelettmasse, und mehreren Einflussgrößen, wie z. B. Geschlecht und Alter oder Alter², werden gemischte lineare Modelle und lineare Regressions-Modelle gerechnet. Beiden Verfahren ist gemeinsam, dass sie den linearen Zusammenhang zwischen Zielgröße und den Einflussgrößen erfassen, der sich allgemein mit nachstehender Formel 9 darstellen lässt:

Formel 9: $$\mathbf{E(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + ... + \beta_n X_n + \varepsilon}$$

E(Y)	(Erwartungswert der) Zielgröße
$ß_o$	Y-Achsenabschnitt, Intercept
$ß_1...ß_n$	Regressionskoeffizienten
$X_1...X_n$	Einflussgrößen
ε	Zufallsfehler, Restvariabilität

Handelt es sich bei den Einflussgrößen nur um stetige Merkmale (Co-Variate), werden multiple Regressions-Modelle gerechnet. Stellen die einzelnen Einflussgrößen dabei Potenzen einer einzigen Einflussgröße dar, z. B. Alter, Alter², Alter³ ..., so spricht man von Polynomen 2., 3. Grades usw. (eine einfache lineare Regression wird nachfolgend wegen des einfacheren Sprachgebrauchs als „Polynom 1. Grades“ bezeichnet). Auf diese Weise können über den linearen Zusammenhang hinaus noch quadratische, kubische ... Anteile des Parametereinflusses auf die Zielgröße geschätzt werden. Diese Modelle finden sich häufig zur Beschreibung von Wachstums- und Schrumpfungsprozessen in der Anthropologie (z. B. RINGE ET AL. 1977, RIGGS ET AL 1981, GARN UND SHOW 1976). Sie stellen einen spezifischen Ausschnitt aus sogenannten fraktionierten Polynomen dar, in denen die Einflussgröße z. B. in einer Wurzelfunktion, als Quotient oder in logarithmischer Umformung berücksichtigt werden kann. Sollen dagegen sowohl Co-Variate als auch Faktoren – also qualitative Merkmale – berücksichtigt werden, kommen gemischte lineare Modelle (bzw. Co-Varianz-Analysen) zur Anwendung, die somit eine Verallgemeinerung von Regressions- und varianzanalytischen Modellen (die nur klassierte Merkmale oder Faktoren kennen) darstellen und erlauben darüberhinaus z. B.:

- Die Berechnung von festen (fixen) und zufälligen (random) Effekten. Die zufälligen Effekte lassen eine verallgemeinerte Aussage zu, da versucht wird, über die konkret vorliegenden Daten hinaus eine Abhängigkeit zwischen Einfluss- und Zielgröße zu erfassen
- Die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen
- Die Berücksichtigung bestimmter Abhängigkeitsstrukturen zwischen den Einflussgrößen (hierarische Strukturen, Messwiederholungen und Zeitabhängigkeit).

Regressions- und gemischte lineare Modelle setzen die Unabhängigkeit der Einflussgrößen untereinander und die Homogenität der Varianzen bezüglich der Zielgröße sowie eine Normalverteilung der Residuen voraus. Residuen stellen die Differenzen aus den beobachteten und den mit dem Modell berechneten Werten für die Zielgröße dar. Die Überprüfung der Varianzhomogenität erfolgt grafisch anhand von sogenannten Residuenplots, in denen in Form einer Punktewolke jedem berechneten Wert die Differenz aus beobachtetem und berechnetem Wert zugeordnet wird, und teilweise mit dem Test auf Heteroskedastizität.

Die Berechnungen werden mit SAS®, Version 8.2 für PC durchgeführt. Da in diesem Statistikpaket mehrere, z. T. gleichwertige Prozeduren bzw. sehr differenzierte Modellierungsanweisungen zur Verfügung stehen, wird nachfolgend, auch wegen der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, z. B. der Programmiercode bzw. entsprechende Anweisungen (Statements) angegeben. Zur „Dechiffrierung“ dieser komplexen Programmiersprache muss jedoch auf die online-Hilfe von SAS® bzw. entsprechende Handbücher verwiesen werden.

Bei der Vielzahl der für eine Zielgröße (z. B. ^{14}C-Konzentration, Skelettmasse) zu berechnenden Modelle muss entschieden werden, welches dieser Modelle die Daten letztendlich am besten beschreibt:

- Beim Vergleich mehrerer gemischter linearer Modelle (Proc Mixed) wird diese Entscheidung anhand des Akaike-Maßes (AIC) getroffen, welches die Zufälligkeit der Datenstruktur beschreibt und gleichzeitig die Anzahl der in das Modell eingehenden Parameter berücksichtigt. Bei einem Vergleich verschiedener Modelle untereinander beschreiben kleinere Werte für den AIC ein an die Datenstruktur besser angepasstes Modell
- Beim Vergleich mehrerer Regressions-Modelle (Proc Reg) wird diese Entscheidung anhand des Tests auf Heteroskedastizität und des adjustierten Bestimmtheitsmaßes (R^2_{adj}) getroffen.
  Beim Test auf Heteroskedastizität wird geprüft, ob Modellspezifikationen wie z. B. die Unabhängigkeit der Varianzen eingehalten werden. Bei einem p-Wert > 5 % wird ein Modell als ausreichend valide angesehen, da das Gegenteil der zu prüfenden Annahmen in der Alternativhypothese formuliert wird und diese durch den Test nicht bestätigt werden kann.

Beim R^2_{adj} wird die für die Zielgröße beobachtete Variabilität direkt auf die im Modell berücksichtigten Einflussgrößen und die Anzahl der Beobachtungen zurückführt. Damit können unterschiedlich komplexe Modelle unmittelbar miteinander verglichen werden. Dabei können auch negative Werte vorkommen (Formel 10). Bei einem Vergleich verschiedener Modelle beschreiben höhere Werte für R^2_{adj} ein an die Datenstruktur besser angepasstes Modell. Zum Beispiel bedeutet ein Wert von 0,8 für R^2_{adj}, dass 80 % der Variabilität in der Zielgröße allein durch die im Regressions-Modell berücksichtigten Einflussgrößen erklärt werden

Formel 10: $\mathbf{R^2_{adj}} = 1 - \frac{n-1}{n-p}(1-R^2)$

n Anzahl der Beobachtungen

p Anzahl der Einflussgrößen im Modell

- Innerhalb eines Modells wird anhand der p-Werte (Pr > |t| in Solution for Fixed Effects der Proc Mixed bzw. den Parameter Estimates der Proc Reg) entschieden, ob für einen Faktor bzw. eine Co-Variate mit einem Einfluss auf die Zielgröße gerechnet werden kann, wobei p-Werte < 0,01 (1 %) einen gesicherten, p-Werte < 0,05 (5 %) einen möglichen und p-Werte ≤ 0,1 (10 %) einen vagen Einfluss anzeigen (können)
- Gehen in ein Modell nur stetige Einflussgrößen ein, wird die Proc Reg gerechnet. Zwar sind die Regressionskoeffizienten und der berechnete Y-Achsenabschnitt bis auf Rundungsunterschiede zwischen den beiden Prozeduren in SAS® (Proc Mixed und Proc Reg) gleich, doch erlaubt die Proc Reg einen leichteren Zugriff auf die Residuen, zusätzlich eine Überprüfung der Unabhängigkeit der Einflussgrößen voneinander durch die Darstellung der (Multi)Kollinearität und Korrelationsstruktur sowie mit dem Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} eine bessere Interpretation der Modelle. Zusätzlich können das 95 %-Konfidenzintervall für die Regressions-Gerade und die 95 %-Prädiktionsgrenzen für die Einzelwertvorhersage aufgerufen werden.

Weiterhin sind einführende Bemerkungen zur Berechnung von (Sterbe-)Alter und (begonnenen) Lebensjahren notwendig:

Das Alter eines Individuums errechnet sich als Differenz aus aktuellem bzw. Sterbe- und Geburtsdatum (Formal 11 a), und erfasst die bereits gelebten Jahre. Es wird häufig auf eine Dezimalstelle oder auch wie in dieser Arbeit ganzzahlig gerundet. Die ganzzahlige Rundung trifft sich mit der umgangssprachlichen Handhabung des Begriffs „Alter“: Ein 30jähriger wird in der Regel solange sein Alter mit 30 Jahren angeben, solange er nicht seinen 31. Geburtstag erlebt hat. Auf diese Weise kann das tatsächliche Alter mit bis zu einem Jahr unterschätzt werden.

Demgegenüber wird ein Lebensjahr am jeweiligen Geburtstag begonnen (Formel 11 b). Vereinfacht lässt es sich als Alter + 1 Jahr berechnen: Das 31. Lebensjahr beginnt, um im obigen Beispiel zu bleiben, also am Tag des 30. Geburtstages.

Formel 11: a) **Alter = Sterbedatum – Geburtsdatum**
= Sterbejahr – Geburtsjahr
b) **Lebensjahr = Sterbedatum – Geburtsdatum + 1 Jahr**
= Sterbejahr – Geburtsjahr + 1 Jahr
= Alter + 1 Jahr

Problematisch ist die Berechnung des Alters sowie der Lebensjahre, wenn wie in dieser Studie und regelhaft in der forensischen Osteologie nur Geburts- und Sterbejahr bekannt sind. Es wird dabei angenommen, dass ein Individuum zur Mitte eines Kalenderjahres, also am 01.07., geboren wurde. Vergleicht man beide Berechnungsmodi, wird deutlich, dass das Alter und die Lebensjahre auf der alleinigen Grundlage von Geburts- und Sterbjahr:

- Um 1 Jahr überschätzt werden, wenn ein Individuum nach dem 01.01. aber vor erreichen seines Geburtstages verstirbt. In der vorliegenden Studie betrifft dies 11 Individuen (ID 52, 55, 58, 62, 67, 72, 80, 87, 88, 98 und 99, Anhang 13)
- Durch die Addition von einem Jahr wird der Unterschätzung bis zu einem Jahr für Individuen begegnet, die vor dem 31.12., aber bereits nach ihrem Geburtstag verstorben sind. In der vorliegenden Studie wird dies anhand der vorliegenden Daten nicht beobachtet (Anhang 13).

Die rechnerisch bedingten Abweichungen von maximal + 1 Jahr bei der Berechnung von Alter bzw. Lebensjahren beeinflussen die Genauigkeit einer jeden Datierungsmethode. Sie sind aber im Vergleich zu den Schwierigkeiten der Altersbestimmung bei nicht identifizierten Skelettfunden als eher gering einzuschätzen.

IV 3.2 Auswahl von Einflussgrößen auf die ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe

In diesem Abschnitt der Studie geht es um die Identifikation der wichtigsten Einflussgrößen auf die gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochengewebe als Zielgröße (Kap. V 1 und VI 1).

Bei der Zielgröße handelt es sich aus physikalischer Sicht bei jedem einzelnen gemessenen ^{14}C-Wert um eine normalverteilte Größe: Denn es wird in einem Zeitintervall wiederholt die Zerfallsrate über eine definierte Zeiteinheit hinweg bestimmt und die so gewonnenen Einzelwerte nachfolgend verrechnet. Daraus ergibt sich eine Angabe der ^{14}C-Konzentration bzw. des abgeleiteten Radiocarbonalters mit Mittelwert und Standardabweichung (MW ± s), die strenggenommen eine unlösbare Einheit darstellen. Sie werden im Sinne von Vertrauensintervallen interpretiert (GEYH 1983): Der gesuchte und eigentlich unbekannte ^{14}C-Wert liegt:

- Mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3 % in dem von MW ± 1s gebildeten Intervall,
- Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,5 % in dem von MW ± 2s gebildeten Intervall,
- Mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,7 % in dem von MW ± 3s gebildeten Intervall,
- Mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9 % in dem von MW ± 4s gebildeten Intervall.

Um verschiedene ^{14}C-Daten miteinander vergleichen zu können, müssen diese Daten alle derselben Normalverteilung entstammen (GEYH 1983). Dies ist bei den hier zusammengetragenen Einzelwerten sicherlich nicht der Fall. Zwar handelt es sich durchweg um ^{14}C-Daten, jedoch wurden diese in verschiedenen Laboratorien und zu unterschiedlichen Zeiten (z. B. L'ORGANE UND ZIMEN 1969a, eigene Daten von 1992 bis 1995), mit verschiedenen Techniken (z. B. AMS und Röhrentechnik) und vor allem für verschiedene Gewebefraktionen (Kollagen, Apatit, Fett) und Gewebearten (Spongiosa, Kompakta) erhoben. Daher wird in zwei voneinander unabhängigen Untersuchungen der Einfluss verschiedener Parameter auf die ^{14}C-Konzentration im Kollagen (Kap. IV 3.2.1) bzw. die zu beobachtenden Unterschiede in der ^{14}C-Konzentration zwischen den drei Gewebefraktionen bzw. zwei Gewebearten untersucht (Kap. IV 3.2.2). Zur Berechnung von Mittelwerten aus verschiedenen ^{14}C-Daten wird bei unterschiedlichen Standardabweichungen der zu verrechnenden Proben Formel 12 verwendet:

Formel 12: wenn $s_1 \neq s_2 \neq ... \neq s_n$:

$$\textbf{Mittelwert}_{\Delta^{14}C} \pm \textbf{S}_{\Delta^{14}C} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta^{14}C_i * \frac{1}{s_i^2}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{s_i^2}} \pm \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{s_i^2}}}$$

Bei den *Einflussgrößen* auf die ^{14}C-Konzentration handelt es sich vorrangig um die Zeitvariablen, d. h. Sterbejahr, Alter und Geburtsjahr, wobei in der „klassischen“ Radiocarbon-Methode über das Sterbejahr die Verknüpfung zwischen gemessener ^{14}C-Konzentration und Kalender- bzw. Radiocarbon-Jahren erfolgt. Als weitere Einfluss- bzw. Störgrößen sind Geschlecht (männlich, weiblich), Skelettregion (kranial, postkranial) und Pathologien (vorhanden: ja / nein) sowie Gewebefraktion (Kollagen, Apatit, Fett), Gewebeart (Kompakta, Spongiosa), Gewebealter sowie Aufbereitungsmethode zu nennen. Die Interpretation als Einfluss- oder Störgröße hängt davon ab, inwieweit diese in einem mathematischen Modell berücksichtigt werden kann, sich also qualitativ bzw. quantitativ fassen lässt.

Bei den vorliegenden Daten kann die Unabhängigkeit der Einflussgrößen für die stetigen Zeitvariablen nur dann angenommen werden, wenn maximal zwei Variablen – und dann egal welche beiden – im Modell verbleiben. Denn das Alter ergibt sich als Differenz aus Sterbejahr und Geburtsjahr. Für die klassierten Zeitvariablen, z. B. in 10- bzw. 20-Jahresklassen (siehe Kap. IV 1), ist die Abhängigkeit der Zeitvariablen untereinander dagegen weitesgehend aufgehoben und somit können alle drei gleichzeitig in einem Modell berücksichtigt werden.

IV 3.2.1 Der Einfluss von Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Pathologie und Skelettregion auf die ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen

Der Einfluss der Co-Variablen und Faktoren auf die ^{14}C-Konzentration im Kollagen wird mit Hilfe von gemischten linearen Modellen untersucht. Da aus den Überlegungen zur Zielgröße und zur Herkunft der ^{14}C-Werte die Homogenität der Varianzen nicht vorausgesetzt werden kann, werden die Proben zusätzlich in eigene Proben und Literaturdaten klassiert. Für diese beiden Proben-*Gruppen* wird in den verschiedenen mathematischen Modellen die Berechnung unterschiedlicher Varianzen zugelassen. Die Proben innerhalb einer Gruppe stellen voneinander unabhängige Beobachtungen dar. Darüberhinaus ergeben sich folgende allgemeine Überlegungen zu den zu berechnenden gemischten linearen Modellen:

- Zielgröße: Gemessener *Mittelwert* für die ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen. Diese Vereinfachung ist erlaubt, da nicht, wie in der klassischen Radiocarbon-Methode, verschiedene Messdaten z. B. für ein Objekt bzw. eine archäologische Lokalität verglichen werden, sondern es soll auf einer sehr verallgemeinerten Ebene eine mögliche Abhängigkeit der ^{14}C-Konzentration von Einflussgrößen überprüft werden
- Faktoren: Geschlecht, Skelettregion, Pathologien, Gruppe
  Co-Variable: Alter, Geburtsjahr, Sterbejahr (jeweils stetig bzw. klassiert)
- Wechselwirkungen: werden nicht modelliert
- fix: Geschlecht, Skelettregion, Pathologien
  Alter, Geburtsjahr, Sterbejahr (jeweils stetig bzw. klassiert)
  random: Die einzelnen Proben innerhalb einer Gruppe können als zufällige Effekte bewertet werden bzw.
- repeated: Die einzelnen Proben in einer Gruppe können auch als Messwiederholungen angesehen werden.

Vor der Umsetzung in SAS® ist somit zu entscheiden, wie die einzelnen Proben in den Gruppen (Literaturdaten und eigene Proben) im Modell berücksichtig werden sollen. Allgemein stellt sich für lineare Modelle die Kovarianzmatrix V(Y) für die Zielgröße dar als:

Formel 13: $\mathbf{V(Y) = ZGZ^T + R}$ wobei die ZGZ^T-Matrix die zufälligen Effekte und die R-Matrix die Zufallsfehler je Beobachtung moduliert

Die G-Matrix wird über die zufälligen Effekte moduliert (Statement *random*; Proc Mixed). Dadurch wird der Einfluss jeder einzelnen Probe auf die Zielgröße innerhalb ihrer Gruppe beschrieben. Gleichzeitig wird ein über alle Proben gemittelter zufälliger Fehler geschätzt, der die R-Matrix bildet. Allerdings können bei zufälligen Effekten negative Korrelationen zwischen den Einflussgrößen nicht berücksichtigt werden, wie diese z. B. in der Beziehung zwischen Alter und Geburtsjahr vorliegen, so dass dieser theoretisch mögliche Ansatz nicht umgesetzt wird. Diese negative Korrelation zwischen Alter und Geburtsjahr kann nicht überraschen und ergibt sich aus der Beschränkung auf rezente Proben, die zum Zeitpunkt der Probensammlung zum Jahr 1992 verfügbar gewesen sein müssen. Daraus ergibt sich, dass ein junges Individuum auch später geboren worden ist.

Im Gegensatz dazu kann die R-Matrix auch über Wiederholungsmessungen moduliert (Statement *repeated*; Proc Mixed). Dadurch wird für jede Gruppe ein durchschnittlicher Zufallsfehler geschätzt. Dieser kann für beide Gruppen unterschiedlich sein. In diesem Fall

stellen die beiden Gruppen die beiden Beobachtungen dar. Da bei Messwiederholungen negative Korrelationen zwischen den Einflussgrößen berücksichtigt werden können, wird dieses Modell als adäquat für die vorliegende Datensituation angesehen. Daraus ergibt sich nachfolgende Umsetzung in SAS®, wobei die Platzhalter FAKTOREN und CO-VARIATE in den konkreten Modellen durch die jeweiligen Einflussgrößen ersetzt werden:

```
proc mixed covtest;
     class    FAKTOREN gruppe;
     model    C14 = CO-VARIATE FAKTOREN  /solution;
     repeated /group=gruppe r ;
run;
```

Die Modelle werden sowohl für alle vorliegenden 66 Proben als auch für einen um 7 Proben reduzierten Datensatz gerechnet (nach Ausschluss von ID 1, 50, 51, 52, 53, 63, 64, vgl. Kap. V 1.2.2). Die Ergebnisse sind im Kapitel V 1.2.2 für die 74 Proben von 66 Individuen und in Kapitel V 1.2.3 für die 59 Proben detailliert dargestellt (vgl. Kap. IV 1.2). Dabei ergab sich nur für die stetigen Einflussgrößen, also Sterbejahr, Alter und Geburtsjahr ein Zusammenhang mit der ^{14}C-Konzentration. Für diese drei Parameter werden alle möglichen einfachen und multiplen linearen Regressionen gerechnet:

```
proc reg alpha=0.05 all rsquare;
     where  id not in (1,50,51,52,53,63,64);
     var    alter sterbejahr geburtsjahr;
     model  c14= alter sterbejahr geburtsjahr /selection=adjrsq
                                               cli clm collin;
run;quit;
```

Zusätzlich werden die 95 %-Konfidenzintervalle der Regressionsgeraden (clm) sowie die 95%-Prädiktionsgrenzen für die Einzelwerte (cli) und die Kollinearitätsmatrix (collin) angefordert. Als bestgeeignetes Modell wird das mit dem höchsten adjustieren R^2 angesehen (R^2_{adj}; Model-Statement /*selection* = *adjrsq*; Proc Reg). Die Ergebnisse werden ebenfalls in Kapitel V 1.2.2 und V 1.2.3 vorgestellt und in Kapitel VI 1.2 diskutiert.

IV 3.2.2 Der Einfluss der Gewebefraktion, der Aufbereitungsmethode und der Gewebeart auf die ^{14}C-Konzentration im Knochen

In diesem Kapitel erfolgt die Beurteilung der Proben rein deskriptiv und mit Hilfe von Grafiken und ist im Sinne einer Kasuistik zu werten. Liegen für eine Probe (ID) Messwerte für mehrere Gewebefraktionen vor, werden Differenzen nach Formel 12 in Kapitel IV 3.2 berechnet und beurteilt.

IV 3.3 Die Bestimmung der jährlichen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$

IV 3.3.1 Beurteilung der Homoskedastizität

In der verwendeten Literatur zur Beurteilung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ (siehe Kap. IV 2) finden sich sowohl Einzelwerte als auch Mittelwerte für eine unterschiedliche Anzahl von Individuen (Anhang 21 und 25). Obwohl es sich bei der Skelettmasse um eine ausreichend normalverteilte Zielgröße handelt, muss mit zunehmendem Alter mit einer zunehmenden interindividuellen Variabilität gerechnet werden, die mit normalen biologischen Prozessen zusammenhängt. Dies muss bei der Anpassung (linearer) Regressionsmodelle dazu führen, dass mit der Zunahme der Einflussgröße (hier Alter) die Vorhersage für die Zielgröße (hier Skelettmasse) anhand der Berechnungen ungenauer wird. Die Residuen (Differenzen aus berechneter und gemessener Zielgröße je Beobachtung) schwanken zunehmend um „0“. Es wird hier versucht, dieser *nicht* konstanten Fehlervarianz oder Heteroskedastizität (NETER ET AL. 1996) auf nachfolgende Weise entgegenzusteuern:

Um für die Skelettmasse das Ausmaß der Abhängigkeit der Standardabweichung von dem jeweiligen Mittelwert je Altersklasse und Geschlecht zu überprüfen, wurden Berechnungen durchgeführt:

- Einmal unter Berücksichtigung der je Datensatz vorliegenden Individuen (Parameter anzahl; Statement *freq anzahl;* Proc Univariate) und

- Einmal unter Verwendung eines Gewichtungsfaktors (Parameter gewicht; Statement *weight gewicht;* Proc Univariate)
- Weiterhin wird bei der Berechnung der Regressionsmodelle über die Ausgabe der Residuenplots ein erster Eindruck über die Verteilung der Residuen gewonnen (Statement *plot*; Prog Reg) und es wird der Test auf Heteroskedastizität aufgerufen (model-Statement */spec*; Prog Reg).

Zur Gewichtung wird ein Faktor *gewicht* gebildet. Mit diesem soll berücksichtigt werden, dass die Variabilität mit dem Alter zunimmt, d. h., ältere Individuen sollen weniger stark im Modell berücksichtigt werden als jüngere. Gleichzeitig sollen Werte in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Individuenzahl unterschiedlich im Modell gewichtet werden, und zwar je größer die jeweilige Stichprobe ist, um so stärker. Damit eine hohe Individuenzahl aber nicht übermäßig ‚belohnt' wird, geht diese nur mit ihrer Quadratwurzel ein (Formel 14). Das Alter wird je Datensatz als Mittelwert aus den jeweiligen Intervallgrenzen für das Alter berechnet. Datensätze, bei denen die Individuenzahl unbekannt ist, werden von der Auswertung ausgeschlossen. Ist das berechnete Alter „0", wird dieses für die Berechnung des Gewichtungsfaktors auf 0,1 Jahre gesetzt, damit eine Division mit „0" vermieden wird:

Formel 14: $$Gewichtungsfaktor = \frac{\sqrt{Individuenzahl}}{Alter}$$

Nachfolgend findet sich der SAS®-Code zur Beurteilung der Abhängigkeit der Standardabweichung von der mittleren Skelettmasse je Altersklasse. Die Ergebnisse dazu werden in Kapitel VI 2.3.1 für Individuen bis 22,5 Jahre und in Kapitel VI 2.4.1 für Individuen ab 20,5 Jahre diskutiert. In dieser Auswertung wurden nur Altersklassen berücksichtigt, die durch mindestens 2 Datensätze repräsentiert wurden (Anhang 21, 22, 25 und 26):

```
*Getrennt nach Geschlecht je Altersklasse;
proc sort        data=daten1;by alter;
proc univariate  data=daten1 noprint pctldef=4;
     by          alter;
     var         skelettmasse;

    *entweder diesen Aufruf:
     freq        anzahl;           * berücksichtigt Individuenzahl je Datensatz;

    *oder diesen Aufruf:
     weight      gewicht;          * berücksichtigt gewichtete Datensätze;

     class       geschlecht;
     output      out=daten2 mean=mw std=s;

proc sort        data=daten2;by geschlecht;
proc reg         data=daten2;
     by          geschlecht;
     model       s = mw /spec;
     plot        s*mw;
run;quit;
```

IV 3.3.2 Selektion von Einflussgrößen auf die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$

Es soll getrennt für Individuen bis zu einem Alter von 22,5 Jahren bzw. ab einem Alter von 20,5 Jahren untersucht werden, welche Einflussfaktoren auf die Skelettmasse$_{netto}$ einwirken. Dazu werden verschiedene, aufeinander aufbauende gemischte Modelle mit der Prozedur Proc Mixed in SAS® berechnet. Für diese gelten folgende allgemeine Überlegungen:

- Zielgröße: Skelettmasse$_{netto}$
- Faktoren: Geschlecht, Rasse, Literatur (= Methode der Skelettmassebestimmung)
  Co-Variable: Alter
- Wechselwirkungen: Alter x Geschlecht
- Datensätze: Gewichtet (Statement *weight gewicht;*)
- fix: Alle Einflussgrößen
  random: Nur in den Modellen 1 und 2 werden die einzelnen Proben innerhalb eines Geschlechts als zufällige Beobachtungen bezüglich des Intercepts (y-Achsenabschnitt) gewertet.

Im Gegensatz zu den Modellen in Kapitel IV 3.2.1 zur Modellierung der ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen wird die Kovarianzmatrix V(Y) für die $Skelettmasse_{netto}$ in den Modellen 1 und 2 als G-Matrix moduliert. Gleichzeitig wird ein über alle Proben gemittelter zufälliger Fehler geschätzt, der die R-Matrix bildet

- In Modell 1 wird untersucht, wie groß sich die interindividuelle Variabilität bei der $Skelettmasse_{netto}$ darstellt, ohne dass irgendein Einflussfaktor berücksichtigt wird
- In Modell 2 wird die Abhängigkeit der $Skelettmasse_{netto}$ vom Alter betrachte
- Durch das random-Statement /*subject = geschlecht* kann in diesen beiden Modellen die Variabilität zwischen den beiden Geschlechtern und die Variabilität innerhalb eines Geschlechts geschätzt und somit der Interkorrelations-Koeffizient (IKK) berechnet werden als:

  Formel 15:

$$\textbf{IKK} = \frac{\text{Variabilität zwischen den Geschlechtern}}{(\text{Variabilität zwischen den Geschlechtern} + \text{Variabilität innerhalb eines Geschlechts})}$$

- Ab Modell 3 werden nur fixe Effekte berücksichtigt. Verallgemeinerte Aussagen über die beobachteten Daten hinaus, wie diese durch zufällige Effekte geschätzt werden könnten, machen inhaltlich bei den Faktoren Geschlecht, Rasse und Literatur keinen Sinn, wobei in dem Faktor Literatur der Einfluss der Methode codiert wird. Es lassen sich Arbeiten mit invasiven Zugang (z. B. die Arbeiten der Arbeitsgruppe um TROTTER) von Arbeiten mit nicht-invasivem Zugang (z. B. die Arbeiten der Arbeitsgruppe um GARN) unterscheiden. Die Ergebnisse werden in Kapitel VI 2.3.2 für Individuen bis 22,5 Jahre und in Kapitel VI 2.4.2 für Individuen ab 20,5 Jahre diskutiert.

```
**_____________________________  bis 22,5 Jahre  _____________________________**
Aufruf der proc mixed jeweils nur mit einem model und einem random statement!;
proc mixed  covtest;
     weight gewicht;
     class  geschlecht rasse literatur;

     *(Modell 1, vgl. Kap. VI 2.3.2);
     model  skelettmasse=     /solution;
     random intercept         /subject=geschlecht;

     *(Modell 2, vgl. Kap. VI 2.3.2);
     model  skelettmasse=alter/solution;
     random intercept         /subject=geschlecht;

     *(Modell 3, vgl. Kap. VI 2.3.2);
     model  skelettmasse=alter geschlecht rasse literatur alter*geschlecht /solution;
run;

     *(Modell 4, vgl. Kap. VI 2.3.2);
proc sort;  by geschlecht;
proc mixed  covtest;
     weight gewicht;
     by     geschlecht;
     model  skelettmasse=alter/solution;
run;

**_____________________________  ab 20,5 Jahre  _____________________________**
Aufruf der proc mixed jeweils nur mit einem model und einem random statement!;
proc mixed  covtest;
     weight gewicht;
     class  geschlecht rasse literatur;

     *(Modell 1, vgl. Kap. VI 2.4.2);
     model  skelettmasse=      /solution;
     random intercept          /subject=geschlecht;

     *(Modell 2, vgl. Kap. VI 2.4.2);
     model  skelettmasse=alter /solution;
     random intercept          /subject=geschlecht;

     *(Modell 3, vgl. Kap. VI 2.4.2);
     model  skelettmasse=alter geschlecht rasse literatur alter*geschlecht /solution;

     *(Modell 4, vgl. Kap. VI 2.4.2);
     where  literatur^='Garn';
     model  skelettmasse=alter geschlecht rasse literatur /solution;
run;

     *(Modell 5, vgl. Kap. VI 2.4.2);
proc sort;  by geschlecht;
proc mixed  covtest;
     where  literatur^='Garn';
     by     geschlecht;
     weight gewicht;
     model  skelettmasse=alter rasse literatur /solution;
run;
```

IV 3.3.3 Die Modellierung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ in Abhängigkeit von Geschlecht und Alter

Im Ergebnis der vorangegangenen Auswertungen wird die Skelettmasse$_{netto}$ getrennt für beide Geschlechter und für zwei Altersintervalle (bis 22,5 Jahre und ab 20,5 Jahre) jeweils in Abhängigkeit vom Alter und anhand gewichteter Datensätze moduliert. Das heißt, im Vordergrund steht die Erfassung der altersabhängigen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ ohne Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen, was bis zu einem gewissen Grad eine starke Vereinfachung darstellt. Dazu werden Polynome des 1. bis 4. Grades formuliert und mit Hilfe der Proc Reg in SAS® berechnet. Die Unterteilung in zwei Altersintervalle entspricht in etwa der Anwendung von Spline-Modellen. Diese erlauben, in jedem der Teilintervalle ein einfacheres mathematisches Modell anzupassen, als es über die gesamte Altersspanne hinweg notwendig wäre. Dies entspricht dem ‚Sparsamkeitsprinzip', welches bedeutet, die Modelle so einfach wie möglich und mit so wenig Spezialannahmen wie notwendig zu formulieren.

Die Unterteilung in beide Teilintervalle macht biologisch Sinn, da es Individuen mit wachsendem Gewebe (bis 22,5 Jahre) von solchen mit quasi-stabilen bzw. schrumpfenden Gewebe (ab 20,5 Jahre) unterscheidet. Die Überlappung beider Intervalle ist notwendig, da in einem nachfolgenden Schritt die bestgeeigneten Modelle beider Teilintervalle zusammengeführt werden sollen, so dass für die gesamte Alterspanne die Skelettmasse moduliert werden kann.

Als jeweils bestgeeignetes (Teil)Modell wird jenes angesehen, welches einen möglichst hohen Wert für den Test auf Heteroskedastizität (Model-Statement */spec*; Proc Reg) und ein möglichst hohes Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}) liefert und nicht im Widerspruch zu bereits vorliegenden Beobachtungen aus der Literatur steht (siehe auch Kap. VI 3.3.4). Zusätzlich werden die 95 %-Konfidenz- und 95 %-Prädiktionsgrenzen ausgegeben und die Kollinearität überprüft (Model-Statement *cli clm collin*; Proc Reg). Nachfolgend finden sich die kurze Beschreibung der Modellparameter sowie der SAS®-Code beispielhaft für Männer bis 22,5 Jahre:

- Zielgröße: $Skelettmasse_{netto}$
- Co-Variate: Alter $Alter^2$ $Alter^3$ $Alter^4$
- Gruppiert: Nach Geschlecht und jeweils getrennt für zwei Altersbereiche bis 22,5 Jahre und ab 20,5 Jahre
- Datensätze: gewichtet (Statement *weight gewicht;*)

```
**_____________  Beispielaufruf für Männer bis 22,5 Jahre  _____________**;
proc reg alpha=0.05 all rsquare;
      where  geschlecht='männlich' and alter<=22.5;
      weight gewicht;
      model  skelettmasse=alter                      / spec clm cli collin;
      output out=reg1_m  l95=lmean1_m  u95=umean1_m
                         l95m=lpred1_m u95m=upred1_m
                            p=pred1_m     r=residual1_m;

      model  skelettmasse=alter alter2               / spec clm cli collin;
      output out=reg2_m  l95=lmean2_m  u95=umean2_m
                         l95m=lpred2_m u95m=upred2_m
                            p=pred2_m     r=residual2_m;

      model  skelettmasse=alter alter2 alter3        / spec clm cli collin;
      output out=reg3_m  l95=lmean3_m  u95=umean3_m
                         l95m=lpred3_m u95m=upred3_m
                            p=pred3_m     r=residual3_m;

      model  skelettmasse=alter alter2 alter3 alter4 /spec clm cli collin;
      output out=reg4_m  l95=lmean4_m  u95=umean4_m
                         l95m=lpred4_m u95m=upred4_m
                            p=pred4_m     r=residual4_m;
run;quit;

**__________  Auslesen der out-Dateien nach Excel y={1,2,3,4}  __________**;
PROC EXPORT DATA= WORK.REGy_m
            OUTFILE= "F:\PFAD\regy_m.xls"
            DBMS=EXCEL4 REPLACE;
RUN;
```

IV 3.3.4 Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse (ΔSM)

Die vier unterscheidbaren Gewebeschichten des Knochens, die periostale, die kortikale, die kortikal-endostale und trabekulare Schicht (Kap. II 4), zeigen ein unterschiedliches Verhalten bei Knochenaufbau und -abbau und tragen gemeinsam zur Knochenbilanz des Knochens bzw. Sklettes bei. Diese stellt den Nettogewinn- bzw. Nettoverlust über ein definiertes Zeitintervall, hier ein Jahr, dar. Die Definition der Knochenbilanz findet in der Auxologie eine Entsprechung im Begriff der jährlichen Wachstumsgeschwindigkeit

(velocity). In Anlehnung daran wurde die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM) definiert. Dabei handelt es sich um eine relative Entwicklungsgeschwindigkeit. Diese erfasst als Quotient das Verhältnis aus der jährlichen Änderung der Skelettmasse (SM) als Differenz aus der am Ende bzw. zu Beginn eines beliebigen Lebensjahres vorliegenden Skelettmasse$_{netto}$ im Vergleich zu der am Ende des Lebensjahres vorliegenden Skelettmasse (Formel 16). Diese Definition hat den Vorteil, dass sie relativ unabhängig von den individuell vorliegenden Skelettmassen ist, indem sie die Änderung anteilig beschreibt. Werte > 0 stehen für eine wachsende, Werte < 0 für eine schrumpfende Skelettmasse.

Formel 16: $\mathbf{\Delta SM = (SM_{netto\ a+1} - SM_{netto\ a}) / SM_{netto\ a+1}}$

$\mathbf{= 1 - SM_{netto\ a} / SM_{netto\ a+1}}$

$SM_{netto\ a}$ Skelettmasse zu Beginn eines Lebensjahres
$SM_{netto\ a+1}$ Skelettmasse am Ende eines Lebensjahres
$\Delta SM > 0$ Zuwachs
$\Delta SM < 0$ Reduktion

Im Gegensatz zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$, die im Zusammenhang mit dem *Lebensalter* eines Individuums betrachtet wird, beschreibt die Skelettmasse-Änderung einen Prozess, der mit dem Beginn eines *Lebensjahres* einsetzt. Es wird dabei angenommen, das jedes begonnene Lebensjahr auch beendet wird. Die Ergebnisse zur Bestimmung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse werden in Kapitel V 2.2 vorgelegt und in Kapitel VI 2.6 diskutiert.

IV 3.3.5 Auswahl des bestgeeigneten Polynoms für Individuen ab 20,5 Jahre

Im Gegensatz zu Individuen bis 22,5 Jahren stehen zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Individuen ab 20,5 Jahre auch nach der Diskussion in Kapitel VI 2.4 mit den Polynomen des 1. bis 3. Grades drei noch annähernd gleichwertige Modelle zur Verfügung. Diese beschreiben in mehr oder weniger gleicher Weise die vorliegenden Daten (Kap. VI 2.4, VI 2.5, V 3.2), da jede der drei Regressionskurven vollständig in den 95 %-Konfidenzintervallen der jeweils beiden anderen Polynome liegt (Kap. VI 2.5, Abb. 37).

Um eine Entscheidung zwischen diesen Modellen herbeizuführen, werden je Lebensalter paarweise Differenzen sowohl für die berechneten Skelettmassen als auch für die jährliche

relative Änderung der Skelettmasse gebildet und nachfolgend mit dem verbundenen Wilcoxon-Test für Wertepaare explorativ getestet (Kap. VI 3.2; Differenz je Alter: Polynom 1. Grades – Polynom 2. Grades bzw. Polynom 2. Grades – Polynom 3. Grades).

Mit dem verbundenen Wilcoxon-Test wird überprüft, ob die vorhandenen Unterschiede zwischen den Polynomen mehr als zufällig sein könnten. Bei einem p-Wert > 5 % werden die zur Berechnung der getesteten Differenz herangezogenen Polynome als ausreichend ähnlich angesehen, so dass für die Berechnungen im Modell FoRCaDa dem „Sparsamkeitsprinzip“ folgend, das Polynom mit dem jeweils niedrigeren Grad ausgewählt wird. Die endgültige Entscheidung erfolgt unter Beachtung der in Kapitel VI 2.5 geführten Diskussion unter Einbeziehung der zur Verfügung stehenden Literatur.

IV 3.4 Entwicklung, Überprüfung und Beurteilung des Modells FoRCaDa

In diesem Kapitel wird das Modell FoRCaDa zur Berechnung der ^{14}C-Konzentration im Knochengewebe zuerst formuliert (Kap. IV 3.4.1). In dieses Modell gehen die vorab selektierten biologischen (Geschlecht, Alter, jährliche relative Änderung der Skelettmasse ΔSM, jährliche Austauschrate $1/t_C$) und kalendarischen (Geburtsjahr, Lebensjahre) Einflussgrößen unter Bezugnahme auf die während der Lebensspanne eines Individuums jährlich in der Atmosphäre vorliegende ^{14}C-Konzentration ein. Um für eine Liegezeitbestimmung geeignet zu sein, muss das Modell auf der einen Seite robust genug sein, die Auswirkungen der biologischen Variabilität zu verkraften, und auf der anderen Seite empfindlich genug sein, die Schwankungen der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre differenziert und mit geringen Abweichungen zu erfassen.

In Kapitel IV 3.4.2 wird in einem nächsten Schritt das Modell präzisiert und anschließend mit Regressions-Modellen überprüft. Dabei wird der berechnete ^{14}C-Wert als unabhängige und die gemessene ^{14}C-Konzentration als abhängige Größe betrachtet. Für den Routineeinsatz in der Forensik muss sich das Modell jedoch im Sinne einer „Umkehrregression“ bewähren. Dabei ist es jedoch nicht Ziel, die berechneten Regressions-Gleichungen direkt umzusetzen, sondern es wird der theoretische Ansatz auf seine Anwendbarkeit hin beurteilt (Kap. IV 3.4.3).

IV 3.4.1 Entwicklung des Modells FoRCaDa

Das Modell FoRCaDa wird zur Berechnung der ^{14}C-Konzentration im Kollagen humanen Knochengewebes entwickelt. Eine zusammenfassende Darstellung der Modellannahmen ist Abbildung 15 zu entnehmen, der Rechenalgorithmus der Formel 17.

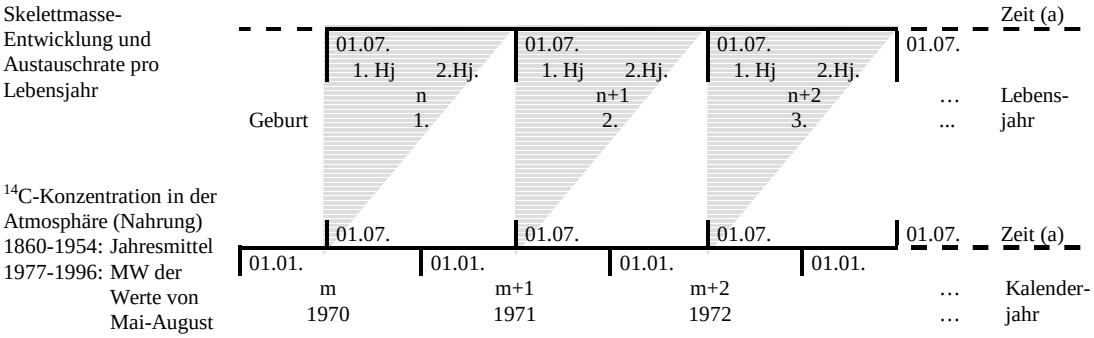


Abbildung 15: Zusammenfassende Darstellung zur Berechung von Lebensjahren eines Individuums und deren Beziehung zu den ^{14}C-Konzentrationen in der Nahrung.
(Hj.: Halbjahr, MW: Mittelwert, a: Jahr, m: 1. Kalenderjahr (=Geburtsjahr), n: 1. Lebensjahr; jeweils mit Beispiel)

Formel 17:

n = 1:			$^{14}C_{K\_1}$	=	$^{14}C_{A\_Gj}$	
n > 1:	**1. Teilschritt: Skelettmasse-entwicklung**	Wenn $\Delta SM_n \geq 0$, dann:	$^{14}C_{K\ n}$	=	$^{14}C_{K\ n-1}$	**x $(1 - \Delta SM_n)$ +**
					$^{14}C_{A\_Gj + n-1}$	**x (ΔSM_n)**
		Wenn $\Delta SM_n < 0$, dann:	$^{14}C_{K\_n}$	=	$^{14}C_{K\_n-1}$	
	2. Teilschritt: Austauschrate		$^{14}C_{K\_n}$	=	$^{14}C_{K\_n}$	**x $(1 - 1/t_C)$ +**
					$^{14}C_{A\_Gj + n-1}$	**x $(1/t_C)$**

Festlegungen		Wählbar zwischen
n	Lebensjahr	1 und 99 Jahre
^{14}C	Radiocarbonkonzentration in ...	
A	Atmosphäre	
K	Knochenkollagen	
Gj	Geburtsjahr	1865 und 2028
$^{14}C_{K\_n}$	^{14}C im Knochenkollagen im n-ten Lebensjahr	
$^{14}C_{A\_Gj}$	^{14}C in der Atmosphäre im Geburtsjahr	
$^{14}C_{A\_Gj + n-1}$	^{14}C in der Atmosphäre im n-ten Lebensjahr	
ΔSM_n	Relative jährliche Skelettmasse-Änderung	Tabelliert in Abhängigkeit von Lebensjahr und Geschlecht (vgl. Anhang 35 und 36)
$1/t_C$	Austauschrate	Zwischen 1 und 66 %, Tab. 12, Kap. II 5.5.3

In diesem Modell werden berücksichtigt:

(1) Das Geschlecht des Individuums (männlich oder weiblich; ist dieses unbekannt bzw. nicht bestimmbar, werden Berechnungen für beide Geschlechter durchgeführt)

(2) Das wechselnde ^{14}C-Angebot in der Atmosphäre in dem Zeitintervall, welches durch Geburts- und Sterbejahr eines Individuums festgelegt wird. Es ist zu beachten, dass es sich bei den ^{14}C-Werten der Atmosphäre um Durchschnittswerte handelt (Kap. II 2, Abb. 1): Um Jahresmittelwerte z. B. für die Jahre 1860 bis 1954 bzw. um Mittelwerte der ^{14}C-Konzentrationen aus den Monaten Mai bis August der Jahre 1977 bis 1996. Die Werte entsprechen somit in erster Näherung der Vegetationszeit in Mitteleuropa, die auf diese Weise in die Nahrungsketten der Menschen eingehen

(3) Die gelebten Lebensjahre. Für die nachfolgenden Modellierungen wird festgelegt, dass jedes Lebensjahr am 01.07. beginnt und jedes begonnene Lebensjahr auch beendet wird (vgl. Kap. IV 3.1). Aus den Festlegungen aus Punkt 2 und 3 ergibt sich, dass:

- Im 1. Halbjahr eines jeden Lj. (01.07. bis 31.12.) die ^{14}C-Konzentration in der Nahrung dem ^{14}C-Wert der Atmosphäre des jeweiligen Kalenderjahres entspricht
- Im 2. Halbjahr eines jeden Lj. (01.01. bis 30.06.) die ^{14}C-Konzentration in der Nahrung dem ^{14}C-Wert der Atmosphäre des vorangegangenen Kalenderjahres entspricht. Abweichend davon wird bei der Geburt die ^{14}C-Konzentration im Gewebe mit der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre im Geburtsjahr gleichgesezt
- Sind nur Geburts- und Sterbejahr bekannt, ergibt sich aus der Berechnung der Lebensjahre nach Formel 11b (Kap. IV 3.1: Sterbejahr – Geburtsjahr + 1 Jahr), dass bei der Berechnung des ^{14}C-Wertes im Gewebe als letztem Wert auf die ^{14}C-Konzentration des Sterbejahres zugegriffen wird. Damit kommt es tendenziell zu einer Überschätzung des Sterbalters
- Sind dagegen genauere Lebensdaten bekannt und verstarb ein Individuum nach dem 01.01. aber vor Erreichen seines Geburtstages, so wird als letzter Wert die ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre des dem Sterbejahr vorangehenden Kalenderjahres berücksichtigt.
  Bsp.: Bei ID 99 handelt es sich um die Probe eines kurz vor dem 10. Geburtstag im Juli 1985 ermordeten Mädchens. Als letzter ^{14}C-Wert aus der Atmosphäre geht derjenige aus dem Kalenderjahr 1984 in die Berechnung ein

(4) Die Berechnung der ^{14}C-Konzentration in Jahresschritten von der Geburt bis zum Tod unter Berücksichtigung:

- Einer jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse (ΔSM), allerdings nur solange, wie kein schrumpfendes Gewebe vorliegt (bei Frauen bis zum 21. Lj., bei Männern bis zum 31. Lj.).
  (Am Ende eines (beliebigen) Lebensjahres liegt eine bestimmte Skelettmasse vor. Mit ΔSM wird der relative Anteil an Skelettmasse bezeichnet, die während des betrachteten Lebensjahres auf- bzw. abgebaut wird. Zu Beginn des Lebensjahres lag also bereits ein Anteil an Skelettmasse vor, der sich als $1 - \Delta$SM berechnet)
- Einer jährlichen Austauschrate ($1/t_C$). Es wird dabei angenommen, dass Knochenmasse unabhängig von ihrem Gewebealter umgebaut wird, die Austauschrate sich also auf die am Ende eines Lebensjahres erreichte Skelettmasse bezieht.

IV 3.4.2 Präzisierung und Überprüfung des Modells FoRCaDa

Es wird für jeden Datensatz (74 Proben von 66 Individuen, Anhang 13 bis 16), bei dem zumindest Geburts- und Sterbejahr bekannt sind:

(1) Aus den getrennt für beide Geschlechter erstellten 24 Tabellen der berechnete ^{14}C-Wert ($^{14}C_{berechnet}$) mittels eines SAS®-Macros gesucht und einer eigens für jede ID erstellten Datei hinzugefügt

(2) Für jede der 24 Austauschraten die Differenz aus gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert ($^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$) ermittelt:
- Eine negative Differenz bedeutet eine Überschätzung und
- Eine positive Differenz bedeutet eine Unterschätzung des gemessenen ^{14}C-Wertes durch das Modell FoRCaDa

(3) Für die absolute Differenz geprüft, ob diese höchstens gleich groß wie die 4fache Standardabweichung (s) ist, die für den gemessenen ^{14}C-Wert ($^{14}C_{gemessen}$) angegeben wird. In dem Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s liegt zu 99,9 % der tatsächliche, aber unbekannte ^{14}C-Wert (Kap. IV 3.2). Damit wird für das Modell FoRCaDa die Präzision der Messmethode übernommen.

Die Ergebnisse der Schritte 1 bis 3 werden tabellarisch und graphisch dargestellt und in Kapitel VI 3.2 diskutiert. Im Zuge dieser Diskussion wird in einem nächsten Schritt die Einschränkung der 24 Austauschraten angestrebt. Für diesen eingeschränkten Bereich werden je Austauschrate einfache lineare Regressionen getrennt für Männer, Frauen und die gesamte Stichprobe berechnet. Es wird dabei nicht berücksichtigt, ob sich der berechnete ^{14}C-Wert im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s befindet. Die allgemeine Form lautet nach Formel 9: $^{14}C_{gemessen} = \beta \times {}^{14}C_{berechnet} + \varepsilon$. Im Anschluss an diese Berechnungen erfolgt die abschließende Präzisierung des Modells FoRCaDa.

Nach Präzisierung des Modells (Einschränkung auf eine/einige Austauschraten) wird für jede Probe der berechnete ^{14}C-Wert als $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ gesucht, für den sich die kleinste absolute Differenz ($|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}|$) ergibt und ebenfalls der speziell für jede ID erstellten Datei hinzugefügt. Sollten zwei Minima (auf eine Nachkommastelle gerundet) existieren, wird der für die kleinere der beiden Austauschraten gespeichert. Aussagen zur Richtigkeit des Modells FoRCaDa erfolgen unter Bezugnahme auf die absolute Differenz:

- Als deren prozentuale Abweichung vom gemessenen ^{14}C-Wert ($100\ \% \times |^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}| / {}^{14}C_{gemessen}$) und
- Als Vielfaches der gemessenen Standardabweichung im Sinne von Vertrauensintervallen ($|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}| / s$).

Die Überprüfung der Übereinstimmung von gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten erfolgt unter Anwendung einfacher linearer Regressions-Modelle. In diese gehen die berechneten ^{14}C-Werte ($^{14}C_{berechnet(Minimum)}$) als unabhängiges und die gemessenen ^{14}C-Werte ($^{14}C_{gemessen}$) als abhängiges Merkmal ein. Die allgemeine Form lautet nach Formel 9: $^{14}C_{gemessen} = \beta \times {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)} + \varepsilon$.

Es werden zwei Regressionen für den gesamten Datensatz mit maximal 74 Proben und einem um 15 Proben reduzierten Datensatz zusammen und getrennt für beide Geschlechter berechnet (vgl. Kap. IV 1.2). Für drei Proben von Männern zwischen dem 31. und 42. Lj. gelingt für keine der 24 vorgewählten Austauschraten zwischen 1 und 66 % eine ausreichend gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten. Beide Regressions-Modelle werden daher mit (Modell 1a bzw. 2a) und ohne diese drei Proben (Modell 1b bzw. 2b) berechnet:

- Modell 1 (n = 74 Proben von 66 Individuen: 53(48) Männer, 21(18) Frauen). Dieser Datensatz entspricht in Annäherung der in Kapitel IV 1.2 zusammengestellten Stichprobe für die Beurteilung der ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen mit n = 66 Individuen. Die höhere Anzahl an Proben ergibt sich aus der Hinzunahme der Mehrfachmessungen (ID 94 und 95, vgl. Kap. V 1.3.3 und VI 1.3.3 sowie ID 37/38, 39/40, 41/42, 43/44, 45/46, 47/48, vgl. Kap. VI 1.3.2). Die einzelnen Proben werden als ausreichend unabhängig voneinander angesehen
- Modell 2 (n = 59 Individuen: 45 Männer, 14 Frauen). Dieser Datensatz ergibt sich nach Ausschluss von ID 1, 50, 51, 52, 53, 63 und 64 sowie den Mehrfachmessungen für ein Individuum mit ID 38, 40, 42, 44, 46 und 48 (Gewebefraktion Spongiosa) sowie ID 94 und 95 (Gewebealter) und entspricht der in Kapitel V 1.2.3 zusammengestellten Stichprobe.

Die Beurteilung der einzelnen Regressions-Modelle erfolgt unter Verwendung des Tests auf Heteroskedastizität sowie des adjustierten Bestimmtheitsmaßes R^2_{adj} (vgl. Kap. IV 3.1). Nachfolgend ist der SAS®-Code beispielhaft für Modell 2a angegeben. Die Ergebnisse werden in Kapitel V 3.3 dargelegt und in Kapitel VI 3.2 diskutiert.

```
proc reg    data=regression alpha=0.05 rsquare;
     where  im_intervall=1 and id not in (1,38,40,42,44,46,48,50,51,52,53,63,64,94,95);
     model  c14=c14min /spec collin;
proc reg    data=regression alpha=0.05 rsquare;
     where  im_intervall=1 and id not in (1,38,40,42,44,46,48,50,51,52,53,63,64,94,95);
     by     sex;
     model  c14=c14min /spec;
run;quit;
```

IV 3.4.3 Beurteilung des Modells FoRCaDa

In der forensischen Routine muss sich das Modell FoRCaDa jedoch im umgekehrten Sinne bewähren: Vom gemessenen wird auf den berechneten ^{14}C-Wert geschlossen. Da sich dieser in Abhängigkeit von Geburtsjahr und Lebensjahren (Sterbealter) eines Individuums errechnet, kann darüber eine zeitliche Eingliederung des Skelettfundes erfolgen. Dies entspricht der Vorgehensweise einer Umkehrregression. Es ist jedoch nicht Ziel, die errechneten Regressions-Geleichungen direkt anzuwenden. Vielmehr soll das Vorgehen bei der Suche übereinstimmender Werte übernommen werden. Denn ein Problem stellt bei nicht-identifizierten Skelettfunden regelmäßig dar, dass Sterbealter und somit Geburtsjahr und Alter unbekannt sind und nur in bestimmten Grenzen geschätzt werden können. Somit muss bei dem Vergleich die Suche über ein Intervall erfolgen. Folgendes Vorgehen wird für eine Eingrenzung auf relevante Werte bei dieser Intervallsuche eingehalten:

(1) Der Vergleich erfolgt für ein Individuum mit dem Geschlecht, welches anthropologisch bestimmt wurde (nur bei indifferentem Geschlecht für beide Geschlechter)

(2) Der Vergleich wird für alle Lebensjahre durchgeführt, die sich aus dem anthropologisch bestimmten Lebensalter mit seinen Schätzgrenzen ergeben. Bei einer Altersangabe von 40 ± 8 Jahren erfolgt dieser beispielsweise für das 32. bis 48. Lj.

(3) Die Obergrenze für das Intervall ist durch das Auffindungsjahr bzw. das Sterbejahr festgelegt

(4) Die Untergrenze für das Intervall wird berechnet. Sie ergibt sich als Differenz aus

- Dem Kalenderjahr, in dem die gemessene ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre das erste Mal für Werte ≥ 100 pMC erreicht oder überschritten wird bzw. das erste Mal für Werte < 100 pMC erreicht oder unterschritten wird und
- Dem anhand der anthropologischen Altersbestimmung maximal erreichten Lebensjahre (Punkt 2)
- Jedoch frühestens ab 1865, dem ersten Kalenderjahr, für das ^{14}C-Werte aus der Atmosphäre im Modell hinterlegt sind.

(5) Für jede Kombination aus möglichem Geburtsjahr und erreichten Lebensjahren liegen mehrere berechnete ^{14}C-Werte vor (11 Austauschraten zwischen 1 und 6 %), von denen der Wert mit der kleinsten absoluten Differenz zwischen berechnetem und gemessenen ^{14}C-Wert beibehalten wird
($^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ = Minimum von $|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}|$)

(6) Es werden nur die Werte von $^{14}Cberechnet_{(Minimum)}$ und damit Kombinationen von Geburtsjahr und erreichten Lebensjahren beibehalten, die in dem Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s liegen

(7) Die Ergebnisse werden in drei Tabellen ausgegeben: In den Zeilenköpfen die Geburtsjahre, in den Spaltenköpfen die erreichten Lebensjahre und in den Zellen entweder:
   - Die Differenz zwischen $^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}$, wobei Werte > 0 eine Überschätzung und Werte < 0 eine Unterschätzung des gemessenen durch den berechneten Wert anzeigen
   - Die in Standardabweichungen umgerechnete und auf eine Nachkommastelle gerundete absolute Differenz zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert ($|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}| / s$)
   - Die Austauschrate, für den der Wert $^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ bestimmt wurde.

Dieses Vorgehen wird sowohl für Proben von nicht ausreichend identifizierten (n =12, mit IDs < 40) als auch für identifzierte Individuen (n = 10, IDs > 40) im Sinne einer Kasuistik durchgeführt, wobei problematische Fälle (ID 49, 83, 77) bevorzugt ausgewählt und Vergleiche mit vorliegenden Fett-Proben (für ID 49, 15, 16) vorgenommen werden:

- Für Proben mit ^{14}C-Messwerten < 100 pMC (ID 3, 4, 5 und 12)
- Für Proben von Kindern (mittleres Alter $\leq$ 12 Jahre: infans I und II; ID 18 und 99)
- Für Proben von jungen Erwachsenen (mittleres Alter < 40 Jahre: juvenil und adult; ID 97, 98, 11, 14, 9, 49 und 83)
- Für Proben von älteren Erwachsenen (mittleres Alter $\geq$ 40 Jahre: matur und senil; ID 77, 13, 59, 66, 69, 45, 15, 16 und 17)

Die Ergebnisse werden in Kapitel V 3.5 beschrieben und in Kapitel VI 3.3 diskutiert.

Kapitel V

Ergebnisse

Inhaltsverzeichnis

V		Ergebnisse	205
V	1	Auswahl von Einflussgrößen auf die ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe	208
V	1.1	Einführung	208
V	1.2	Einflüsse auf die ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen (Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion, Pathologien)	209
V	1.2.1	Bivariater Vergleich von ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen und Sterbejahr, Alter bzw. Geburtsjahr (n = 66)	209
V	1.2.2	Multipler Vergleich von ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen und den Einflussgrößen Gruppe, Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion und Pathologie (n = 66)	212
V	1.2.3	Multipler Vergleich von ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen und den Einflussgrößen Gruppe, Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion und Pathologie (n = 59)	216
V	1.3	Der Einfluss der Gewebefraktion, der Aufbereitungsmethode und der Gewebeart sowie des Gewebealters auf die ^{14}C-Konzentration	223
V	1.3.1	Gewebefraktion und Aufbereitungsmethode	223
V	1.3.2	Gewebeart	227
V	1.3.3	Gewebealter	228
V	1.4	Schlussfolgerungen	231
V	2	Die Bestimmung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM)	233
V	3	Entwicklung, Überprüfung und Beurteilung des Modells FoRCaDa	240
V	3.1	Einführung	240
V	3.2	Die berechneten ^{14}C-Werte für Männer und Frauen mit einem Geburtsjahr ab 1865 und bis zum 99. Lebensjahr	241
V	3.3	Vergleich von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten	245
V	3.3.1	Einschränkung der vorgewählten Austauschraten	245
V	3.3.2	Überprüfung des Modells FoRCaDa mit linearen Regressionsmodellen	248
V	3.4	Schlussfolgerungen	254
V	3.5	Liegezeitbestimmung von Skelettfragmenten unter Verwendung des Modells FoRCaDa, eine Kasuistik	257
V	3.5.1	Proben mit ^{14}C-Messwerten unter 100 pMC: ID 3, 4, 5 und 12	259
V	3.5.2	Kinder (mittleres Alter $\leq$ 12 Jahre: infans I und II): ID 18 und 99	263
V	3.4.3	Junge Erwachsene (mittleres Alter < 40 Jahre: juvenil und adult): ID 97, 98, 11, 14, 9, 49 und 83	265
V	3.5.4	Ältere Erwachsene (mittleres Alter $\geq$ 40 Jahre: matur und senil): ID 77, 13, 59, 66, 69, 45, 15, 16 und 17	274

Im Gegensatz zur „klassischen" Radiocarbonmethode liegt die Motivation dieser Arbeit darin, die Konzentrationsänderungen von ^{14}C in der Atmosphäre nach 1950 zur Kurzzeitdatierung von humanen Knochengewebe heranzuziehen. Es gibt jedoch noch keine ausreichenden Vorstellungen darüber, wie das wechselnde ^{14}C-Angebot aus der Umwelt durch den Menschen im Knochengewebe verstoffwechselt wird. Und damit fehlt ein Modell, wie die im Knochen gemessenen ^{14}C-Konzentrationen zu Datierungszwecken im Sinne einer forensischen Radio-Carbon-Datierung (FoRCaDa) genutzt werden können. Zur Klärung beider Probleme möchte diese Arbeit beitragen. Sie ist entsprechend mehrgeteilt. In Kapitel V 1 werden die Ergebnisse zur Selektion von Einflussgrößen auf die ^{14}C-Konzentration in humanem Knochengewebe vorgestellt. In Kapitel V 2 erfolgt die Bestimmung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM) auf Grundlage der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$, wie diese anhand vorliegender Literaturdaten (Kap. IV 2.2) in Kapitel VI 2.2 diskutiert wurde.

Die Ergebnisse aus Kapitel V 1 und V 2 werden unter Ergänzung jährlicher Austauschraten zwischen 1,0 und 66,0 % (Kap. II 5.5.3) in der Formulierung des Modells FoRCaDa (Kap. IV 3.4.1) im Kapitel V 3 zusammengeführt. Anhand dieses Modells werden für die insgesamt 66 Kollagenproben aus Kapitel V 1 die ^{14}C-Konzentrationen berechnet. Aus der Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen ^{14}C-Konzentrationen im Sinne einer Kasuistik können erste Ergebnisse abgeleitet werden.

V 1 Auswahl von Einflussgrößen auf die ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe

V 1.1 Einführung

Wie in Kapitel IV 1 beschrieben, konnten für 66 Individuen auswertbare ^{14}C-Konzentrationen zusammengetragen werden: 66 Werte für Kollagen, 21 Werte für Apatit und 5 Werte für Fett. Zusätzlich lagen für 6 Individuen jeweils getrennt für Kompakta und Spongiosa Werte für Kollagen und Apatit vor.

In Kapitel V 1.2 wird anhand der vorliegenden 66 Kollagenproben der Einfluss von Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion und Pathologien auf die gemessene ^{14}C-Konzentration untersucht und in Kapitel VI 1.2 diskutiert.

Als Ausblick auf eine erweiterte bzw. ergänzende Anwendung zur Methode FoRCaDa für gemessene ^{14}C-Konzentrationen im Knochenkollagen wird der Einfluss der Gewebefraktion (Kollagen, Apatit, Fett), der Gewebeart (Kompakta bzw. Spongiosa) und des Gewebealters als Ausdruck intraindividueller Variabilität und der Einfluss der Aufbereitungsmethode („harte“ oder „weiche“ Methoden der Kollagendarstellung) auf die gemessene ^{14}C-Konzentration aufgezeigt. Sehr allgemein können all diese Prozesse als Ausdruck unterschiedlicher Reservoireffekte verstanden werden. Dies wird in Kapitel V 1.3 dargestellt und in Kapitel VI 1.3 diskutiert. Die Schlussfolgerungen aus diesen Ergebnissen werden in Kapitel V 1.4 zusammengestellt.

V 1.2 Einflüsse auf die ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen (Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion, Pathologien)

V 1.2.1 Bivariater Vergleich von ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen und Sterbejahr, Alter bzw. Geburtsjahr (n = 66)

In der „klassischen“ Radiocarbon-Methode erfolgt die Datierung einer Probe zu dem Zeitpunkt, zu dem diese dem Kohlenstoffaustausch zwischen den Reservoiren entzogen wird. Dies beginnt mit der Gewinnung einer Probe – in prämodernen und historischen Zusammenhängen also regelhaft mit dem Tod und daher mit dem Sterbejahr des Menschen. Abbildung 16 zeigt, wie sich dieser Zusammenhang für die vorliegenden rezenten Proben darstellt.

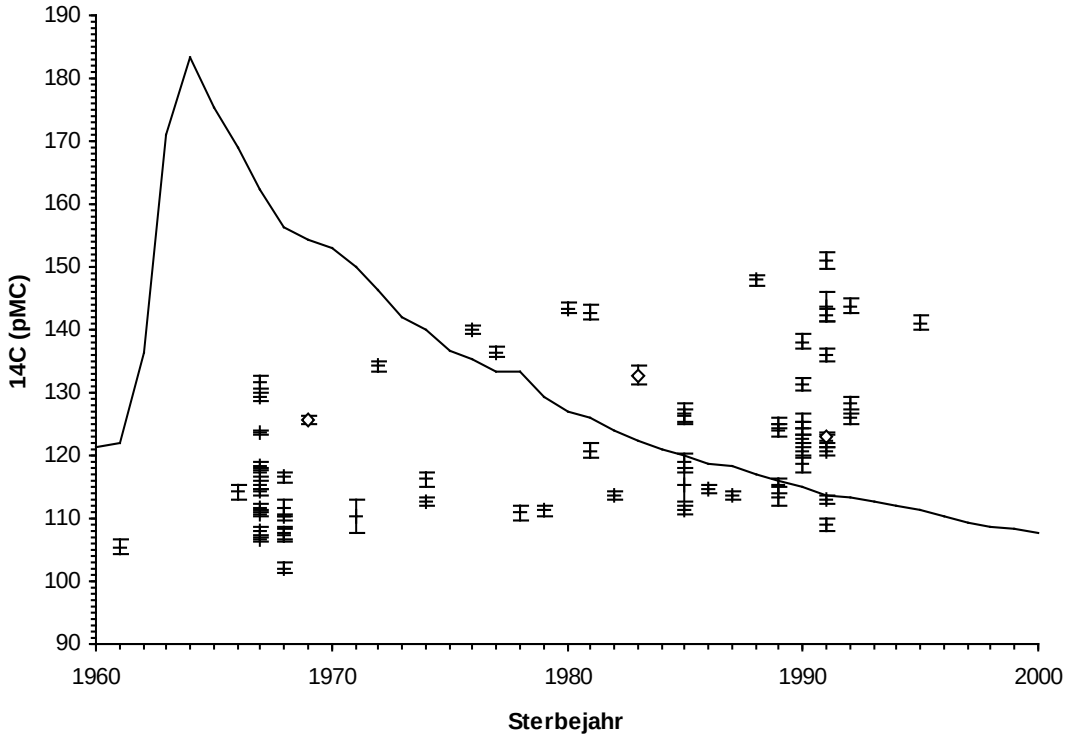


Abbildung 16: Beziehung zwischen Sterbejahr und ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen (MW ± s; Einzelwerte: Anhang 13). Hinterlegt ist die ^{14}C-Kurve der Atmosphäre (Anhang 1). ID 1 (Sterbejahr: 1928, Δ^{14}C 99,2 ± 1,30 pMC) wurde nicht dargestellt. Die 3 Individuen (ID 50, 52, 53) mit einer eindeutig beschriebenen Erkrankung sind mit einer Raute markiert.

Der Anteil des Radiocarbons im Knochenkollagen entsteht nicht rein zufällig. Vielmehr hängt dieser von artspezifischen Stoffwechselprozessen ab (Kap. II 3 bis II 5). Wenn diese mit dem Sterbejahr in Verbindung gebracht werden sollen, müsste sich dieser Zusammenhang auch in der Abbildung 16 darstellen. Das heisst, die ^{14}C-Kollagenwerte, abgetragen in Abhängigkeit vom Sterbejahr, müssten die ^{14}C-Kurve der Atmosphäre in irgendeiner Form kopieren. Das ist offensichtlich nicht der Fall. Die Werte streuen vielmehr in Abhängigkeit ihrer Anzahl pro Sterbejahr entlang der y-Achse, wobei mit zunehmendem Sterbejahr ein leichter Anstieg bei den gemessenen ^{14}C-Konzentrationen im Knochenkollagen zu erkennen ist. Dieser leichte Trend stellt jedoch offenbar keine Beziehung zwischen Sterbejahr und ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen und vor allem in Relation zur ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre dar.

Demgegenüber lässt sich eine gewisse Strukturierung der Messwerte erkennen, wenn diese wie in Abbildung 17 in Beziehung zum Alter des Donors betrachtet werden. Der leichte Zusammenhang zwischen Alter und ^{14}C-Konzentration kann jedoch durch das fast vollständige Fehlen von Individuen unter 20 Jahren verstärkt sein. Individuen bis zu 40 Jahren zeigen danach tendenziell höhere ^{14}C-Werte als Individuen über 40 Jahre (vgl. Tab. 29, Tab. 31). Ob die relativ hohen ^{14}C-Werte für die zwei Proben ID 52 und 53 allein auf die beschriebenen Pathologien zurückzuführen sind (Anhang 13), kann anhand von Abbildung 17 nicht diskutiert werden.

Einen ähnlichen Eindruck gewinnt man, wenn man die Verteilung der Messwerte in Beziehung zum Geburtsjahr betrachtet (Abb. 18). Die „Vorwegnahme“ des ^{14}C-Gipfels in der Atmosphäre wird vorgetäuscht, da das individuelle Alter des Donors in dieser Darstellung nicht berücksichtigt wird. Der Gesamteindruck wird etwas abgeschwächt, da besonders bei den älteren Geburtsjahrgängen einige höhere Werte gemessen wurden. Auch hier sind vor allem die Proben ID 52 und ID 53 zu nennen.

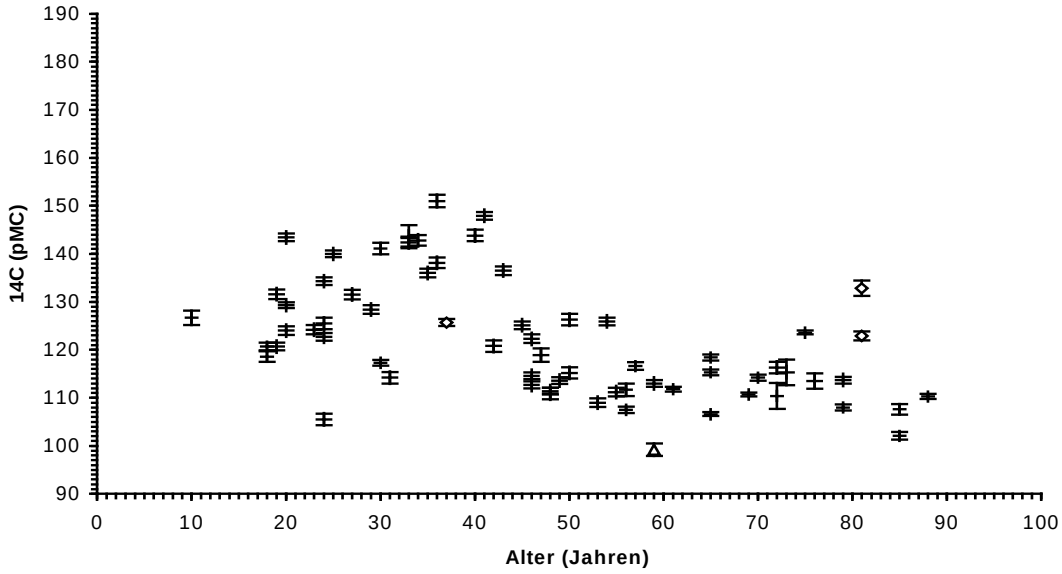


Abbildung 17: Beziehung zwischen Alter und ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen (MW ± s; Einzelwerte: Anhang 13). ID 1 mit einem Sterbejahr von 1928 wurde mit einem Dreieck, die 3 Individuen (ID 50, 52, 53) mit einer eindeutig beschriebenen Erkrankung wurden mit einer Raute markiert.

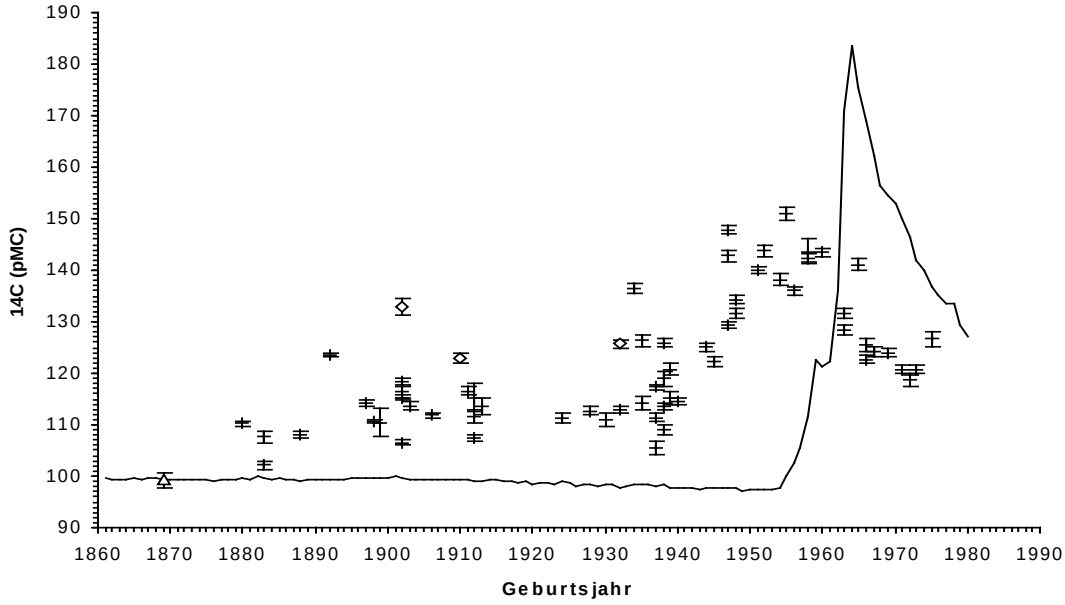


Abbildung 18: Beziehung zwischen Geburtsjahr und ^{14}C- Konzentration im Knochenkollagen (MW ± s; Einzelwerte: Anhang 13). ID 1 wurde mit einem Dreieck, die 3 Individuen (ID 50, 52, 53) mit einer eindeutig beschriebenen Erkrankung wurden mit einer Raute markiert.

V 1.2.2 Multipler Vergleich von ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen und den Einflussgrößen Gruppe, Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion und Pathologie (n = 66)

Nachfolgend wird der Versuch unternommen, mit verschiedenen multiplen Modellen den (linearen) Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen Gruppe, Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion und Pathologien zu erfassen (Kap. IV 1.2, IV 3.2.1). Nicht zuletzt ergibt sich eine Motivation aus der Deskription der 66 Proben in Bezug auf die mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen, die in Tabelle 29 enthalten ist.

Bei der Einflussgröße Gruppe werden die Proben in Literaturdaten und eigene Proben unterteilt. Die Literaturdaten stammen vorwiegend von Sektionsmaterial geschlechts- und altersgematchter Proben spätmaturer und seniler Individuen und betreffen die Sterbejahre 1967 und 1968 (n = 16, Anhang 13b; L'ORANGE UND ZIMEN 1968a, 1969 a). Bei den eigenen Proben handelt es sich vorwiegend um Asservate aus der Rechtsmedizin, in der die Proben vorzeitig verstorbener Männer überwiegen. Und gleichzeitig wurde bei der eigenen Probenauswahl darauf geachtet, die ^{14}C-Kurve der Atmosphäre differenziert mit Proben von Individuen mit möglichst unterschiedlichen Lebensdaten zu begleiten. Somit ergeben sich qualitative Gruppenunterschiede. Aber könnte der zwischen den Gruppen erkennbare Unterschied ($Median_{eigene\ Proben}$ 124,0 pMC zu $Median_{Literarturdaten}$ 111,8 pMC) nicht vorwiegend auf die unterschiedliche Altersstruktur und unterschiedlichen Geburts- und Sterbejahre der Individuen zurückzuführen sein? Zeigen jüngere Individuen bis 40 Jahre höhere ^{14}C-Werte ($Median_{00\text{-}19\ Jahre}$ 125,0 pMC und $Median_{20\text{-}39\ Jahre}$ 131,5 pMC zu $Median_{40\text{-}59\ Jahre}$ 111,4 pMC und $Median_{\geq 60\ Jahre}$ 110,3 pMC), weil sie sich mit ihren Lebensdaten anders der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre zuordnen und erst nach 1950 gelebt haben? Das deutet sich aus den klassierten Daten für die Sterbe- und Geburtsjahre an und entspricht den bivariaten Punktewolken in Abbildung 16 bis 18.

Die drei Proben, für die eine Pathologie sicher angegeben werden konnte, scheinen sich von den Individuen ohne bekannte Pathologie zu unterscheiden und zeigen höhere Werte ($Median_{Pathologie\ ja}$ 125,7 pMC zu $Median_{Pathologie\ nein}$ 118,6 pMC). Wie wirkt sich dieser Unterschied auf die gesamte Stichprobe aus?

Tabelle 29: Die mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen; insgesamt (grau hinterlegt) und klassiert nach den Einflussgrößen Gruppe, Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Pathologien und Skelettregion (n = 66).

		mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen							
		n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Insgesamt		66	121,99	12,25	99,2	112,70	119,80	129,30	151,0
Gruppe									
0	Literaturdaten	19	115,17	9,35	102,1	108,00	111,80	118,40	141,1
1	eigene Proben	47	124,74	12,28	99,2	114,20	124,00	134,30	151,0
Sterbejahr, klassiert in Dekaden									
1	1920-1929	1					99,20		
2	1960-1969	20	114,40	8,05	102,1	107,80	113,00	117,85	131,6
3	1970-1979	8	121,54	12,97	110,4	111,05	114,50	135,40	140,0
4	1980-1989	17	123,88	11,60	111,4	114,60	120,80	126,70	147,9
5	1990-1999	20	129,29	11,23	109,0	122,50	125,70	139,61	151,0
Alter, klassiert in 20-Jahresklassen									
1	00-19 Jahre	5	124,52	5,12	118,6	120,70	125,00	126,70	131,6
2	20-39 Jahre	21	131,48	11,40	105,5	124,20	131,50	141,12	151,0
3	40-59 Jahre	22	118,82	11,78	99,2	111,40	114,90	125,10	147,9
4	60- Jahre	18	114,08	7,15	102,1	110,30	113,60	116,30	132,8
Geburtsjahr, klassiert									
1	1860-1899	9	109,57	6,99	99,2	107,60	110,30	110,70	123,6
2	1900-1929	15	115,09	6,36	106,6	111,70	113,70	116,60	132,8
3	1930-1939	15	117,61	8,18	105,5	111,40	115,20	125,70	136,5
4	1940-1949	8	130,99	10,81	114,6	123,70	130,45	138,55	147,9
5	1950-1959	7	142,13	4,87	136,0	138,10	142,40	143,80	151,0
6	1960-1969	8	130,10	8,03	122,7	124,10	126,95	136,31	143,4
7	1970-1979	4	122,75	3,75	118,6	119,65	122,85	125,85	126,7
Geschlecht									
1	männlich	48	123,24	13,07	105,5	112,25	119,80	135,15	151,0
5	weiblich	18	118,64	9,22	99,2	114,20	120,35	125,50	132,8
Pathologien									
0	nein	63	121,74	12,46	99,2	111,80	118,60	129,30	151,0
1	ja	3	127,13	5,10	122,9	122,90	125,70	132,80	132,8
Skelettregion									
.	keine Angabe	2	118,05	10,82	110,4	110,40	118,05	125,70	125,7
1	kranial	11	122,55	10,96	111,4	113,60	122,70	125,50	147,9
2	postkranial	51	122,09	12,90	99,2	111,70	118,90	131,60	151,0
3	kranial + postkranial	2	120,25	8,56	114,2	114,20	120,25	126,30	126,3

Tabelle 30: Zusammenfassung der 7 berechneten, gemischten linearen Modelle für die mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen (n = 66).

Modell	Zeitvariable (fix als Covariate)	n	Variabilität Gruppe	Wert ($\Delta^{14}C$ in pMC)	AIC**	signifikant Variable	p-Wert**
1	stetig: Sterbejahr	64*	Literaturdaten	49,49	460,3	Sterbejahr	< 0,01
			eigene Proben	148,29			
2	stetig: Alter	64*	Literaturdaten	52,28	456,0	Alter	< 0,01
			eigene Proben	126,91		Pathologie	< 0,05
3	stetig: Geburtsjahr	64*	Literaturdaten	33,60	444,8	Geburtsjahr	< 0,01
			eigene Proben	113,13		Pathologie	= 0,10
4	stetig: Sterbejahr, Alter	64*	Literaturdaten	28,62	444,9	Sterbejahr	< 0,01
			eigene Proben	117,20		Alter	< 0,01
5	stetig: Geburtsjahr, Alter	64*	Literaturdaten	28,62	444,9	Geburtsjahr	< 0,01
			eigene Proben	117,20			
6	stetig: Geburtsjahr, Sterbejahr	64*	Literaturdaten	28,62	444,9	Geburtsjahr	< 0,01
			eigene Proben	117,20			
7	klassiert: Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr	64*	Literaturdaten	29,93	433,1	Geburtsjahr	< 0,05
			eigene Proben	123,56			

Modell 1 – 7: fixe Faktoren: Geschlecht, Skelettregion, Pathologie, gerechnet mit Proc Mixed in SAS®, Version 8.2 für PC, vgl. Kap. IV 3.2.1
64*: Skelettregion ohne Angabe für ID 50 und 51 (beides Literaturdaten) daher Zusammenhang mit Pathologie nur für 2 (ID 52 und 53) anstatt für 3 Proben
AIC: Akaike-Maß
**: je kleiner, desto besser

In den 7 gerechneten gemischten linearen Modellen (Tab. 30) konnten zwei Literaturdaten wegen fehlender Angaben zur Skelettregion nicht berücksichtigt werden (ID 50, 51). Die nachfolgenden Ausführungen beruhen somit auf 64 Proben, darunter nur zwei mit bekannter Pathologie (ID 52 und 53).

In allen 7 Modellen zeigt sich in der Gruppe der Literaturdaten (n = 17) eine deutlich geringere Variabilität als in der Gruppe der eigenen Proben (n = 47), die nach Adjustierung für die im jeweiligen Modell berücksichtigten Einflussgrößen verbleibt. Diese ist um mindestens das 2,4fache (Modell 2: 126,91 $pMC_{eigene\ Proben}$ zu 52,28 $pMC_{Literaturdaten}$) bis um das 4,1fache (Modelle 4 bis 7) bei den eigenen Proben größer als in der Gruppe der Literaturdaten und spiegelt die Datensituation adäquat wider: Die Literaturdaten stammen in 16 von 17 Fällen von Femurproben alters- und geschlechtgematchter Individuen mit den Sterbejahren 1967 und 1968, wohingegen bei den eigenen 47 Proben bewusst auf eine Heterogenität bei den Lebensdaten sowie der Skelettregion geachtet wurde, was sich auch in den gemessenen ^{14}C-Kollagenkonzentrationen notwendiger Weise und trotz Adjustierung der Modelle für diese Einflussgrößen zeigen musste.

Wurden die Zeitvariablen Sterbejahr, Alter und Geburtsjahr jeweils allein neben den Faktoren Geschlecht, Skelettregion und Pathologie in den Modellen 1 bis 3 berücksichtigt, zeigte jede von diesen einen deutlichen Effekt auf die Zielgröße (p-Werte < 0,01). Darüberhinaus zeigte nur der Faktor Pathologie einen möglichen (Modell 3: p-Wert = 0,1) bis wahrscheinlichen (Modell 2: p-Wert < 0,05) Effekt auf die Zielgröße, welcher auf nur 2 Proben (ID 52 und 53) zurückzuführen ist.

Wurden, wie in den Modellen 4 bis 6, zwei Zeitvariablen als stetige Co-Variablen berücksichtigt, zeigen Sterbejahr und Alter zusammen den gleichen Einfluss auf die Zielgröße wie das Geburtsjahr allein. Und in Kombination mit dem Geburtsjahr wurden weder das Alter noch das Sterbejahr signifikant. Um einen Hinweis zu bekommen, wie sich die drei Zeitvariablen gleichzeitig auf die Zielgröße auswirken, wurden diese als klassierte Co-Variablen in Modell 7 berücksichtigt: Auch hier zeigt nur das Geburtsjahr noch einen Einfluss auf die Zielgröße. Dieser Effekt ist jedoch mit einem p-Wert < 0,05 etwas geringer als in den Modellen 3, 5 und 6, was wohl auch auf die sehr grobe Klassierung der Daten zurückgeführt werden kann.

In einem ersten Ergebnis kann festgehalten werden, dass für die 64 in den 7 Modellen berücksichtigten Proben die Skelettregion und das Geschlecht wohl keinen Einfluss auf die Zielgröße nehmen, die beiden pathologisch veränderten Proben sich jedoch auf diese auswirken. Es ist jedoch festzuhalten, dass sich unter den anderen IDs ebenfalls pathologisch veränderte Proben befinden können.

In einem nächsten Schritt wird daher versucht, den Effekt von Geschlecht, Skelettregion und den 3 Zeitvariablen auf die ^{14}C-Konzentration im Kollagen abzuschätzen, nachdem aus dem Datensatz 7 Proben entfernt wurden. Dabei handelt es sich um:

- Die 2 Proben ID 50 und 51, für die die Skelettregion nicht bekannt ist
- Die 2 Proben ID 63 und 64, bei denen gleichzeitig Elemente des kranialen und postkranialen Skeletts zur Beprobung entnommen wurden
- Die 3 pathologisch veränderten Proben ID 50, 52 und 53
- ID 1, die als prämoderne Probe mit einem Sterbejahr von 1928 sehr weit entfernt von den anderen Proben liegt . Bei der Schätzung des linearen Einflusses von Sterbejahr und Geburtsjahr auf die Zielgröße wird dieser dadurch stark beeinflusst.

V 1.2.3 Multipler Vergleich von ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen und den Einflussgrößen Gruppe, Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion und Pathologie (n = 59)

Auch nach Ausschluss der 7 Proben (ID 1, 50, 51, 52, 53, 63 und 64) bleiben die in Tabelle 29 dargestellten Unterschiede für die verbleibenden 59 Proben erhalten. Es zeigt sich für die mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Kollagen beim Vergleich der Mediane sowie der Mittelwerte (Tab. 31):

- Dass diese für die eigenen Proben höher sind als für die Literaturdaten,
- Dass Individuen unter 40 Jahren im Vergleich zu Individuen von mindestens 40 Jahren höhere Werte zeigen,
- Dass Individuen mit einem Geburtsjahr zwischen 1940 bis 1959 die höchsten Werte im Vergleich zu allen anderen Geburtsjahres-Klassen aufweisen und
- Dass vor 1970 verstorbene Individuen die geringsten Werte im Vergleich zu allen anderen Sterbe-Dekaden haben.

In allen gerechneten 7 Modellen (Tab. 32) zeigt sich, dass durch den Ausschluss der 7 Proben die Anpassung der Modelle an die verbleibenden Daten verbessert wird. So sind die Akaike-Maße (AIC) beim Vergleich der entsprechenden Modelle für die 59 Proben jeweils kleiner als für die 66 Proben (Tab. 30 bzw. Tab. 32). Dieser Effekt ist fast so deutlich, wie jener, welcher durch die Hinzunahme der Zeitvariablen in die einzelnen Modelle erreicht wird. In allen Modellen zeigt sich weiterhin in der Gruppe der Literaturdaten (n = 17) auch nach Adjustierung für die im jeweiligen Modell berücksichtigten Einflussgrößen eine deutlich geringere (Rest)Variabilität als in der Gruppe der eigenen Proben (n = 42). Diese ist um mindestens das 2,4fache (Modell 2: 124,11 $pMC_{eigene\ Proben}$ zu 51,90 $pMC_{Literaturdaten}$) bis um das 4,3fache (Modelle 4 bis 6: jeweils 122,84 $pMC_{eigene\ Proben}$ zu 28,57 $pMC_{Literaturdaten}$) bei den eigenen Proben größer als in der Gruppe der Literaturdaten.

In allen 7 Modellen zeigen nur die Zeitvariablen als Co-Variable einen sicheren (p-Werte < 0,01) bis wahrscheinlichen (p-Werte < 0,05) Einfluss auf die ^{14}C-Konzentration und auch hier werden mit Sterbejahr und Alter (Modell 4) die gleichen Effekte auf die Zielgröße erfasst wie mit dem Geburtsjahr allein (Modell 3, 5, 6). Die beiden besten Modelle (3 und 7) lassen nur den Einfluss des Geburtsjahres erkennen, wobei sich beide nach dem Akaike-Maß kaum noch unterscheiden.

Tabelle 31: Die mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen nach Ausschluss der Proben ID 1, 50, 51, 52, 53, 63 und 64; insgesamt (grau hinterlegt) und klassiert nach den Einflussgrößen Gruppe, Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht und Skelettregion (n = 59).

		mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen							
		n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Insgesamt		59	122,37	12,38	102,1	112,70	118,90	131,50	151,0
Gruppe									
0	Literaturdaten	17	114,83	9,48	102,1	108,00	111,80	117,30	141,1
1	eigene Proben	42	125,42	12,18	105,5	114,60	124,10	136,00	151,0
Sterbejahr, klassiert in Dekaden									
2	1960-1969	18	113,78	8,03	102,1	107,60	111,75	117,30	131,6
3	1970-1979	7	123,13	13,14	110,9	111,20	116,30	136,50	140,0
4	1980-1989	15	123,13	12,13	111,4	113,70	118,90	126,70	147,9
5	1990-1999	19	129,62	11,43	109,0	122,30	125,90	141,12	151,0
Alter, klassiert in 20-Jahresklassen									
1	00-19 Jahre	5	124,52	5,12	118,6	120,70	125,00	126,70	131,6
2	20-39 Jahre	19	132,69	11,15	105,5	124,20	134,30	142,40	151,0
3	40-59 Jahre	20	119,43	11,39	107,5	111,55	114,90	123,70	147,9
4	60- Jahre	15	112,49	5,27	102,1	108,00	113,50	115,30	123,6
Geburtsjahr, klassiert									
1	(1860)1880-1899	7	110,93	6,70	102,1	107,60	110,30	114,20	123,6
2	1900-1929	13	113,12	3,44	106,6	111,70	113,50	115,30	118,4
3	1930-1939	12	116,50	8,37	105,5	111,15	114,40	119,85	136,5
4	1940-1949	8	130,99	10,81	114,6	123,70	130,45	138,55	147,9
5	1950-1959	7	142,13	4,87	136,0	138,10	142,40	143,80	151,0
6	1960-1969	8	130,10	8,03	122,7	124,10	126,95	136,31	143,4
7	1970-1979	4	122,75	3,75	118,6	119,65	122,85	125,85	126,7
Geschlecht									
1	männlich	45	123,66	13,29	105,5	112,70	120,70	136,00	151,0
5	weiblich	14	118,21	7,82	102,1	114,20	117,85	125,10	129,3
Skelettregion									
1	kranial	11	122,55	10,96	111,4	113,60	122,70	125,50	147,9
2	postkranial	48	122,33	12,78	102,1	111,75	118,75	131,55	151,0

Tabelle 32: Zusammenfassung der gerechneten 7 gemischten linearen Modelle für die mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen, (n = 59)

Modell	Zeitvariable (fix als Covariate)	n	Variabilität Gruppe	Wert ($\Delta^{14}C$ in pMC)	AIC**	signifikant Variable	p-Wert**
1	stetig: Sterbejahr	59	Literaturdaten	46,12	436,3	Sterbejahr	< 0,01
			eigene Proben	156,84			
2	stetig: Alter	59	Literaturdaten	51,90	430,7	Alter	< 0,01
			eigene Proben	124,11			
3	stetig: Geburtsjahr	59	Literaturdaten	33,58	422,1	Geburtsjahr	< 0,01
			eigene Proben	117,46			
4	stetig: Sterbejahr, Alter	59	Literaturdaten	28,57	422,2	Sterbejahr	< 0,01
			eigene Proben	122,84		Alter	< 0,01
5	stetig: Geburtsjahr, Alter	59	Literaturdaten	28,57	422,2	Geburtsjahr	< 0,01
			eigene Proben	122,84			
6	stetig: Geburtsjahr, Sterbejahr	59	Literaturdaten	28,57	422,2	Geburtsjahr	< 0,01
			eigene Proben	122,84			
7	klassiert: Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr	59	Literaturdaten	34,12	420,1	Geburtsjahr	< 0,05
			eigene Proben	122,29			

Modell 1 – 7: fixe Faktoren: Geschlecht, Skelettregion, Pathologie
gerechnet mit Proc Mixed in SAS®, Version 8.2 für PC; vgl. Kap. IV 3.2.1
AIC: Akaike-Maß
**: je kleinder, desto besser

Aus den bisherigen Ergebnissen kann in einer ersten Annäherung an die Interpretation der mittleren gemessenen ^{14}C-Konzentration im Kollagen nur ein (linearer) Einfluss der Zeitvariablen gezeigt werden. In einem nächsten Schritt soll daher versucht werden, diese Effekte durch lineare Regressions-Modelle für die stetigen Einflussgrößen genauer zu erfassen. Der Einfluss der Gruppe auf die Variabilität wird dabei nicht mehr berücksichtigt und alle 59 Proben gehen ohne weitere Unterscheidung in die Modellierungen ein. Die Modelle wurden in SAS® mit der Prozedur Proc Reg gerechnet (Kap. IV 3.2.1).

Zwischen den 3 Zeitvariablen und der Zielgröße ergeben sich Korrelationen, die in Tabelle 33 zusammengefasst wurden. Die Korrelationen zwischen den Zeitvariablen ergeben sich neben dem rechnerischen Zusammenhang auch aus der bewussten Begrenzung auf das Sterbeintervall von ca. 1950 bis 1995 bei der Sammlung der Proben und der Herkunft dieser aus rechtsmedizinischen Instituten und damit einem Altersbereich zwischen ca. 20 und 50 Jahren.

Tabelle 33: Korrelationen zwischen den drei stetigen Zeitvariablen Sterbejahr, Alter und Geburtsjahr sowie der mittleren gemessenen ^{14}C-Konzentration im Kollagen (n = 59).

	Sterbejahr	Alter	Geburtsjahr	^{14}C-Konzentration im Kollagen
Sterbejahr	1,0000			
Alter	-0,4245	1,0000		
Geburtsjahr	0,7145	-0,9368	1,0000	
^{14}C-Konzentration im Kollagen	0,4673	-0,5885	0,6354	1,0000

Geburtsjahr = -5,18 x 10^{-5} - Alter + Sterbejahr

Für den vorliegenden Datensatz können ohne weitere Zusatzannahmen 6 lineare Regressionsmodelle gerechnet werden, wie diese in Tabelle 34 dargestellt sind. Danach lassen sich fast 40 % (R^2_{adj}) der beobachteten Variabilität in der ^{14}C-Konzentration im Kollagen durch die Modelle 1 und 2 a-c erklären. Am schlechtesten wird der Zusammenhang zwischen ^{14}C-Wert und Sterbejahr (Modell 4) und somit jener Beziehung bewertet, auf welcher die Interpretation der ^{14}C-Werte in der „klassischen“ Radiocarbon-Methode beruhen.

Tabelle 34: Selektion der Regressionsmodelle nach dem Bestimmheitsmaß R^2_{adj} (n = 59).

Einflussgrößen im Modell	R^2_{adj}	R^2	lineares Regressionsmodell für die ^{14}C-Konzentration im Kollagen
1. Geburtsjahr	0,3932	0,4037	= -448,82 + 0,2952 x Geburtsjahr
2. a) Geburtsjahr und Alter	0,3828	0,4040	= -496,32 + 0,319 x Geburtsjahr + 0,0328 x Alter
2. b) Sterbejahr und Alter	0,3828	0,4040	= -496,32 + 0,319 x Sterbejahr - 0,2862 x Alter
2. c) Geburtsjahr und Sterbejahr	0,3828	0,4040	= -496,32 + 0,2862 x Geburtsjahr + 0,0328 x Sterbejahr
3. Alter	0,3349	0,3464	/
4. Sterbejahr	0,2047	0,2184	/

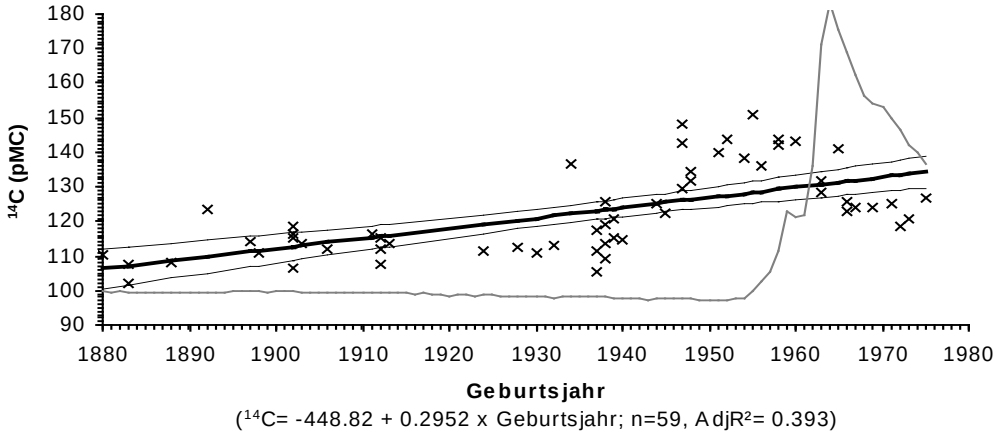
Die Regressions-Koeffizienten für die Modelle 2 ergeben sich aus dem von SAS® ermittelten rechnerischen Zusammenhang: Geburtsjahr = -5,18 x 10^{-5} - Alter + Sterbejahr

Obwohl ca. 40 % der beobachteten Variabilität in der ^{14}C-Konzentration durch diese einfachen Regressions-Modelle erklärt werden, reichen diese dennoch nicht zur Beschreibung der vorliegenden Datensituation aus, wie Abbildung 19 und 20 zu entnehmen ist. In Abbildung 19 sind die gemessenen ^{14}C-Konzentration in Bezug auf Geburtsjahr bzw. Sterbejahr

und im Vergleich zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre dargestellt. Ebenfalls enthalten sind der mittlere Vorhersagewert aus der jeweiligen linearen Regression mit dazugehörigem 95 %-Konfidenzintervall. Durch die Linear-Kombination von Geburtsjahr und Alter bzw. Sterbejahr und Alter ergeben sich die gezackten und unruhigen Verläufe der Intervalle. Weiterhin ist in Abbildung 20 die Verteilung der entsprechenden Residuen dargestellt. Es wird deutlich:

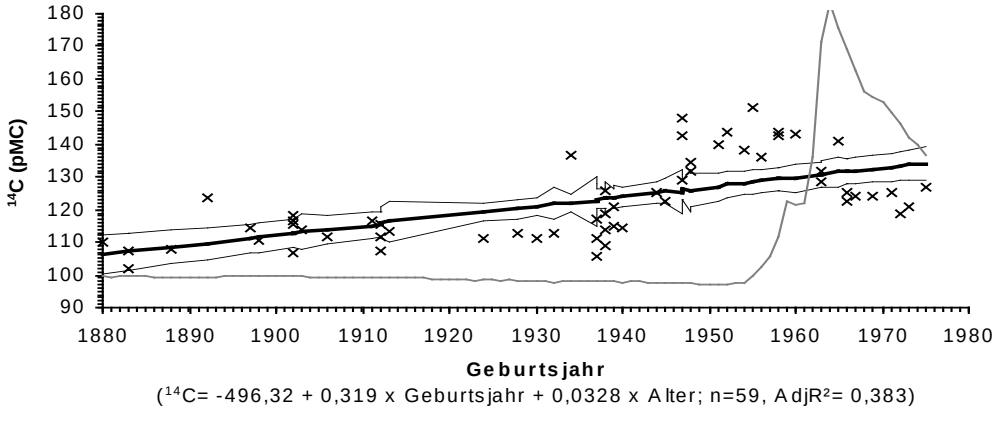
- Die Grafiken ähneln sich stark, was sich aus der Korrelation der 3 Zeitvariablen (Tab. 33) erklärt
- Für die einzelnen Proben sind die Residuen als *Differenz aus gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert* nicht gleichmäßig über den gesamten gemessenen ^{14}C-Bereich von mindestens 102,1 bis maximal 151,0 pMC verteilt (Tab. 31) – was einen deutlichen Hinweis auf die Begrenzung der Modelle und gegen die Verwendung derselben darstellt
- Der Zusammenhang ist nicht linear. Bis zu einem ^{14}C-Wert von 131,5 pMC oder 75 % der Proben (dem 3. Quartil in Tab. 31) werden die ^{14}C-Konzentrationen eher über- als unterschätzt (negative Differenzen), für die 25 % höchsten Werte dagegen deutlich unterschätzt (positive Differenzen). Bis auf Probe ID 49 mit 141,1 pMC liegen alle Literaturdaten in dem Bereich unter 131,5 pMC
- Die Art des Zusammenhanges ist unbekannt. Eine bessere Anpassung der Modelle an die Datensituation wird in diesem Kapitel dennoch nicht versucht, was z. B. durch eine Transformation der Einfluss- und / oder der Zielgröße oder durch fraktionierte Polynome, wie z. B. mit Polynomen des 2. bis 4. Grades oder unter Verwendung von Splines gelingen könnte.
  Es wird vielmehr versucht, diesen Zusammenhang direkt über biologische Effekte zu erfassen, die über den Lebenszyklus eines jeden Individuums mit der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ und einer jährlichen Austauschrate gegeben ist (Kap. V 2, Kap. II 5.5.3).

a) Geburtsjahr



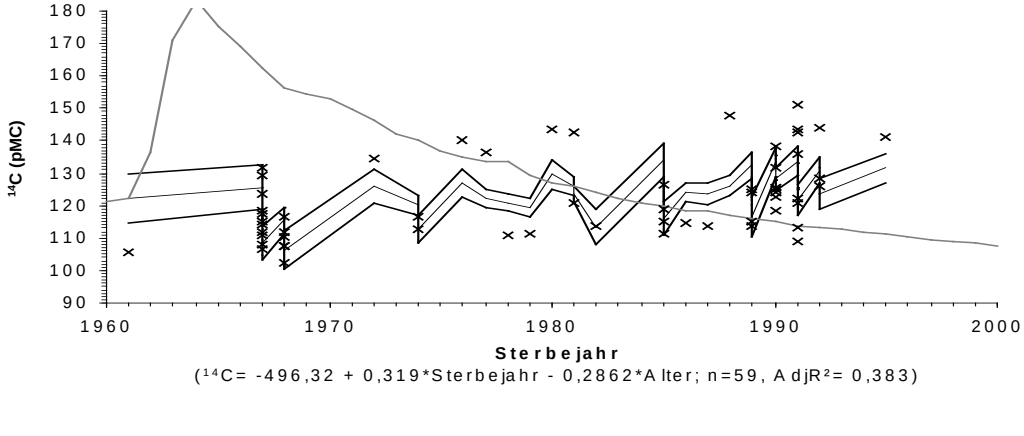
(^{14}C= -448.82 + 0.2952 x Geburtsjahr; n=59, AdjR²= 0.393)

b) Geburtsjahr und Alter



(^{14}C= -496,32 + 0,319 x Geburtsjahr + 0,0328 x Alter; n=59, AdjR²= 0,383)

c) Sterbejahr und Alter



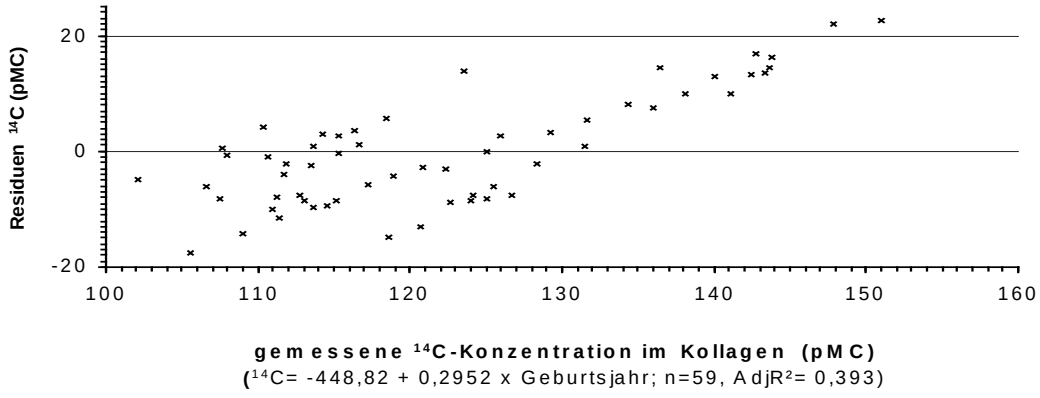
(^{14}C= -496,32 + 0,319*Sterbejahr - 0,2862*Alter; n=59, AdjR²= 0,383)

Abbildung 19: Darstellung für die berechneten linearen Regressionen für den Einfluss der drei Zeitvariablen Geburtsjahr, Sterbejahr und Alter auf die mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Kollagen (n = 59).

a) Geburtsjahr
b) Geburtsjahr und Alter
c) Sterbejahr und Alter

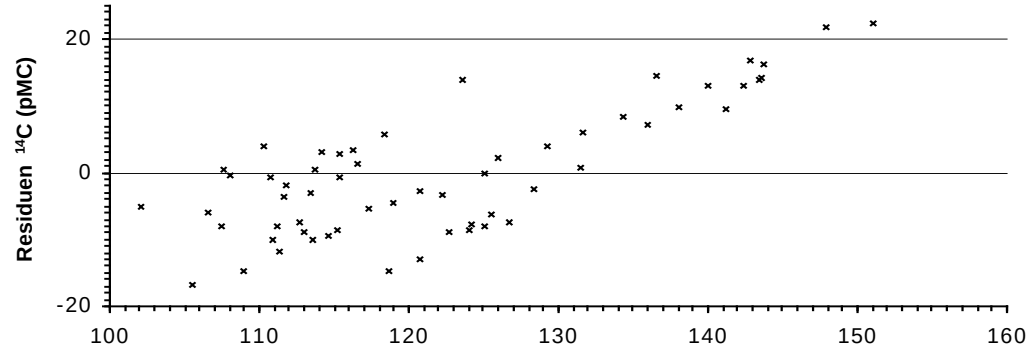
x ^{14}C-Konzentration im Kollagen
≡ mittlerer Vorhersagewert mit 95%KI
— ^{14}C in der Atmosphäre

a) Geburtsjahr



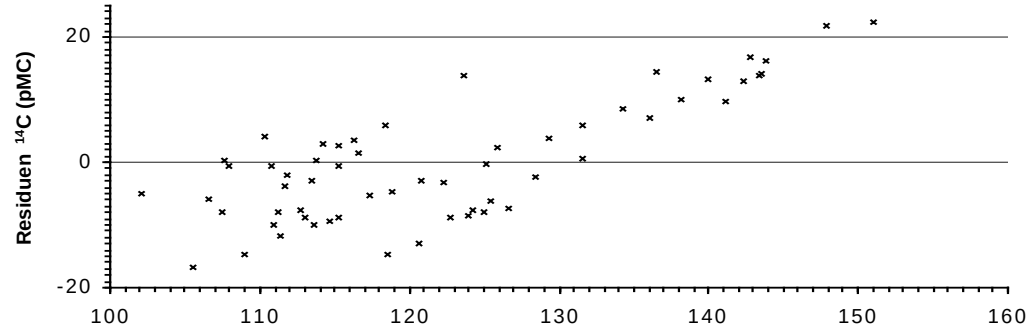
(¹⁴C= -448,82 + 0,2952 x Geburtsjahr; n=59, AdjR²= 0,393)

b) Geburtsjahr und Alter



(¹⁴C= -496,32 + 0,319 x Geburtsjahr + 0,0328 x Alter; n=59, AdjR²= 0,383)

c) Sterbejahr und Alter



(¹⁴C= -496,32 + 0,319 x Sterbejahr - 0,2862 x Alter; n=59, AdjR²= 0,383)

Ab

(Residuen) in Abhängigkeit von der beobachteten ¹⁴C-Konzentration im Kollagen (n = 59).

a) Geburtsjahr (zu Abbildung 19 a)
b) Geburtsjahr und Alter (zu Abbildung 19 b)
c) Sterbejahr und Alter (zu Abbildung 19 c)

V 1.3 Der Einfluss der Gewebefraktion, der Aufbereitungsmethode und der Gewebeart sowie des Gewebealters auf die ^{14}C-Konzentration

In diesem Kapitel erfolgt die Beurteilung der Proben rein deskriptiv und mit Hilfe von Grafiken im Sinne einer Kasuistik. Zur Bewertung der gemessenen ^{14}C-Konzentrationen werden diese mit den ^{14}C-Werten aus der Atmosphäre verglichen (Anhang 1a).

V 1.3.1 Gewebefraktion und Aufbereitungsmethode

Von insgesamt 24 Individuen wurde für mehr als eine Gewebefraktion die ^{14}C-Konzentration bestimmt: Für 21 Individuen lag zusätzlich zum Kollagen-Wert ein auswertbarer Apatit-Wert und für 5 Individuen zusätzlich ein auswertbarer Fett-Wert vor. Nur für zwei Individuen wurden alle drei Fraktionen gemessen (Anhang 15). Zur Beurteilung, ob und wie die Gewebefraktion Einfluss auf die gmessene ^{14}C-Konzentration nimmt, wurde für jeden Donor die Differenzen aus Kollagen und Apatit, Kollagen und Fett bzw. Apatit und Fett nach Formel 12 (Kap. IV 3.2) berechnet und in Abbildung 21 sortiert nach Sterbejahr und Alter des Donors (ID) dargestellt.

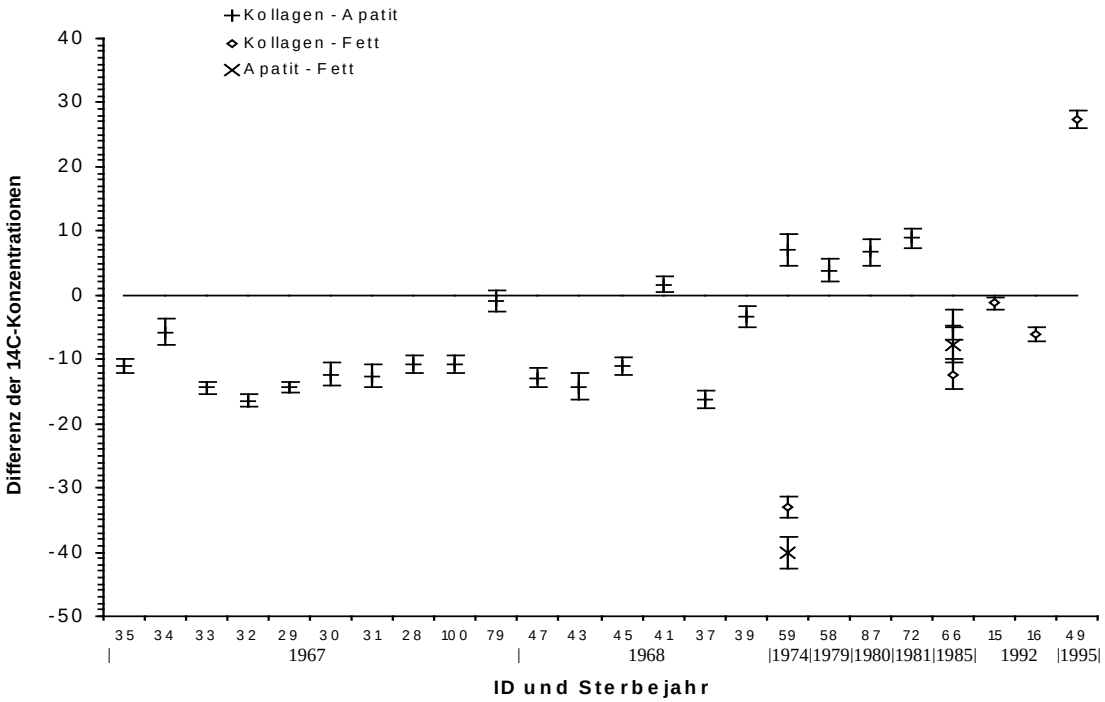


Abbildung 21: Darstellung der Differenzen (MW ± s) zwischen den ^{14}C-Konzentrationen in Kollagen, Apatit und Fett je ID (aufsteigend sortiert nach Sterbejahr und Alter, Anhang 15).

Von 1957 bis 1964 ist die ^{14}C-Kurve der Atmosphäre von weniger als 100 pMC sehr steil angestiegen. Kurz nach Erreichen des ^{14}C-Gipfels im Jahr 1964 mit 183,5 pMC verstarben die durch L'ORANGE UND ZIMEN (1968a, 1969a) untersuchten 15 erwachsenen Individuen (ID 100, 28-35, 37, 39, 41, 43, 45, 47). Diese zeigen bis auf ID 41 höhere ^{14}C-Konzentrationen im Apatit als im Kollagen und die berechneten ^{14}C-Differenzen aus Kollagen und Apatit sind somit negativ. ID 41, eine 57jährige Frau, entspricht damit eher der eigenen Probe ID 79, die von einem 1967 verstorbenen 19jährigen Mann stammt.

Für weitere 8 Individuen (ID 15, 16, 49, 58, 59, 66, 72, 87), die frühestens 1974, also 10 Jahre nach dem Gipfel der ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre, verstorben sind, zeigt sich dagegen ein abweichendes Bild mit höheren ^{14}C-Konzentrationen im Kollagen als im Apatit. Die berechneten ^{14}C-Differenzen sind somit positiv. Gleichzeitig konnten für 5 Individuen ^{14}C-Konzentrationen für Fett bestimmt werden. Zur Verdeutlichung werden die gemessenen ^{14}C-Konzentrationen für diese 8 Individuen und zusätzlich für ID 79 und 41 in Abbildung 22 im Vergleich zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre dargestellt. Für die 3 Individuen unter 40 Jahren (ID 79, 87 und 49) wurde weiterhin die Lebensspanne abgetragen.

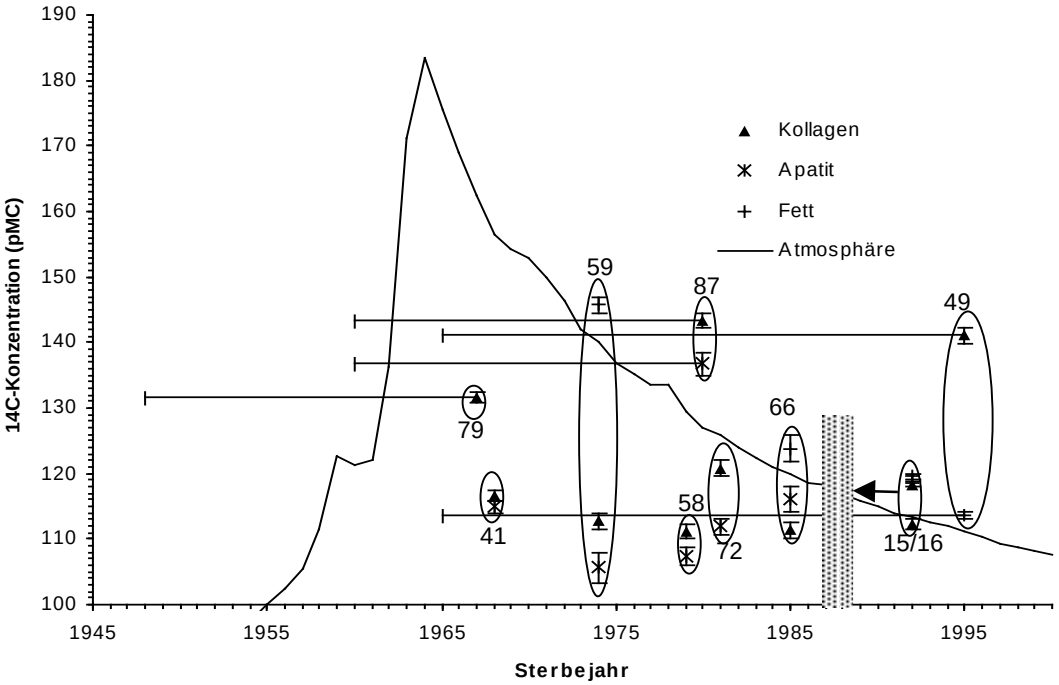


Abbildung 22: Der Zusammenhang von Sterbejahr und ^{14}C-Konzentration (MW ± s) in Kollagen, Apatit und Fett im Vergleich zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre (Anhang 1).
Werte eines Donors wurden durch Ellipsen zusammengefasst und mit der ID bezeichnet. Für ID 79, 87 und 49 wurde zusätzlich die Lebensspanne abgetragen. (Für alle anderen IDs reicht diese über 1945 hinaus.) Bei ID 15, 16 und 49 handelt es sich um Literaturdaten (WILD ET AL. 1998, 2000): ID 15 und 16 wurden 1992 aufgefunden und als mögliche Sterbejahre (⁞) wird der Zeitraum zwischen den Jahren 1987 bis 1989 durch die Autoren diskutiert. Der Kollagen-Wert für ID 49 ist kritisch zu beurteilen (siehe Kap. V 3.4.3, VI 1.3.1, Kap. VI 3.2.1).

In Zusammenfassung der ausführlichen und kritischen Diskussion der Grundlagen für die Interpretation von ^{14}C-Werten aus humanem Knochengewebe in Kapitel II 3 bis II 5 kann als sicher angenommen werden, dass im Kollagen die längste und im Fett die kürzeste Verweilzeit im Vergleich dieser 3 Fraktionen für Kohlenstoff vorliegt und dass sich Fett zudem durch eine qualitativ kürzere Verweilzeit gegenüber den beiden anderen Fraktionen auszeichnet. Diese grundsätzliche Unterscheidung findet sich auch in den hier vorgelegten Daten. So folgen die 5 Fett-Proben (ID 59, 66, 15, 16 und 49) relativ dicht der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre und unterstützen somit diese Annahme.

Weiterhin kann aus den Grundlagen im Kapitel II 5 sowie Ausführungen in Kapitel V 2 sowie VI 2 festgehalten werden, dass mit und nach dem puberalen Wachstumsschub etwa 50 % der Skelettmasse aufgebaut werden. Dieser setzt durchschnittlich bei den Mädchen mit 12 ± 2 Jahren und bei den Jungen mit 14 ± 2 Jahren ein (Kap. II 5.4.3). Nach Erreichen der

Skelettreife finden im Kollagen und Apatit nur noch geringe Umbauprozesse statt, so dass sich sehr hohe Verweilzeiten bzw. als deren Reziproke geringe Austauschraten ergeben.

Allein mit diesen sehr verallgemeinerten Annahmen lässt sich unter Berücksichtigung des Alters des Donors, dem Verhältnis der ^{14}C-Konzentrationen zwischen Fett und Kollagen und/ oder Fett und Apatit und dem Ort der Gewebeentnahme eine erste Zuordnung der Proben zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre erkennen (Anhang 1). Diese Zuordnung könnte in einer ersten Annäherung als *qualitative Datierungs-Hilfe* für humanes Knochengewebe verwendet werden, wie in Kapitel VI 1.3 für einzelne Proben ausführlich diskutiert wird. Diese Anwendung geht bereits deutlich über die bisherigen Möglichkeiten der Radiocarbon-Methode in der Forensik hinaus.

Diese Anwendung ist prinzipiell möglich, da sich für jede beliebige Probe aus humanen Geweben anhand der gemessenen ^{14}C-Konzentration zwei mögliche Zeitintervalle für die Probengewinnung bzw. die Sterbejahre ergeben: Für ^{14}C-Werte > 100 pMC ergeben sich als erstes Intervall *„einige“* Jahre um das Jahr, indem der gemessene ^{14}C-Wert das erste Mal in der Atmosphäre *überschritten* wurde. Als zweites Intervall ergeben sich *„einige“* Jahre um das Jahr, indem dieser Wert in der Atmosphäre wieder *unterschritten* wurde. (Für ^{14}C-Werte $\leq$ 100 pMC ergeben sich entsprechend umgekehrte Intervalle). Was unter *„einigen Jahren“* zu verstehen ist, hängt zum Einen davon ab, in welchem Umfang die Standardabweichung des Messwertes im Vergleich mit der Referenzkurve der Atmosphäre berücksichtigt wird (Kap. IV 3.2). Zum Anderen wird dieses Intervall entscheidend von der Verweilzeit des Kohlenstoffs in der jeweiligen Gewebefraktion beeinflusst. Je länger diese ist, um so breiter sind die Intervalle und je näher sich diese um das Jahr 1964 mit dem höchsten ^{14}C-Wert in der Atmosphäre anordnen, um so eher gehen diese ineinander über. Je kürzer die Verweilzeit dagegen ist, um so schmaler werden diese Intervalle. Im Extrem schrumpfen diese Intervalle genau auf ein Jahr zusammen, z. B. wenn in einem Jahr ein vollständiger Umbau des Gewebes z. T. mehrfach erfolgt (rote Blutkörperchen) oder zwischen den Ablagerungen eines Jahres kein Stoffaustausch mehr besteht (z. B. Gallensteine).

Besonders geeignet im Sinne einer Datierungs-Hilfe erscheint für Skelettmaterial die Kombination von ^{14}C-Werten für Fett sowie Kollagen und/oder Apatit, also einer Fraktion mit kurzer und einer Fraktion mit langer Verweilzeit, wie dies für ID 59, 66, 15, 16 und 49 vorliegt (Kap. VI 1.3.1). Der ^{14}C-Wert für Fett ordnet ein Individuum relativ dicht der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre zu. Durch den ^{14}C-Wert für Kollagen- und/oder Apatit kann in einem nachfolgenden Schritt dann relativ sicher zwischen möglichen Intervallen unterschieden

werden bzw. kann nur durch die Kombination beider Messwerte eine Fehlinterpretation eines Einzelwertes vermieden werden (ID 49). Eine Konkretisierung erfahren diese Überlegungen unter Verwendung des Modells FoRCaDa in den Kapiteln V 3.5.3 für ID 49 und V 3.5.4 für ID 59, 66, 15 und 16, wobei der qualitative Charakter dieses Ansatzes verlassen und eine quantitive Bestimmung versucht wird.

Dass an dieser Stelle nur von einer möglichen *Datierungs-Hilfe* und nicht *Datierungs-Methode* gesprochen wird, liegt in der geringen Fallzahl von nur 5 Proben sowie dem Fehlen von identifizierten Individuen, für die diese Anwendung ohne Kenntnis der Lebensdaten überprüft werden kann. Diese Aufgabe wird an anderer Stelle zu lösen sein. Dass es sich lohnen würde, diesem Ansatz zu folgen, zeigt sich an ID 49: Der ^{14}C-Wert für Kollagen hätte zu einer „Vorverlegung“ des Sterbejahres bis zu einem Jahrzehnt geführt, welches nur durch den Vergleich mit dem ^{14}C-Wert für Fett vermieden werden konnte. Dies stellt wiederholt die Bedeutung von Reservoir-Effekten heraus, welche sich in den Gewebefraktionen, im Gewebealter und den Aufbereitungsmethoden unterschiedlich widerspiegeln.

Aber auch aus der Kombination der ^{14}C-Werte von Kollagen und Apatit mit ihren doch recht ähnlichen Stoffwechselraten lässt sich eine Zuordnung eines Individuums zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre erkennen. Diese ist jedoch wesentlich allgemeiner und es zeigen sich für die untersuchten Proben von 21 Individuen auch Ausnahmen, die vielleicht auf die Skelettregion (ID 66), aber nicht unbedingt auf einen Altersunterschied (ID 41) zurückzuführen sind. Der wichtige Einfluss von Pathologien kann anhand dieser Proben wegen fehlender Angaben leider nicht diskutiert werden.

V 1.3.2 Gewebeart

Auf die gemessene ^{14}C-Konzentration im Gewebe nimmt nicht nur die Gewebefraktion, sondern auch die Gewebeart Einfluss. Einen ersten Hinweis erhält man anhand der 24 Messwerte für 6 im Jahr 1968 verstorbenen Individuen (Anhang 16). Für diese wurde getrennt nach den beiden Gewebearten Kompakta und Spongiosa sowohl eine Kollagen- als auch eine Apatit-Probe gemessen. In Abbildung 23 sind die Messwerte dargestellt (mit MW ± s).

Neben den interindividuellen Unterschieden sind vor allem die intraindividuellen Unterschiede beeindruckend. Im Apatit der Spongiosa werden bei allen 6 Individuen die höchsten ^{14}C-Konzentrationen gemessen und bei 5 Individuen im Kollagen der Kompakta die niedrigsten Werte. In diesem Unterschied verstärken sich gegenseitig Effekte der im Vergleich zum Kollagen im Apatit bzw. der im Vergleich zur Kompakta in der Spongiosa höheren Stoffwechselrate.

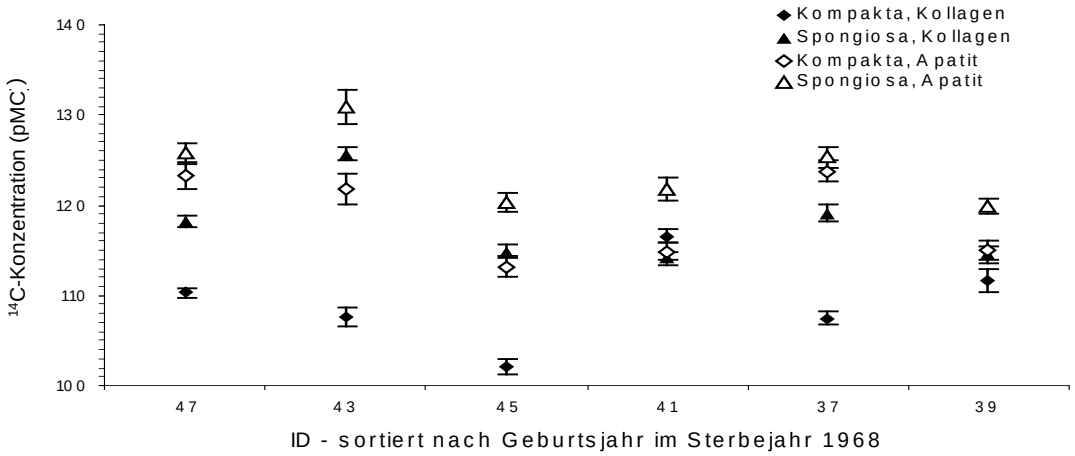


Abbildung 23: ^{14}C-Konzentrationen (MW ± s) für Kompakta und Spongiosa in Kollagen und Apatit je ID (Anhang 16, Werte nach L'ORANGE UND ZIMEN 1969a).

Da die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ nur für das Gesamtskelett beschrieben werden kann (Kap. II 5, Kap. V 2), sollte somit darauf geachtet werden, dass in der zur Verfügung stehenden Gewebeprobe ähnliche Verhältnisse zwischen Kompakta und Spongiosa vorliegen wie im Gesamtskelett, welches zu ca. 80 % aus Kompakta besteht bzw. sollten spongiosareiche Skelettelemente oder Gewebeproben vermieden werden.

V 1.3.3 Gewebealter

Das Problem eines vom chronologischen Alter des Individuums abweichenden Gewebealters wurde in dieser Arbeit umgangen, indem regelmäßig der ganze Knochen bzw. entsprechende Knochenhälften bzw. -anteile der Beprobung zugeführt wurden. Um den Einfluss des Gewebealters, also den Ort der Probenentnahme andeutungsweise zu erfassen,

wurden von einem Individuum für drei Proben die ^{14}C-Konzentration bestimmt (ID 94 bis 96). Bei dem Asservat handelte es sich um die linke Tibia eines 19jährigen Mannes, der 1990 bei einem Verkehrsunfall ums Leben kam. Die Tibia zeigte eine dafür typische Trümmerfraktur in der distalen Diaphysenhälfte. Der Tabelle 35 ist die Beschreibung der drei Proben zu entnehmen.

Tabelle 35: Beschreibung der drei Proben ID 94 bis 96 zur Bestimmung der ^{14}C-Konzentration in Abhängigkeit vom Gewebealter (geboren 1971, gestorben 1990).

ID	Beschreibung der Probe	Δ^{14}C (pMC) MW ± s	Abstand von pM[4] (cm)	Gewebe-bildungsalter[1]	Gewebe-alter[2]	Kalender-jahre[3]
94	4. Viertel der proximalen Diaphysenhälfte, von der Mitte ausgehend	120,7 ± 0,9	18 - 24	12	7	1983 - 1990
95	2. Viertel der proximalen Diaphysenhälfte, von der Mitte ausgehend	123,1 ± 1,0	6 - 12	1	18	1972 - 1990
96	physiologische distale Diaphysenhälfte	125,0 ± 0,9	0 - 18	0	19	1971 - 1990

1 Gewebebildungsalter: Lebensjahr, indem die Gewebebildung frühestmöglich einsetzt
2 Gewebealter: Lebensalter – Gewebebildungsalter
3 Kalenderjahre: Intervall, in denen das Gewebe gebildet wurde
} alle Angaben nach MAAT (1984, S. 294, Tbl. 1)

4 Diaphysenlänge (41,7 cm) = 0,8834 (für Männer) x gesamte Länge (47,4 cm)
pM: physiologische Mitte (18,0 cm) = 0,43 (von distal) x Diaphysenlänge (41,7 cm)

In Abbildung 24 ist die Tibia schematisch mit den drei Orten der Probenentnahme (a) dargestellt. Weiterhin sind die gemessenen ^{14}C-Konzentrationen im Kollagen im Vergleich zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre von 1970 bis 1990 (Abb. 24 b) für ID 94 bis 96 dargestellt. Obwohl sich der 19jährige Donor dieser Proben mit seinen Lebensdaten für diese Fragestellung nicht optimal der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre zuordnet – er stirbt 26 Jahre nach dem ^{14}C-Gipfel in der Atmosphäre – überschneiden sich die Messwerte für ID 95 und ID 96 nicht mit dem Wert für ID 94. Auch würde man nach einem Vergleich der Proben ID 94 und 96 anhand des Mittelwertes und der zweifachen Standardabweichung diese kaum als zu einem Individuum gehörend interpretieren, da sich die Intervalle nicht überschneiden (vgl. Kap. IV 3.4.2, V 3.4, V 3.5). Diese Proben eines Individuums weisen deutlich darauf hin, dass der Ort der Probenentnahme und damit das Gewebealter einen erheblichen Einfluss auf die gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen haben kann. Dies hat sowohl für die Interpretation der Messergebnisse von ID 49 als auch im Zusammenhang mit der AMS-Methode Bedeutung, da letztere mit einem sparsamen Materialeinsatz für die ^{14}C-Be-

stimmung auskommt. Es ist sogar davon auszugehen, dass nur das Gewebealter und nicht das Alter des Individuums für die Interpretation der gemessenen ^{14}C-Werte entscheidend ist. Für eine Quantifizierung dieses Effektes liegen jedoch keine ausreichenden Daten vor, weder eigene Proben (ID 94 und 96) noch Literaturdaten (ID 49). Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Bis zur Lösung dieses Problems sollte dringed auf eine Gleichheit von Gewebe- und Lebensalter geachtet werden.

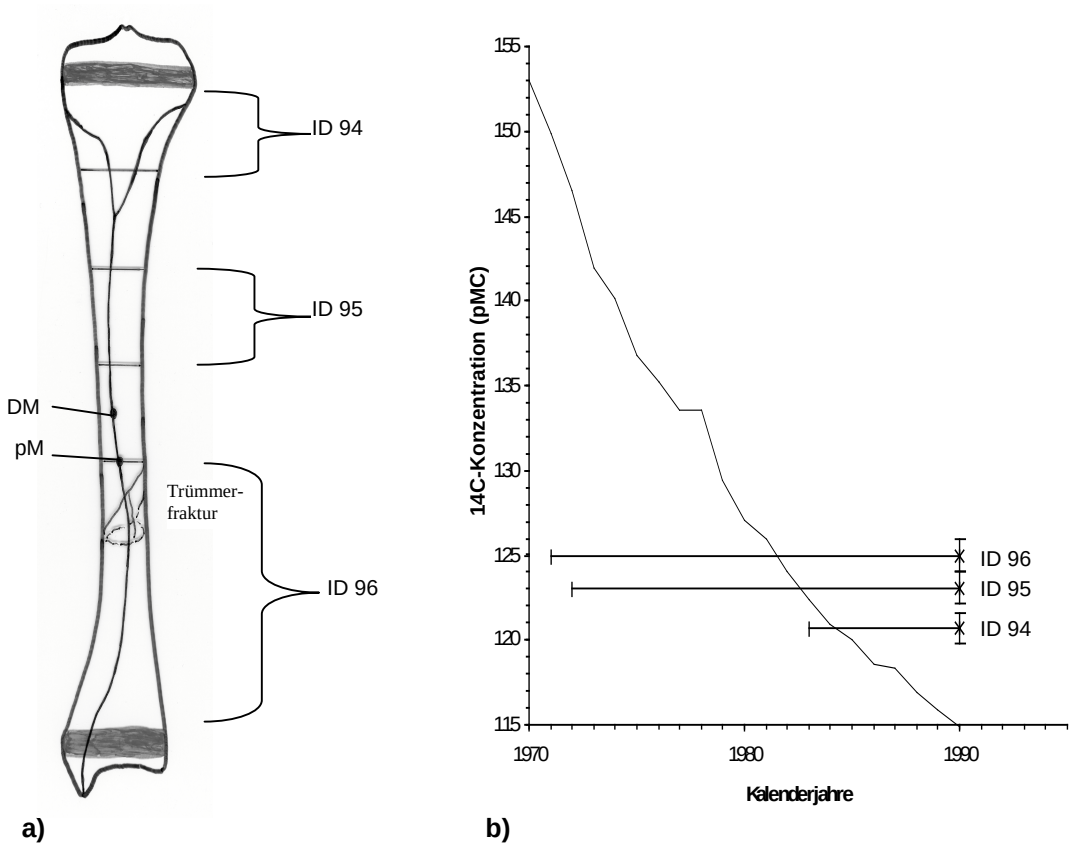


Abbildung 24: Die 3 Proben (ID 94 bis 96) eines 1990 bei einem Verkehrsunfall verstorbenen 19jährigen Mannes.

a) Orte der Probenentnahme an der linken Tibia, nach MAAT (1984, hier Tab. 35)
DM: metrische Diaphysenmitte
pM: physiologische Diaphysenmitte

b) ^{14}C-Konzentrationen im Kollagen (MW ± s) im Vergleich zum Sterbejahr 1990 und zu den Intervallen, in denen das Gewebe gebildet wurde.

V 1.4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse aus dem multiplen Vergleich von ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen und den Einflussgrößen Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht und Pathologie verdeutlicht überraschend klar den methodischen Unterschied zwischen der „klassischen“ Radiocarbon-Methode und dem theoretischen Ansatz dieser Arbeit. Dieser Ansatz besteht ja darin, die starken Schwankungen in der ^{14}C-Konzentration der Atmosphäre und somit der Nahrung für die zeitliche Einordnung einer Knochen(kollagen)probe zu nutzen. Da der radioaktive Zerfall dabei vollständig vernachlässigt werden kann, wird das während der gesamten Lebenszeit gespeicherte Radiocarbon der Beprobung zugeführt, gemessen und nachfolgend bewertet. Die ^{14}C-Konzentration im Knochengewebe ergibt sich dabei aus einer Wechselwirkung zeitlicher Effekte und biologischer Prozesse.

Als wichtigste zeitliche Einflussgröße lässt sich das Geburtsjahr benennen, welches festsetzt, ab wann das Individuum in Wechselwirkung mit der Umwelt tritt. Durch das Geburtsjahr wird auch festgelegt, auf welche ^{14}C-Konzentrationen das Individuum im Laufe seines Lebens nachfolgend trifft. Diese Wechselwirkung zwischen Individuum und Umwelt endet im Sterbejahr. Diese Spanne zwischen Geburtsjahr und Sterbjahr ist hochvariabel – sowohl in ihrer Länge, die dem Lebensalter entspricht, als auch in ihrer Parallelisierung zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre. Da die ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre ab 1955 sehr variabel war, musste sich dieser Effekt auch bei den ausgewerteten 66 (Kap. V 1.2.2) bzw. 59 ^{14}C-Proben (Kap. V 1.2.3) widerspiegeln, wobei sich dieser durch einen linearen Zusammenhang mit einem adjustieren Bestimmtheistmaß R^2_{adj} von ca. 40 % erfassen lässt.

Die Messwerte werden durch Reservoir-Effekte beeinflusst, die sich über biologische Effekte wie die Gewebefraktion (Kollagen, Apatit und Fett), die Gewebeart (Kompakta und Spongiosa), das Gewebealter und evtl. die Skelettregion (kranial und postkranial) bemerkbar machen und durch Methoden der Probenaufbereitung (weich bzw. hart für Kollagen) und der Messung (Zählrohr, AMS) verstärkt werden (Kap. V 1.3).

Die biologischen Effekte stehen mit Wachstums- und Reifungsprozessen des Skelettes im Zusammenhang, wie diese unter den Begriffen Knochenbildung und -umbildung in den Kapiteln II 4 und II 5 bereits diskutiert wurden. Diese gilt es über die jährliche relative Änderung der Skelettmasse und eine jährliche Austauschrate genauer zu beschreiben. Aus der Zusammenführung der biologischen und zeitlichen Effekte ergibt sich die Methode FoRCaDa,

für die jedoch im Ergebnis der vorliegenden Ausführungen restriktive Anforderungen an die Probengewinnung und -aufbereitung gestellt werden müssen:

(1) Die Methode wird für Knochenkollagen erarbeitet

(2) Die Probe ist aus dem postkranialen Skelett zu entnehmen, vorzugsweise aus Femur oder Tibia, und soll dem gesamten Knochen entsprechen. Dazu wird, von der (physiologischen) Diaphysenmitte ausgehend, ein Längsspan entnommen, der auch die gesamte Knochenhälfte umfassen kann.

(3) Die Probe ist komplett aufzubereiten, wobei die „harte“ Methode der Gelatine-Herstellung verwendet wird. Aus der fertigen Kollagenprobe wird ggf. eine Teilprobe entnommen und gemessen, wobei diese mit der AMS-Methode oder mit Proportionalzählrohren erfolgen kann.

(4) Die Ausführungen gelten nur für gesunde Individuen. Diese Beurteilung ist im Rahmen der Osteologie leider eingeschränkt. Als gesund wird daher ein Individuum definiert, wenn sich bei der morphologischen (und mikroskopischen) Inspektion keine über die normale Variabilität hinausgehenden Abweichungen bei der Knochenbildung und -umbildung erkennen lassen und keine darüberhinausgehenden Daten zur Krankengeschichte vorliegen.

Aus der gleichzeitigen Beprobung von mindestens zwei Gewebefraktionen eines Individuums lässt sich eine Datierungshilfe zur Liegezeitbestimmung von Skelettfunden herleiten. Als besonders aussichtsreich hat sich dafür die Kombination des stoffwechsel*aktiven* Fettes mit dem stoffwechsel*trägen* Kollagen und/oder Apatit herausgestellt. Dass damit verbundene Vorgehen bezieht sich auf die *Interpretation* der gemessenen Konzentrationsunterschiede für ^{14}C zwischen den Fraktionen unter Berücksichtigung des (Gewebe)Alters, der Gewebeart und der Skelettregion im Vergleich zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre. Dieser Ansatz kennt nicht die einschränkenden Bedingungen zur Probengewinnung wie die Methode FoRCaDa und ist im Gegensatz zu anderen in der Rechtsmedizin angewendeten Verfahren zur Liegezeitbestimmung ebenfalls unabhängig von postmortalen Einflüssen auf das Knochengewebe.

V 2 Die Bestimmung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM)

In Kapitel II 5 wurde der Kohlenstoff-Stoffwechsel im Knochen bereits in seiner Abhängigkeit von Auf- und Abbauvorgängen im Gewebe erkannt. Diese vielgestaltigen Prozesse werden in dieser Arbeit zu zwei Parametern zusammengefasst und gehen als:

(1) Jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM, Formel 16, Kap. IV 3.3.4 und Kap. VI 2.6) und

(2) Jährliche Austauschrate ($1/t_C$, Kap. II 5.5.3) mit extraindividuellen ^{14}C-Reservoiren als zusammengefasste und z. T. durch intraindividuellen und intraostealen Austausch überlagerte Größe für

   (a) Die jährliche Umbaurate für das Knochengewebe und

   (b) Den jährlichen Korrekturwert zur Skelettmasse-Änderung

in das Modell FoRCaDa ein. Denn zusammen erfassen beide die biologischen Prozesse, über die ^{14}C aus der Atmosphäre in das Knochengewebe gelangt und regelhaft ausgetauscht wird. Diese beiden Parameter erfassen jeder für sich die *durchschnittliche Entwicklung* über alle Skelettelemente und Gewebearten sowie über die gesamte Lebensspanne eines Menschen hinweg. Als Zeitraum, für den die Veränderungen dieser beiden Parameter über die Lebensspanne eines Individuums hinweg bestimmt werden, wird ein Lebensjahr festgelegt.

Somit ist die hier angestrebte Datierungsmethode FoRCaDa zur Liegezeitbestimmung von (isoliert) aufgefundenen Menschenknochen nur dann wirklich praktikabel, wenn durch das Modell die gemessenen ^{14}C-Konzentrationen im Knochenkollagen in ausreichendem Umfang nachvollzogen werden können. Somit dürfen die Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Werten, worauf diese im Detail auch immer zurückzuführen sind, nicht zu groß werden. Eine Überprüfung dieser Voraussetzung erfolgt im Kapitel V 3.3.2.

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zur Berechnung der *jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$* dargestellt. Diese ergibt sich als makroskopisch relativ gut fassbarer Parameter aus der Entwicklung der Skelettmasse$_{netto}$ über die gesamte Lebensspanne eines Individuums. Es wird daher in Kapitel VI 2 versucht, anhand von Literaturdaten die *durchschnittliche* Entwicklung der Skelettmasse$_{netto}$ mit Hilfe von Regressions-Modellen ausreichend zu beschreiben. Daraus ergibt sich eine erste *Annäherung* an die komplexen Vorgänge während des Wachstums, der Reifung und der Alterung der Skelett-

masse$_{netto}$ eines Individuums. Die Erarbeitung dieser „Entwicklungs-Kurven“ stellt die *Voraussetzung* für die Beschreibung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ dar.

Bei der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse handelt es sich um die relative Entwicklungsgeschwindigkeit, wie diese in der Anthropologie (Auxologie) z. B. zur Beschreibung von Wachstumsprozessen bei Kindern und Jugendlichen verwendet wird. Sie wird hier als Änderung der Skelettmasse in einem Lebensjahr in Relation zu der Masse, die am Ende desselben Lebensjahres erreicht wird, definiert und errechnet sich nach Formel 16 (Kap. IV 3.3.4). Sie erfasst den Netto-Gewinn bzw. Netto-Verlust in einem Lebensjahr:

- Mit Werten > 0 bzw. > 0 % als einen Zuwachs, da mehr Skelettmasse aufgebaut als gleichzeitig abgebaut wird,
- Mit Werten < 0 bzw. < 0 % als eine Reduktion, wenn mehr Skelettmasse abgebaut als gleichzeitig aufgebaut wird bzw.
- Mit Werten = 0 bzw. = 0 % ein Gleichgewicht, wenn sich Auf- und Abbauprozesse die Waage halten.

Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse (ΔSM) leitet sich direkt aus der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ ab, wie diese getrennt für beide Geschlechter in Kapitel VI 2 erarbeitet wurde. Dazu standen nach Ausschluss nicht geeigneter Datensätze für die beiden Altersintervalle von 0 bis 22,5 Jahre bzw. 20,5 bis 83,5/84,5 Jahre 222 Datensätze mit 1253 Individuen zur Verfügung (746 Männer in 120 Datensätzen, 507 Frauen in 102 Datensätzen). Neun Männer und 5 Frauen waren zwischen 20,5 und 22,5 Jahre alt und gingen in die Berechnungen zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für beide Altersintervalle ein. Die Berechnungen wurden mit gewichteten Datensätzen durchgeführt (Gewichtungsfaktor= $\sqrt{Individuenzahl}\,/\,Alter$).

In Abbildung 25 sind die Kurven für die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ im Vergleich zu den beobachteten Daten dargestellt (Anhang 25 und 26 bis 20,5 Jahre, Anhang 33 und 34 von 20,5 bis 83,5/84,5 Jahre). Die mit Hilfe der hergeleiteten Polynome berechneten Skelettmassen sind im Anhang 35 für die Männer und im Anhang 36 für die Frauen für Individuen von 0 bis 99 Jahre zusammengestellt.

Bis zu einem Alter von 20 Jahren konnte zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Alter und Skelettmasse$_{netto}$ im Zuge der Diskussion in Kapitel VI 2.3 sowohl für Männer als auch für Frauen jeweils ein lineares Regressions-Modell als Polynom 2. Grades formuliert werden. Im Vergleich zu ebenfalls formulierten Polynomen des 1., 3. und

4. Grades konnten die vorliegenden Daten dadurch ausreichend gut und gleichzeitig mit den geringsten Modellannahmen beschrieben werden (wobei durch jedes der 4 Modelle jeweils 96 % der beobachteten Variabilität der Skelettmasse auf den Einfluss des Alters zurückgeführt werden konnten). Auf diese Weise wird für das Skelettmasse-Wachstum neben einem linearen Anteil (Alter) auch eine Beschleunigung in Abhängigkeit vom zunehmenden Alter (Alter²) erfasst.

Ab einem Alter von 21 Jahren konnte bei den Männern, mehr noch als bei den Frauen, mit den Regressions-Modellen nur ein Trend aufgezeigt werden, welcher sich in den niedrigen Bestimmtheitsmaßen (R^2_{adj}) zu erkennen gibt: $R^2_{adj} < 14$ % für die Männer (Kap. VI 2.4.3, Tab. 69) bzw. $R^2_{adj} < 40$ % für die Frauen (Kap. VI 2.4.4, Tab. 70). Im Rahmen dieser Arbeit ist es jedoch wichtig, gerade diesen leichten altersabhängigen Trend zu erfassen.

Im Gegensatz zu den Individuen bis 20 Jahre konnte im Zuge der Diskussion in Kapitel VI 2.4 für Individuen ab einem Alter von 21 Jahren und für beide Geschlechter nur das Polynom 4. Grades bereits ausgeschlossen werden, da es nahezu identische Werte wie das Polynom 3. Grades lieferte. Eine weitere Einschränkung, welches von den drei verbleibenden Modellen am besten die Datensituation unter Berücksichtigung der aus der Literatur bekannten Erkenntnisse beschreibt, konnte jedoch auf Grundlage der eigenen Berechnungen noch nicht getroffen werden (Kap. VI 2.5). Um diese Entscheidung herbeizuführen, wurden daher je Lebensalter die Differenzen aus den mit Hilfe der Polynome des 1. bis 3. Grades berechneten Skelettmassen und die sich daraus ableitenden jährlichen relativen Änderungen der Skelettmasse berechnet und mit dem verbundenen Wilcoxon-Test für Wertepaare überprüft (Kap. VI 2.6).

In Abbildung 26 ist für Männer und Frauen vom 1. bis 84. Lj. (Männer) bzw. 85. Lj. (Frauen) die jährliche relative Änderung der Skelettmasse dargestellt, wie sich diese anhand der berechneten Polynome ergibt (vgl. Abb. 37 und 38 in Kap. VI 2.5):

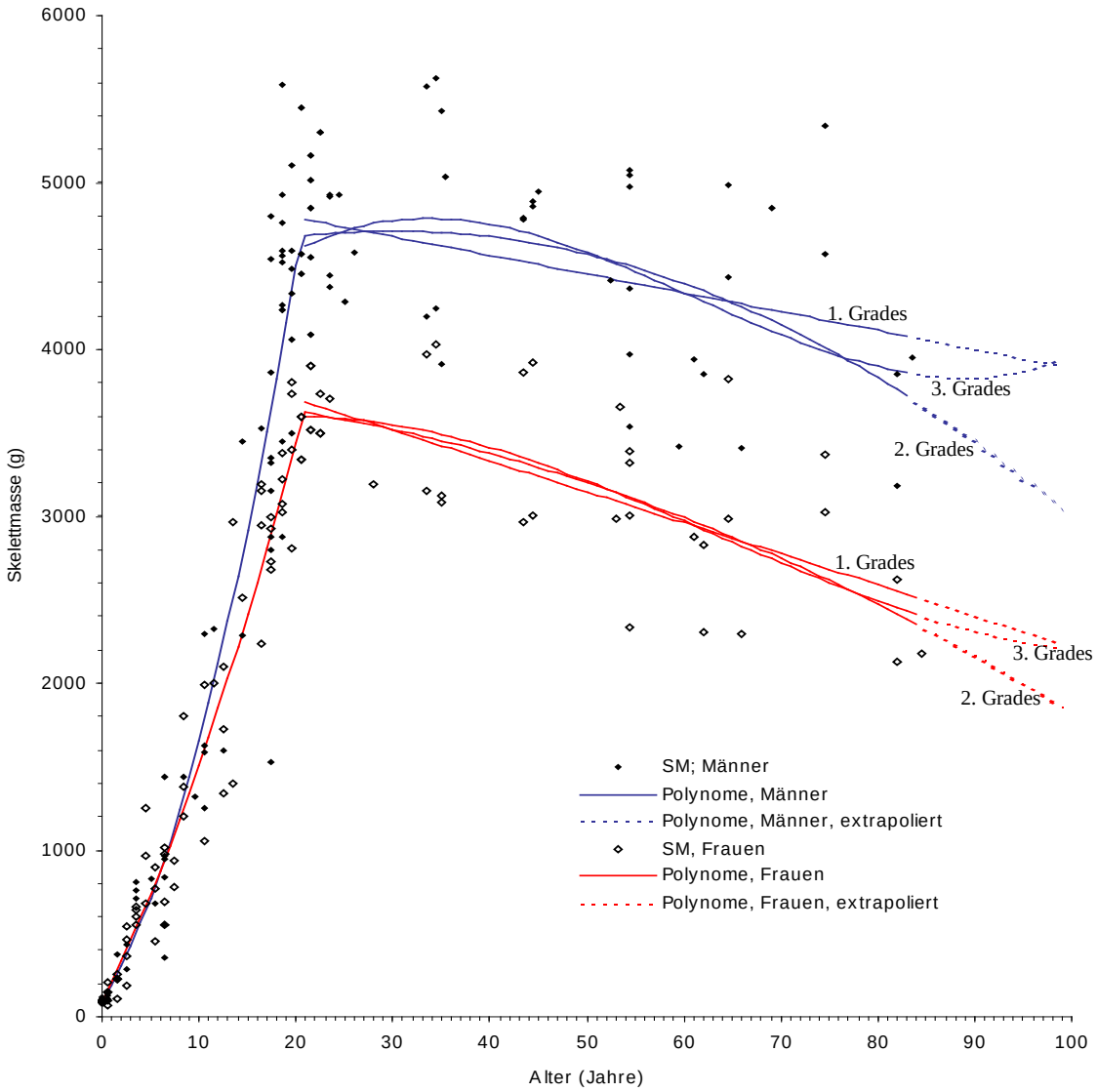


Abbildung 25: Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ von Männern und Frauen im Alter von 0 bis 99 Jahre im Vergleich zu den beobachteten Daten (Anhang 25 und 26 bis 19,5/22,5 Jahre, Anhang 33 bis 36 von 20,5 bis 83,5/84,5 Jahre bzw. extrapoliert bis 99 Jahre).

Skelettmasse bis 20 Jahre:
Männer, Polynom 2. Grades: = 92,37562 + 91,50506 x Alter + 6,43944 x Alter²
Frauen, Polynom 2. Grades: = 87,79401 + 116,73614 x Alter + 2,53409 x Alter²

Skelettmasse ab 21 Jahre:
Männer:
Polynom 1. Grades: = 5013,33334 – 11,23734 x Alter
Polynom 2. Grades: = 4386,82018 + 21,36010 x Alter – 0,35373 x Alter²
Polynom 3. Grades: = 3310,33348 + 100,65104 x Alter – 2,06817 x Alter² + 0,01127 x Alter³

Frauen:
Polynom 1. Grades: = 4071,03945 – 18,50233 x Alter
Polynom 2. Grades: = 3751,66896 – 2,75787 x Alter – 0,16502 xAlter²
Polynom 3. Grades: = 3288,96897 + 31,10570 x Alter – 0,88755 x Alter² + 0,00468 x Alter³

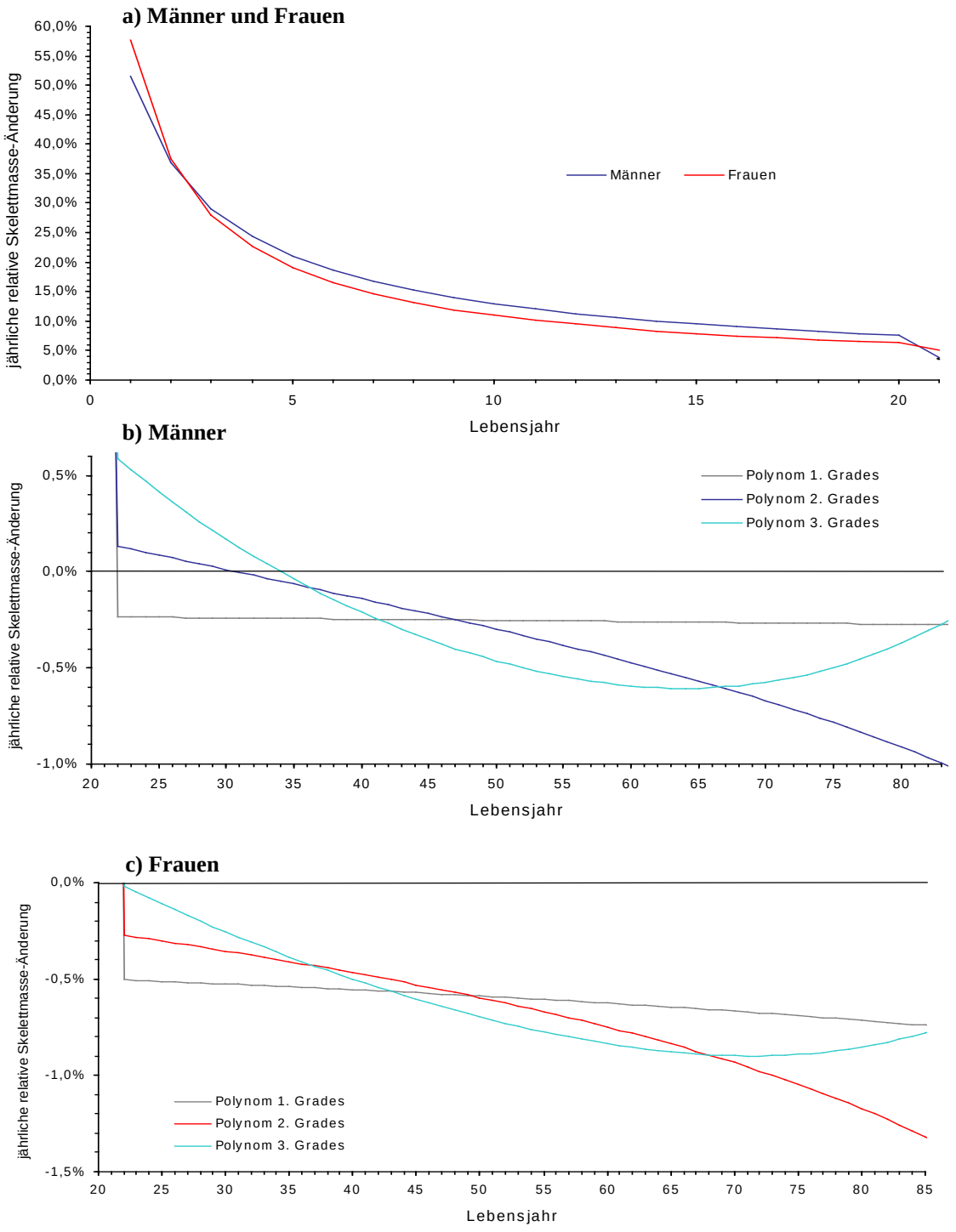


Abbildung 26: Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ für Männer und Frauen:

a) Männer und Frauen: vom 1. bis 21. Lj. (0 bis 20 Jahre)

b) Männer: vom 22. bis 84. Lj. (21 bis 83 Jahre)

c) Frauen: vom 22. bis 85. Lj. (21 bis 84 Jahre)

Die Kurven in Abbildung 26a leiten sich aus der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Individuen bis zum 21. Lj. ab, wie diese mit den Polynomen 2. Grades berechnet wurden. Sie erinnern an Prozesse, die wiederum häufig durch Exponential-Funktionen ($1-e^{x}$; x: Term z. B. in Abhängigkeit vom Alter) beschrieben werden können, ohne dass hier entsprechende Funktionen angepasst werden.

Frauen bauen danach bis zum 3. Lj. relativ mehr Skelettmasse auf als Männer und liegen ab dann niedriger als diese. Der abrupte Übergang von einer noch deutlich wachsenden zu einer geringfügig wachsenden (Männer, Abbildung 26 b) oder sogar schrumpfenden Skelettmasse (Frauen, Abbildung 26c) ab dem 21. Lj. ergibt sich aus der Zusammenführung der Regressions-Modelle zu den beiden Altersintervallen und ist damit zu einem unbekannten Anteil artifiziell (Anhang 33 für Männer, Anhang 34 für Frauen).

Die Kurven in Abbildung 26b und c zeigen ab dem 22. Lj. nur noch langsam wachsende (Männer bis zum 30. bzw. 34. Lj.) bzw. nur noch schrumpfende Gewebe vor (Männer ab dem 30. bzw. 34. Lj., Frauen ab dem 22. Lj.). Aus dem Polynom 1. Grades folgt bei den Männern eine annähernd konstante jährliche, relative Skelettmasse-Reduktion von 0,24 % im 22. Lj. zu 0,28 % im 84. Lj.. Dagegen nimmt der Abbau bei den Frauen deutlicher von 0,50 % im 22. Lj. zu 0,74 % im 85. Lj. zu. Diese lineare Skelettmasse-Reduktion lässt sich jedoch bei den Männern und mehr noch bei den Frauen mit Angaben aus der Literatur am wenigsten in Übereinkunft bringen. Die mit Hilfe der Polynome 2. Grades berechneten Werte unterscheiden sich von den mit Hilfe der Polynome 3. Grades berechneten Werte wenig und eher zufällig voneinander (Kap. VI 3.2). In Zusammenfassung und unter Berücksichtigung:

- Der in Kapitel VI 2.4 durchgeführten Berechnungen für Individuen ab einem Alter von 21 Jahren (R^2_{adj}, p-Werte für Test auf Heteroskedastizität, p-Werte für Einflussgrößen: Tab. 69 und 70 in Kap. VI 2.4),
- Der geführten Diskussion zum Vergleich dieser eigenen Ergebnisse mit Literaturangaben (Kap. VI 2.5) sowie
- Der Beurteilung der Unterschiede zwischen den drei Regressions-Modellen anhand von Wertepaar-Differenzen (Kap. VI 2.6)

wird entschieden, dass zur Beschreibung der jährlichen relativen Skelettmasse-Änderung ΔSM auch für Individuen ab einem Alter von 20 Jahren die Polynome 2. Grades ausreichen und diese evtl. auch zur Extrapolation von Werten bis zu einem Alter von 99 Jahren eingesetzt werden.

Die Erzeugung von Werten durch Extrapolation der Gleichungen über ein Alter von 84 bzw. 85 Jahre hinaus stellt mit Sicherheit ein Problem dar, da damit eine Entwicklung fortgeschrieben wird, ohne dass Beobachtungen vorliegen. Damit wird ein weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt, der Folgeprojekten vorbehalten ist.

Im Ergebnis liegt die Beschreibung einer *durchschnittlichen* jährlichen relativen Änderung der $Skelettmasse_{netto}$ vor, die jedoch nicht mit dem 50. Perzentil von Normwerttabellen verwechselt werden darf. Die Ergebnisse aus den Berechnungen finden sich im Anhang 35 für die Männer bzw. Anhang 36 für die Frauen.

Entsprechend der relativen Skelettmasse-Änderung wird Kohlenstoff und damit auch ^{14}C in den Knochen aufgenommen. Über die Lebensspanne entsteht somit ein „Konzentrations-Gemisch“ unterschiedlich „alten“ Radiocarbons im Gewebe. Im Hinblick auf das zu entwickelnde Modell FoRCaDa wird hier bereits festgehalten, dass auf die Berechnung der ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen die relative Skelettmasse-Änderung in quasi stabilen Geweben kaum und in schrumpfenden Geweben keinen einen Einfluss nimmt:

Als quasi-stabil kann ein Gewebe angesehen werden, wenn die Änderung der Skelettmasse zwischen zwei aufeinanderfolgenden Jahren höchstens etwa 1,0 % beträgt. Entsprechende Werte werden nur bei den Männern vom 22. bis 31. Lj. beobachtet. In diesen 10 Jahren werden im gesamten Skelett noch etwa 30 g aufgebaut (Anhang 35; Skelettmasse im 22. Lj.: 4679,4 g; Skelettmasse im 31. Lj.: 4709,3 g).

Schrumpfende Gewebe ($\Delta SM < 0$ bzw. $< 0\%$) liegen bei den Frauen ab dem 21. Lj. bzw. bei den Männern ab dem 31. Lj. nach den Berechnungen mit den Polynomen 2. Grades vor. Ab diesem Alter wird die jährliche relative Skelettmasse-Änderung nicht mehr im Modell FoRCaDa berücksichtigt, da bei gesunden Individuen ein Zugriff auf extraindividuelles Radiocarbon auch während wachstumsähnlicher Prozesse nicht mehr erfolgt (Kap. IV 3.4.1 Formel 17).

V 3 Entwicklung, Überprüfung und Beurteilung des Modells FoRCaDa

V 3.1 Einführung

In Kapitel IV 3.4.1 ist der Algorithmus für das Modell FoRCaDa zur Berechnung von ^{14}C-Konzentrationen im Knochenkollagen dargelegt. In dieses Modell gehen ein:

- Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ ΔSM,
- Die jährliche Austauschrate $1/t_C$ und
- Die in jedem Lebensjahr eines Individuums in der Atmosphäre vorliegende ^{14}C-Konzentration.

Die Umsetzung des Algorithmus erfolgt in SAS® (Version 8.2 für PC). Die Berechnungen werden getrennt für Männer und Frauen mit einem Sterbealter bis zu 99 Jahren und Geburtsjahren zwischen 1865 und 2028 sowie 24 verschiedenen Austauschraten zwischen 1 und 66 % durchgeführt. Im Ergebnis entstehen für beide Geschlechter je 24 Dateien. Aus diesen Dateien werden die Vergleichswerte zur Interpretation gemessener ^{14}C-Werte entsprechend des Geburtsjahres und des erreichten Lebensjahres eines Individuums entnommen. Ein Überblick über diese Ergebnisse erfolgt in Kapitel V 3.2.

In einem nächsten Schritt werden die berechneten und gemessenen ^{14}C-Werte verglichen. Für maximal 74 Messwerte von insgesamt 66 Individuen ist dieser Vergleich möglich und wird in Kapitel VI 3.2 ausführlich diskutiert. Im Zuge dieser Diskussion wird deutlich, dass sich alle gemessenen ^{14}C-Messwerte unter Verwendung von Austauschraten bis zu max. 7 % berechnen lassen (Ausnahme ID 49, 77, 83). Unter Verwendung von 13 Raten wird nachfolgend für jeden der 74 Messwerte der berechnete ^{14}C-Wert beibehalten, für den sich der kleinste Betrag für die Differenz aus gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert ergibt. In Kapitel V 3.3 wird die Übereinstimmung von gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert mit Hilfe von drei linearen Regressions-Modellen überprüft. In diese Modelle geht als unabhängige oder Einflussgröße der berechnete und als abhängige oder Zielgröße der gemessene ^{14}C-Wert ein. In Kapitel V 3.4 werden Schlussfolgerungen anhand der Ergebnisse in Kapitel V 3.2 und V 3.3 und im Hinblick auf die Liegezeitbestimmung von Skelettfunden getroffen (Kap. V 3.5).

In der Literatur zur Datierung von rezenten humanen Geweben mit Hilfe von ^{14}C wird zwar die Güte der eigenen Methode oft abschließend anhand entsprechender Ergebnisse

beurteilt. Dies ist jedoch unzureichend und führt regelmäßig zu einer Überschätzung der Modellvorstellungen. Vielmehr muss sich die Methode in einem Umkehrschluss bewähren: Von dem gemessenen ^{14}C-Wert wird zuzüglich eines Toleranzbereiches auf den berechneten ^{14}C-Wert geschlossen. Um diesen Vergleich sinnvoll durchführen zu können, müssen Annahmen zum Sterbealter und Geburtsjahr des Donors getroffen werden. Dies stellt in der forensischen Routine bei mehr oder weniger fragmentierten Skelettfunden regelhaft ein Problem dar. Vielmehr kann das Sterbealter und damit einhergehend das Geburtsjahr nur in bestimmten Bereichen geschätzt werden. Somit handelt es sich nicht um eine einfache Umkehrregression, sondern diese wird um eine Suche in bestimmten vorgewählten Intervallen erweitert. Im Kapitel V 3.5 werden die Ergebnisse für einige Beispiele (n = 22) im Sinn einer Kasuistik vorgestellt und in Kapitel VI 3.2 diskutiert.

V 3.2 Die berechneten ^{14}C-Werte für Männer und Frauen mit einem Geburtsjahr ab 1865 und bis zum 99. Lebensjahr

Mit dem in SAS® umgesetzten Algorithmus für das Modell FoRCaDa können für Männer und Frauen bis zum 99 Lj. und Geburtsjahren zwischen 1865 und 2028 ^{14}C-Werte für das Knochenkollagen berechnet werden. In Abhängigkeit von der vorgewählten Austauschrate zwischen 1 und 66 % entstehen für beide Geschlechter jeweils 24 Dateien. Tabelle 36 enthält als Beispiel einen Auszug aus der Datei zf200.xls, welche die berechneten ^{14}C-Werte für Frauen bei einer angenommenen Austauschrate von 2 % enthalten.

Aus dem Vergleich der Dateien wird erkennbar: Erst nach dem 5. Lj. ergeben sich unterschiedliche ^{14}C-Werte bei Austauschraten von höchstens 10 %. Mit zunehmendem Lebensjahr nimmt das im Knochenkollagen erreichbare Maximum von ^{14}C ab. Dagegen lassen sich mit zunehmendem Alter auch nach 1950 noch ^{14}C-Werte < 100 pMC berechnen. In den Abbildungen 27 und 28 sind beispielhaft für Frauen mit 5, 10, 20, 40, 60 bzw. 80 Lj. sowie für Austauschraten von 2, 4, 6, 10 und 50 % die berechneten ^{14}C-Werte dargestellt. Zu beachten ist, dass die Werte in Abhängigkeit vom Geburtsjahr abgetragen wurden. Das Sterbejahr und damit das Jahr, in dem dieser Wert gemessen wird, erhält man, wenn dem Geburtsjahr das erreichte Lebensjahr hinzugerechnet wird.

Tabelle 36: Auszug aus einer Ausgabedatei des Modells FoRCaDa zur Berechnung der ^{14}C-Konzentrationen im Knochenkollagen (Frauen, Austauschrate 2,0 %).

gj	sex	c14_0	c14_1	c14_2	c14_5	c14_10	c14_20	c14_30	c14_40	c14_60	c14_80	c14_90
1865	f	99,7	99,7	99,6	99,6	99,5	99,5	99,5	99,5	99,4	98,9	98,7
1866	f	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,3	98,9	98,7
1867	f	99,6	99,6	99,6	99,5	99,4	99,5	99,5	99,5	99,3	98,9	98,8
1868	f	99,6	99,6	99,6	99,5	99,4	99,5	99,5	99,5	99,3	98,8	98,9
1925	f	98,7	98,7	98,5	98,4	98,3	98,0	97,9	103,6	115,8	114,3	112,4
1926	f	98,2	98,2	98,3	98,3	98,2	98,0	97,9	105,0	115,8	114,1	112,2
1927	f	98,5	98,5	98,4	98,3	98,3	98,0	98,0	106,3	115,9	113,9	112,0
1928	f	98,3	98,3	98,2	98,2	98,2	97,9	98,1	107,4	115,9	113,7	111,8
1929	f	98,1	98,1	98,2	98,1	98,2	97,9	98,4	108,3	115,9	113,5	111,6
1930	f	98,4	98,4	98,4	98,2	98,2	97,8	98,8	109,2	115,9	113,3	111,4
1950	f	97,3	97,3	97,3	97,4	104,0	137,9	138,9	135,6	126,4	118,3	
1951	f	97,3	97,3	97,3	97,9	106,6	140,2	140,0	136,3	126,8		
1952	f	97,3	97,3	97,4	99,0	109,2	142,1	140,9	136,8	126,9		
1953	f	97,5	97,5	97,5	100,6	113,4	143,5	141,4	137,0	126,9		
1954	f	97,6	97,6	98,5	103,2	121,7	144,5	141,8	137,1	126,8		
1955	f	100,0	100,0	101,0	108,3	131,2	145,3	141,9	137,1	126,6		
1962	f	136,2	136,2	149,7	164,7	159,2	143,0	137,7	132,7	122,9		
1963	f	171,1	171,1	175,9	171,7	160,5	142,1	136,8	131,7	122,3		
1964	f	183,5	183,5	180,4	170,0	158,1	140,0	134,9	130,1	121,1		
1965	f	175,5	175,5	173,0	164,1	153,9	137,3	132,6	128,1	119,7		
1966	f	169,1	169,1	166,5	159,6	150,1	134,9	130,5	126,3	118,4		
1990	f	114,9	114,9	114,5	113,4	111,2	107,5	106,4	105,5			
1991	f	113,8	113,8	113,6	112,6	110,5	107,0	106,0				
1992	f	113,4	113,4	113,1	112,0	109,9	106,5	105,6				
2002	f	106,6	106,6	106,4	105,6	104,7	103,2					
2003	f	106,1	106,1	105,9	105,2	104,4	103,0					
2004	f	105,5	105,5	105,3	104,8	104,1	102,8					
2005	f	105,0	105,0	104,9	104,5	103,8	102,6					
2006	f	104,8	104,8	104,7	104,3	103,5	102,4					

Auszug aus Datei zf200.xls:
- „z“ für zusammengeführte Datei;
- „f“ für weiblich (alternativ „m“ für männlich);
- „200“ für Austauschrate 2,0 % (Austauschrate x 100);
- „xls“ für Excel-Datei (alternativ „sas7bdat“ für SAS-Dataset).

gj: Geburtsjahr
sex: Geschlecht (f für weiblich, zur Kontrolle mitgeführt, alternativ m für männlich)
c14_0: ^{14}C-Konzentration im Geburtsjahr (zur Kontrolle mitgeführt)
c14_1: ^{14}C-Konzentration im 1. Lebenjahr (entspricht dem ^{14}C-Wert des Geburtsjahres)
c14_2, c14_5 .... ^{14}C-Konzentration im 2. Lebenjahr, im 5. Lebensjahr ... etc.

Berechnung des Sterbejahres: Geburtsjahr zuzüglich der im Spaltenkopf codierten Lebensjahre minus 1 Jahr.

1. Beispiel (grau hinterlegt): Für eine Frau, die 1963 geboren wurde und mit 40 Jahren verstorben ist, ergibt sich im Sterbjahr (2002) eine ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen von 131,7 pMC, wenn wie in dieser Tabelle neben der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ eine über die gesamte Lebensspanne konstante jährliche Austauschrate von 2,0 % berücksichtigt wurde.

2. Beispiel (Pfeile): Für eine 1930 geborene und im Alter von 30 Jahren verstorbene Frau (Sterbejahr 1959) ergibt sich, ebenso wie für eine 1867 geborene und 1956 verstorbene 90jährige Frau eine ^{14}C-Konzentration im Kollagen von „nur“ 98,8 pMC.

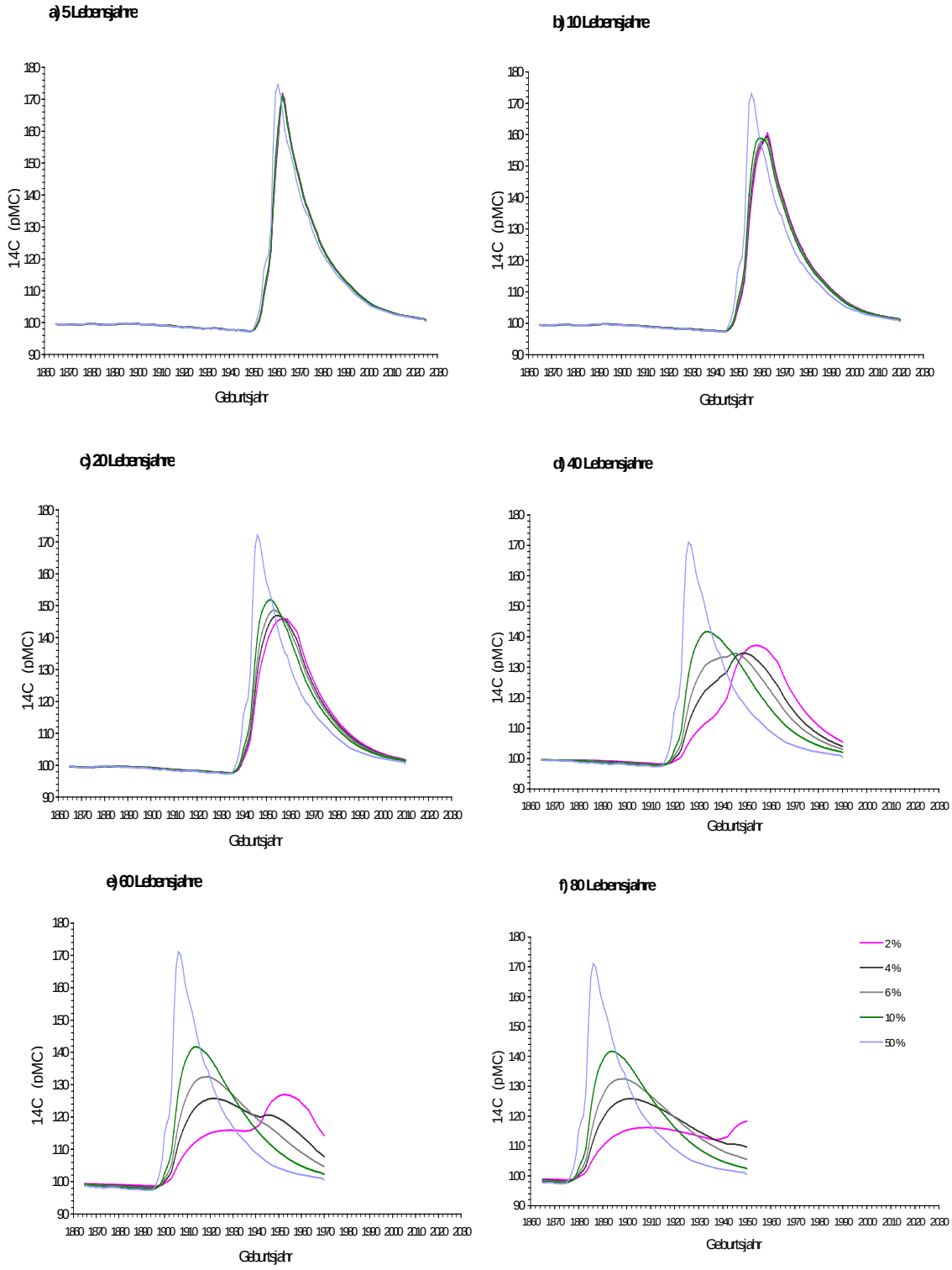


Abbildung 27: Berechnete ^{14}C-Werte im Knochenkollagen für Frauen zwischen dem 5. und 80. Lj. in Abhängigkeit von einer jährlichen Austauschrate zwischen 2 und 50 %.
Das Jahr, indem der berechnete ^{14}C-Wert vorliegt (Sterbejahr) ergibt sich nach Formel 11b (Kap. IV 3.1) als Sterbjahr = Geburtsjahr + Lebensjahre - 1.

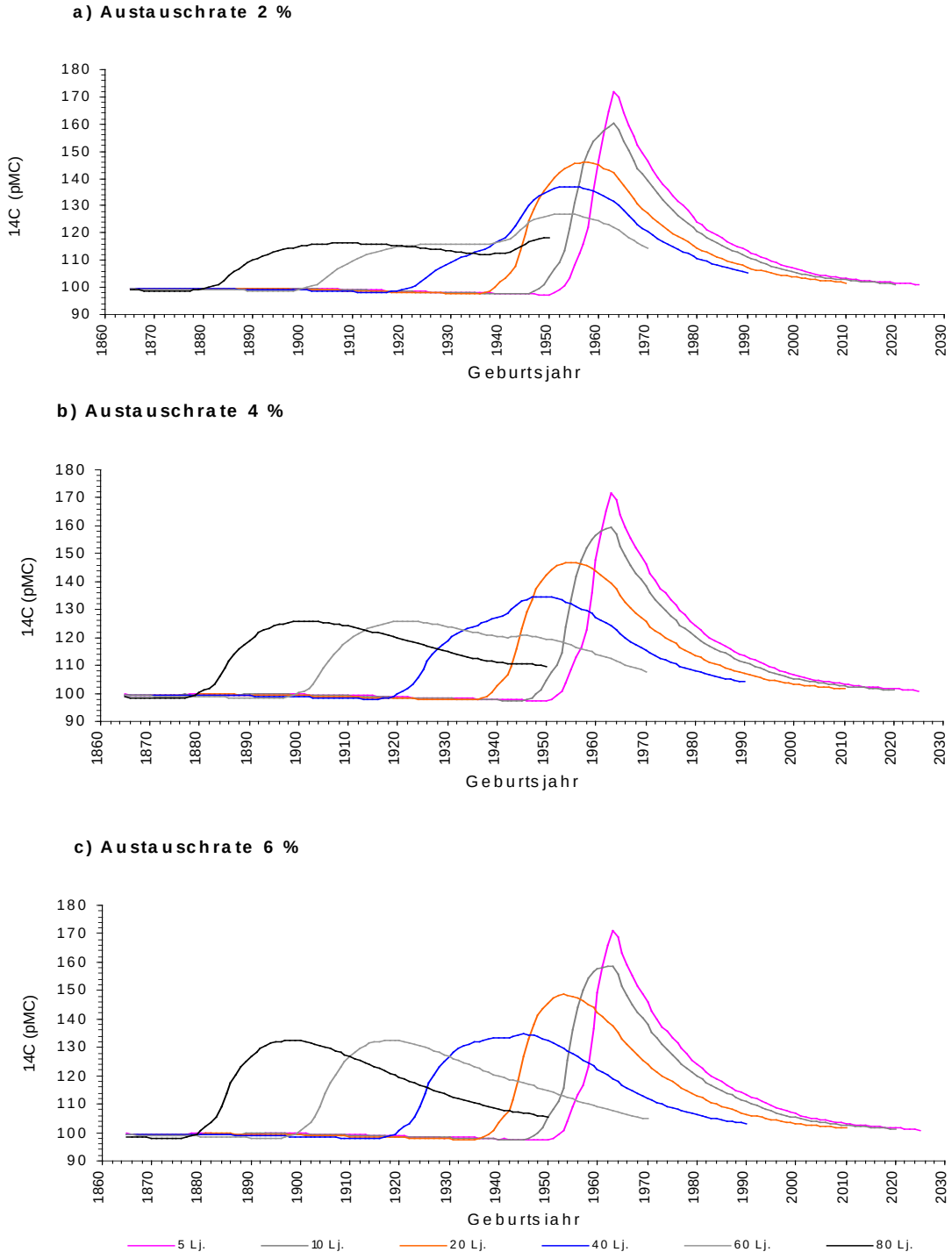


Abbildung 28: Berechnete ^{14}C-Werte im Knochenkollagen für Frauen bei einer jährlichen Austauschrate zwischen 2 und 50 % in Abhängigkeit vom erreichten Sterbealter zwischen dem 5. und 80. Lj..
Das Jahr, indem der berechnete ^{14}C-Wert vorliegt (Sterbejahr) ergibt sich nach Formel 11b (Kap. IV 3.1) als Sterbjahr = Geburtsjahr + Lebensjahre - 1.

V 3.3 Vergleich von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten

V 3.3.1 Einschränkung der vorgewählten Austauschraten

Ziel der geführten Diskussion in Kapitel VI 3.2 ist es, die zur Berechnung von ^{14}C-Werten vorgewählten 24 Austauschraten zwischen 1 und 66 % schrittweise einzugrenzen. Die dabei getroffenen Entscheidungen beruhen auf dem Vergleich von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten. Als ausreichende Übereinstimmung beider ^{14}C-Werte wird angesehen, wenn sich ein berechneter ^{14}C-Wert ergibt, der höchstens 4 Standardabweichungen (± 4 s) vom gemessenen ^{14}C-Wert ($^{14}C_{gemessen}$) abweicht. Denn in dem Intervall von $^{14}C_{gemessen}$ ± 4 s sollte sich der wahre ^{14}C-Wert zu 99,9 % befinden, wenn keine systematischen Fehler vorliegen (Kap. IV 3.2). Damit wird durch das Modell FoRCaDa die Präzision eingehalten, die durch die Messmethode für Radiocarbon vorgegebenen ist. Folgende Zwischenergebnisse lassen sich dabei festhalten:

- Für die prämoderne Probe ID 1 lässt sich eine Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert für alle Austauschraten zwischen 1 und 66 % nachweisen. Dies unterstützt den qualitativ unterschiedlichen Charakter zwischen der klassischen ^{14}C-Methode und dem Modell FoRCaDa
- Nur für drei Männer (ID 49, 83, 77: 4 % der Proben und 5 % der Individuen) lässt sich keine ausreichende Übereinstimmung von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten erzielen
- In der Stichprobe fehlen Proben von Kindern unter 9 Jahren. Es lässt sich daher nicht überprüfen, ob es im Kindes- und Jugendalter zu einem (exponentiellen) Abfall hoher Austauschraten auf die im Erwachsenenalter vorliegenden Werte kommt. Im Kindesalter wird der Stoffwechsel zwar von aufbauenden Prozessen deutlich dominiert, dennoch ergeben sich für ID 99 indirekte Hinweise darauf. Das Modell FoRCaDa sollte daher nur unter Vorbehalt zur Interpretation von gemessenen ^{14}C-Werten im Knochenkollagen von Kindern zwischen dem 2. bis 9. Lj. herangezogen werden
- Es lässt sich mit zunehmendem Lebensjahr des Donors eine Verkleinerung des Bereiches feststellen, in dem für eine Probe eine ausreichende Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert bei unterschiedlichen Austauschraten vorliegt. In dieser von Männern dominierten Materialsammlung lässt sich eine deutliche Reduktion dieses Bereiches nach dem 25. Lj. mit gleichzeitiger Zunahme der interindividuellen Variabilität erkennen. Dabei handelt es sich um den Lebensabschnitt, in dem sich bei den Männern eine quasi-stabile Skelettmasse einstellt (Kap. VI 2.4, VI 2.5, V 2.2):
  - Bis zum 25. Lj. zeigen mindestens 12 (75 %) der verfügbaren 16 Proben eine ausreichende Übereinstimmung bei Austauschraten zwischen 5 und 10 % und
  - Ab dem 25. Lj. zeigen (ohne ID 49, 83, 77) nur noch etwa 25 % der Proben (mit ID 1, 52, 53: 14 von 55 Proben; ohne ID 1, 52, 53: 13 von 52 Proben) eine ausreichende Übereinstimmung für Austauschraten zwischen 1,0 und 4,5 %

- Es lassen sich für zwei sicher an Osteoporose erkrankte Frauen (ID 52, 53) höhere Stoffwechselaktivitäten erkennen und es gibt Hinweise auf einen gesteigerten Stoffwechsel bei Spongiosa- im Vergleich zu den Kompakta-Proben für den gleichen Donor. Der Einfluss der Skelettregion (kranial vs. postkranial) und des Gewebealters lässt sich nur als schwache Tendenz erkennen.

- Da sich gleichzeitig für 71 der 74 (96 %) Proben bzw. für 63 der 66 (95 %) Individuen der gemessene ^{14}C-Wert mit mindestens einer Austauschrate zwischen 1 und 7 % ausreichend genau berechnen lässt, wird eine erste Einschränkung der vorgewählten Austauschraten auf diesen Bereich vorgenommen.

Nachfolgend wird geprüft, ob eine weitere Einschränkung der Austauschraten im Bereich zwischen 1 und 7 % möglich ist. Dazu werden für die gesamte Stichprobe und getrennt nach beiden Geschlechtern insgesamt 39 einfache lineare Regressions-Modelle berechnet. In Tabelle 37 sind die Ergebnisse zusammengestellt (R^2_{adj}, p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität). In den Regressions-Modellen wird als unabhängiger Parameter der berechnete ^{14}C-Wert und als abhängiger Parameter der gemessene ^{14}C-Wert berücksichtigt. Es wird nicht unterschieden, ob sich der berechnete ^{14}C-Wert im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s befindet oder nicht. Die Deskription findet sich im Anhang 37 und enthält für jede Austauschrate zwischen 1 und 7 % die berechneten ^{14}C-Werte, die sich für jede Probe ergebende Differenz zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert sowie die Anzahl von Proben, bei denen sich der berechnete ^{14}C-Wert im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s befindet. Da sich die Ergebnisse für die Gesamtstichprobe und für die Stichprobe der Männer entsprechen, sind erstere nur wegen der Vollständigkeit hier dargestellt.

Tabelle 37: Zusammenstellung der linearen Bestimmtheitsmaße R^2_{adj} und der p-Werte für den Test auf Heteroskedastizität für 39 einfache lineare Regessions-Modelle der Form: $^{14}C_{gemessen} = \beta_1 \times {}^{14}C_{berechnet} + \beta_0$.

$^{14}C_{berechnet}$ für eine Austauschrate $1/t_C$ von	Gesamt: 74 Proben, 66 Individuen		Männer: 53 Proben, 48 Individuen		Frauen: 21 Proben, 18 Individuen	
	R^2_{adj}	p-Wert Test auf Heteroskedastizität	R^2_{adj}	p-Wert Test auf Heteroskedastizität	R^2_{adj}	p-Wert Test auf Heteroskedastizität
1,0 %	0,6611	0,9051	0,7366	0,2342	0,2676	0,1466
1,5 %	0,6779	0,7556	0,7521	0,1309	0,3151	0,1416
2,0 %	0,6853	0,4904	0,7569	0,1201	0,3577	0,1564
2,5 %	0,6823	0,3075	0,7487	0,1448	0,3940	0,2003
3,0 %	0,6672	0,2187	0,7252	0,2847	0,4227	0,2102
3,5 %	0,6384	0,1493	0,6842	0,3963	0,4420	0,1649
4,0 %	0,5946	0,0874	0,6247	0,2673	0,4499	0,2460
4,5 %	0,5355	0,0459	0,5475	0,2171	0,4448	0,3725
5,0 %	0,4630	0,0245	0,4565	0,1104	0,4259	0,4704
5,5 %	0,3813	0,0268	0,3588	0,0195	0,3941	0,4932
6,0 %	0,2969	0,0541	0,2632	0,0541	0,3519	0,4774
6,5 %	0,2168	0,0909	0,1777	0,0927	0,3031	0,4660
7,0 %	0,1469	0,1134	0,1078	0,1038	0,2521	0,4723

Für die 53 Proben von 48 Männern wird im Median ein ^{14}C-Wert von 119,0 pMC mit einer Spannweite von 105,5 bis 151,0 pMC gemessen. Die Messwerte werden unter Verwendung von Austauschraten von 1,0 und 1,5 % im Median unterschätzt ($^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} > 0$) und für Austauschraten ab 2,0 % überschätzt ($^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} < 0$). Die besten Regressions-Modelle mit jeweils einem $R^2_{adj} > 70$ % werden für Austauschraten bis zu 3,0 % berechnet. Für diese Austauschraten ergeben sich zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert mediane Abweichungen von 4,16 bis -2,73 pMC. Für 16 (30 %) bis 26 (49 %) der 53 Proben ergeben sich ausreichend gute Übereinstimmungen zwischen beiden ^{14}C-Werten (absolute Differenz $\leq$ 4 s). Die schlechtesten Modell-Anpassungen liegen für Austauschraten ab 5,5 % vor: Entweder sind die Modellvoraussetzungen verletzt (p-Wert für Test auf Heteroskedastizität < 2 %) oder es wird ein $R^2_{adj} < 30$ % berechnet.

Für die 21 Proben von 18 Frauen wird im Median ein ^{14}C-Wert von 118,4 pMC mit einer Spannweite von 99,2 bis 132,8 pMC gemessen. Für Austauschraten bis 3,0 % werden die Messwerte unterschätzt und für Austauschraten ab 4,0 % überschätzt. Die besten Regressions-Modelle ergeben sich bei den Frauen mit jeweils einem $R^2_{adj} > 40$ % für Austauschraten zwischen 3,0 und 5,0 %. Für diese Raten ergibt sich bei 7 (33 %) bis 10 (48 %) der 21 Proben eine ausreichend gute Übereinstimmung zwischen beiden ^{14}C-Werten. Damit zeigt sich auch unter Verwendung des Modells FoRCaDa für Frauen eine über die gesamte Lebensspanne hinweg etwas höhere durchschnittliche Stoffwechselaktivität, wie diese wiederholt in der Literatur diskutiert wurde (Kap. II 5.5, VI 2.5). Gleichzeitig erscheint die interindividuelle Variabilität bei den Frauen höher als bei den Männern (R^2_{adj} für Frauen ist kleiner als für Männer). Für die beiden Austauschraten von 1 bzw. 7 % werden die niedrigsten Werte für R^2_{adj} mit < 30 % berechnet.

In Zusammenfassung der vorliegenden Ergebnisse ist es nicht sinnvoll, sich zur Berechnung von ^{14}C-Werten auf eine Austauschrate im Modell FoRCaDa einzuschränken. Dagegen sprechen die sich zwischen den Geschlechtern andeutenden Unterschiede, eine mit den Lebensjahren einhergehende Reduktion der Austauschraten bei gleichzeitiger Zunahme der interindiviuellen Variabilität und die insgesamt nicht genügenden Modellanpassungen für jede einzelne Austauschrate zwischen 1 und 6 bzw. 7 % mit maximal einem R^2_{adj} von 70 %. Vielmehr gilt es diese Variabilität ausreichend zu berücksichtigen. Es wird daher unter Beachtung der in Tabelle 37 dargestellten Ergebnisse entschieden, für jede Probe den berechneten ^{14}C-Wert für Austauschraten bis zu 6 % zum Vergleich mit dem gemessenen ^{14}C heranzuziehen, für den die absolute Differenz zwischen diesen beiden Werten am kleinsten ist.

V 3.3.2 Überprüfung des Modells FoRCaDa mit linearen Regressionsmodellen

In diesem Abschnitt wird die Übereinstimmung von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten geprüft, wenn Austauschraten zwischen 1 und 6 % im Modell FoRCaDa hinterlegt werden. Für jede der 74 Proben stehen somit 11 berechnete ^{14}C-Werte zur Auswahl und es wird derjenige für die nachfolgenden Vergleiche beibehalten, für den sich die kleinste absolute Differenz zwischen berechnetem und gemessenen ^{14}C-Wert ergibt (Kap. IV 3.4.2). Es wird auf diese Weise im Einzelfall nicht zwischen einer Unter- oder Überschätzung unterschieden. Es wird vermerkt, ob sich der berechnete Wert innerhalb des Intervalls von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s befindet oder nicht. Für nur drei Proben von Männern (ID 49, 83 und 77) ergab sich dabei für keine Austauschrate eine ausreichende Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenem ^{14}C-Werten (Kap. VI 3.2.1, V 3.4.3, V 3.4.4). Für den Vergleich beider ^{14}C-Werte werden zwei einfache, lineare Regressions-Modelle jeweils getrennt für beide Geschlechter und für die gesamte Stichprobe sowie mit und ohne ID 49, 83 und 77 berechnet. In allen Modellen wird als unabhängiger Parameter der berechnete und als abhängiger Parameter der gemessene ^{14}C-Wert berücksichtigt. Die Deskription ist in Tabelle 38 (Modell 1) und Tabelle 39 (Modell 2) enthalten. Die Ergebnisse für die Regressionen (R^2_{adj}, p-Wert für Test auf Heteroskedastizität, Regressionsgleichungen) sind in Tabelle 40 für beide Modelle zusammengestellt. Da der Ausschluss nur die Stichprobe der Männer betrifft, liegen für Modell 1a und 1b bzw. Modell 2a und 2b bei den Frauen identische Ergebnisse vor. Die Ergebnisse für die gesamte Stichprobe entsprechen wegen der Dominanz von männlichen Spendern deren Ergebnisse. Sie werden hier vorallem für den Vergleich für Modell 2a mit den Ergebnissen in Kapitel V 1.2.3 mitgeführt.

Die erste Regression wird unter Einschluss aller 74 Proben (Modell 1a) bzw. nach Ausschluss von ID 49, 83 und 77 für 71 Proben (Modell 1b) gerechnet. Es kommt im Median bei den Männern, Frauen und in der gesamten Stichprobe jeweils zu einer leichten Überschätzung der gemessenen ^{14}C-Werte ($^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ zwischen -0,05 und -0,02 pMC) bzw. liegt eine im Median geringe absolute Abweichung von $\leq$ 0,73 pMC vor ($|{}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}|$). Die absolute Differenz beträgt im Median höchstens 0,64 % vom gemessenen ^{14}C-Wert ($100 \times |{}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}| / {}^{14}C_{gemessen}$). Der berechnete ^{14}C-Wert liegt im Median somit annähernd in dem Intervall, welches durch die einfache Standardabweichung um $^{14}C_{gemessen}$ gebildet wird ($|{}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}| / s \leq 1{,}02$). Bei den Männern werden zuerst Abweichungen bis zu 12,4 Standardabweichungen zwischen

berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert beobachtet. Diese sind auf die hohen absoluten Abweichungen bis zu 13,7 pMC für die drei Individuen ID 49, 83 und 77 zurückzuführen. Nach Ausschluss dieser drei Proben werden auch hier maximal Abweichungen bis zu 4 Standardabweichungen zwischen beiden ^{14}C-Werten beobachtet und der Median liegt ebenfalls bei einer Standardabweichung.

Für die 53 Proben von 48 Männern ergibt sich in Modell 1a eine Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten mit einem R^2_{adj} von 95 % im Vergleich zu den 21 Proben von 18 Frauen mit einem R^2_{adj} von 99 %. Nach Ausschluss von ID 49, 83 und 77 erhöht sich R^2_{adj} für die 50 Proben von 45 Männern in Modell 1b auf 98 %.

Zur Berechnung der Regressions-Modelle 2 wird auf einen Datensatz zurückgegriffen, aus dem die prämoderne Probe ID 1, alle Mehrfachmessungen für ein Individuum (ID 38, 40, 42, 44, 46, 48, 94, 95), Proben die nicht vom postkranialen Skelett entnommen wurden (ID 50, 51, 63, 64) und Proben mit gesicherten Pathologien (ID 50, 52, 53) ausgeschlossen sind. Es liegen damit 59 Proben von 59 Individuen vor. Dieser Datensatz entspricht somit der in Kapitel V 1.2.3 zur Beurteilung von Einflussgrößen auf die gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen verwendeten Stichprobe. Wie Tabelle 39 (Deskription) sowie Tabelle 40 (Regressions-Modelle) zu entnehmen ist, kommt es dadurch zu keinen wesentlichen Veränderungen der vorgenannten Aussagen:

Für die 45 Männer in Modell 2a ergibt sich im Median eine leichte Unterschätzung der gemessenen ^{14}C-Werte ($^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)} = 0{,}03$ pMC). Für die 14 Frauen bzw. die 42 Männer in Modell 2b ist eine leichte Überschätzung mit -0,28 pMC zu beobachten. Für die mediane absolute Abweichung ergeben sich Werte von höchstens 0,81 pMC ($|{}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}|$). Die absolute Differenz des berechneten vom gemessenen ^{14}C-Wert beträgt im Median weiterhin höchstens 0,65 %. Bei den 45 Männern liegt der berechnete ^{14}C-Wert bis zu 12,4 Standardabweichungen vom gemessenen ^{14}C-Wert entfernt. Nach Ausschluss von ID 49, 83 und 77 in Modell 2b reduziert sich der Abstand auf maximal 4 Standardabweichungen. Damit liegt der berechnete ^{14}C-Wert wie bei den Frauen im Median etwa eine Standardabweichung vom gemessenen ^{14}C-Wert entfernt ($|{}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}| / s \leq 1{,}07$). Durch den Ausschluss der drei Proben verbessert sich auch die Anpassung des Regressionsmodells. Ergibt sich für die 45 Männer in Modell 2a ein R^2_{adj} von 95 %, erhöht sich dieses nach dem Ausschluss von ID 49, 83 und 77 für die 42 Männer im Modell 2b auf 98 % und entspricht damit dem Wert bei den 14 Frauen mit 98 %.

Für die gesamte Stichprobe in Modell 2a ergibt sich eine im Vergleich zu Tabelle 31 (Kap. V 1.2.3) deutliche Verbesserung für R^2_{adj} von 40 % auf 95 % und unterstützt damit den hier gewählten Ansatz.

Tabelle 38: Deskription für die in den Regressions-Modellen 1a und 1b eingeschlossenen Proben:

Modell 1a) 74 Proben von 66 Individuen (Kap. IV 1.2 und Kap. V 1.2.2) mit ID 49, 83 und 77

Modell 1b) 71 Proben von 63 Individuen (Kap. IV 1.2 und Kap. V 1.2.2) ohne ID 49, 83 und 77.

Parameter	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Modell 1a) 53 Proben von 48 Männern (mit ID 49, 83, 77)								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	53	122,86	12,52	105,50	112,85	119,10	132,95	151,00
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	53	0,97	0,39	0,40	0,80	0,90	1,15	2,70
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	53	122,34	11,43	103,71	112,70	119,93	132,86	143,37
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	53	0,51	2,79	-3,89	-0,82	-0,04	0,72	13,66
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	53	1,47	2,42	0,03	0,13	0,73	1,45	13,66
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	53	1,47	2,21	0,03	0,15	0,92	1,67	12,42
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	53	1,15	1,78	0,02	0,11	0,64	1,21	10,18
Modell 1a) 21 Proben von 18 Frauen								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	21	118,58	8,74	99,20	114,15	118,40	125,60	132,80
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	21	0,87	0,32	0,40	0,60	0,80	1,05	1,60
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	21	118,65	8,46	99,22	113,64	117,97	124,93	131,17
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	21	-0,07	0,94	-2,28	-0,65	-0,02	0,65	1,63
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	21	0,75	0,53	0,02	0,43	0,65	0,88	2,28
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	21	0,97	0,66	0,01	0,36	1,02	1,24	2,85
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	21	0,64	0,48	0,02	0,34	0,53	0,78	2,18
Modell 1a) 74 Proben von 66 Individuen (mit ID 49, 83, 77)								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	74	121,64	11,68	99,20	113,38	119,00	127,13	151,00
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	74	0,94	0,38	0,40	0,70	0,90	1,10	2,70
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	74	121,29	10,75	99,22	112,83	119,73	127,54	143,37
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	74	0,35	2,42	-3,89	-0,74	-0,03	0,67	13,66
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	74	1,27	2,09	0,02	0,21	0,69	1,23	13,66
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	74	1,33	1,91	0,01	0,28	1,00	1,30	12,42
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	74	1,00	1,54	0,02	0,17	0,61	1,00	10,18
Modell 1b) 50 Proben von 48 Männern (ohne ID 49, 83, 77)								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	50	121,43	11,34	105,50	112,48	118,75	129,18	143,80
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	50	0,96	0,40	0,40	0,78	0,90	1,13	2,70
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	50	121,48	11,15	103,71	112,49	119,49	129,33	143,37
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	50	-0,06	1,43	-3,89	-0,84	-0,05	0,64	4,22
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	50	0,96	1,05	0,03	0,13	0,71	1,20	4,22
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	50	0,98	1,06	0,00	0,00	1,00	1,00	4,00
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	50	0,78	0,81	0,02	0,11	0,63	1,00	3,19
Modell 1b) 71 Proben von 63 Individuen (ohne ID 49, 83, 77)								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	71	120,58	10,65	99,20	113,00	118,60	125,90	143,80
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	71	0,93	0,38	0,40	0,70	0,90	1,10	2,70
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	71	120,64	10,45	99,22	112,82	119,45	126,56	143,37
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	71	-0,06	1,30	-3,89	-0,81	-0,05	0,65	4,22
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	71	0,90	0,93	0,02	0,17	0,66	1,10	4,22
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	71	0,96	0,98	0,00	0,00	1,00	1,00	4,00
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	71	0,74	0,73	0,02	0,16	0,56	0,90	3,19

Tabelle 39: Deskription für die in den Regressions-Modellen 2a und 2b eingeschlossenen Proben

Modell 2a) 59 Proben von 59 Individuen (Kap. IV 1.2 und Kap. V 1.2.2) mit ID 49, 83 und 77.

Modell 2b) 56 Proben von 56 Individuen (Kap. IV 1.2 und Kap. V 1.2.2) ohne ID 49, 83 und 77.

Parameter	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
Modell 2a) 45 Proben von 45 Männern (mit ID 49, 83, 77)								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	45	123,66	13,29	105,50	112,25	120,70	136,25	151,00
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	45	0,95	0,33	0,40	0,80	0,90	1,20	2,40
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	45	123,00	12,14	103,71	112,40	120,79	134,18	143,37
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	45	0,66	3,00	-3,89	-0,76	0,03	0,85	13,66
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	45	1,63	2,60	0,03	0,13	0,81	1,69	13,66
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	45	1,62	2,36	0,03	0,14	1,03	1,99	12,42
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	45	1,26	1,91	0,02	0,11	0,65	1,44	10,18
Modell 2a) 14 Proben von 14 Frauen								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	14	118,21	7,82	102,10	113,38	117,85	125,20	129,30
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	14	0,81	0,32	0,40	0,60	0,75	1,03	1,50
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	14	118,52	7,63	104,38	113,26	117,87	125,27	128,65
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	14	-0,31	0,92	-2,28	-0,96	-0,28	0,58	0,87
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	14	0,77	0,57	0,05	0,46	0,64	0,96	2,28
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	14	1,08	0,75	0,04	0,33	1,07	1,44	2,85
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	14	0,66	0,53	0,04	0,36	0,53	0,85	2,18
Modell 2a) 59 Proben von 59 Individuen (mit ID 49, 83, 77)								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	59	122,37	12,38	102,10	112,70	118,90	131,50	151,00
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	59	0,91	0,33	0,40	0,70	0,90	1,10	2,40
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	59	121,94	11,34	103,71	112,58	119,93	131,73	143,37
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	59	0,43	2,68	-3,89	-0,81	0,03	0,70	13,66
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	59	1,43	2,31	0,03	0,17	0,72	1,42	13,66
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	59	1,49	2,10	0,03	0,25	1,04	1,69	12,42
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	59	1,12	1,70	0,02	0,15	0,63	1,17	10,18
Modell 2b) 42 Proben von 42 Männern (ohne ID 49, 83, 77)								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	42	122,02	12,11	105,50	111,78	118,75	132,28	143,80
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	42	0,94	0,34	0,40	0,78	0,90	1,20	2,40
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	42	122,02	11,93	103,71	112,15	119,73	132,74	143,37
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	42	-0,00	1,54	-3,89	-0,82	-0,01	0,71	4,22
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	42	1,03	1,13	0,03	0,13	0,72	1,44	4,22
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	42	1,08	1,06	0,03	0,14	0,91	1,66	3,92
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	42	0,83	0,86	0,02	0,10	0,64	1,19	3,19
Modell 2b) 56 Proben von 56 Individuen (ohne ID 49, 83, 77)								
$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	56	121,07	11,25	102,10	112,03	118,50	127,98	143,80
s von $^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	56	0,90	0,33	0,40	0,70	0,85	1,10	2,40
$^{14}C_{berechnet\ (Minimum)}$ (pMC)	56	121,15	11,06	103,71	112,30	118,75	128,20	143,37
$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$ (pMC)	56	-0,08	1,41	-3,89	-0,83	-0,04	0,65	4,22
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ (pMC)	56	0,97	1,02	0,03	0,14	0,69	1,26	4,22
$\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / s	56	1,08	0,98	0,03	0,19	1,02	1,51	3,92
100 x $\lvert {}^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet} \rvert$ / $^{14}C_{gemessen}$ (%)	56	0,79	0,79	0,02	0,12	0,61	1,05	3,19

Tabelle 40: Ergebnisse der Regressions-Modelle 1 und 2:
$^{14}C_{gemessen} = \beta_1 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} + \beta_0$.

Modell*		n	p-Wert für Test auf Hetero-skedastizität	R^2_{adj}	Formel
1a (mit ID 49, 83, 77)	Männer	53	0,1097	0,9533	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}06958 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 8{,}00112$
	Frauen	21	0,2956	0,9887	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}02814 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 3{,}40471$
	Gesamt	74	0,1228	0,9599	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}06466 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 7{,}49549$
1b (ohne ID 49, 83, 77)	Männer	50	0,0875	0,9837	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}01194 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 1{,}06604$
	Gesamt	71	0,0982	0,9850	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}00985 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 1{,}50033$
2a (mit ID 49, 83, 77)	Männer	45	0,1085	0,9518	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}06808 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 7{,}71233$
	Frauen	14	0,2955	0,9852	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}01777 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 2{,}42095$
	Gesamt	59	0,1183	0,9560	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}06727 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 7{,}77360$
2b (ohne ID 49, 83, 77)	Männer	42	0,0748	0,9835	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}00708 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 0{,}86803$
	Gesamt	56	0,1258	0,9841	$^{14}C_{gemessen} = 1{,}00985 \times {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} - 1{,}27474$

* Da sich für die Frauen keine Veränderungen ergeben, sind nur die Ergebnisse für die Männer und die gesamte Stichprobe für Modell 1b und Modell 2b dargestellt.

Graue Markierung: beste Modellanpassungen.

Die Regressionsmodelle unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Eine Verbesserung der Modellanpassung ist für die Stichprobe der Männer jeweils nach Ausschluss der drei Proben ID 49, 83 und 77 zu erreichen (Modell 1b, Modell 2b). Insgesamt kommt es durch die berechneten ^{14}C-Werte zu einer leichten Überschätzung der gemessenen ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen, was durch Regressionskoeffizienten $\beta_1 > 1$ etwas verstärkt und durch einenen Intercept (y-Achsenabschnitt) $\beta_0 < 0$ ausgeglichen wird. Diese Parameter ändern sich zwischen vergleichbaren Stichproben für Modell 1 und 2 nur geringfügig, was als indirekter Hinweis auf die Stabilität des gewählten Ansatzes gesehen wird.

In Abbildung 29 sind für Modell 1a, 1b und 2b die Residuen dargestellt. Die Abweichungen zwischen dem gemessenen ^{14}C-Wert und dem berechneten Messwert wurden dafür in Anteile von der jeweiligen Standardabweichung umgerechnet (Residuum / s). In Abbildung 29a werden Proben mit Abweichungen größer bzw. kleiner 4 s zwischen gemessenem und dem unter Verwendung des jeweiligen Regressions-Modells berechneten ^{14}C-Wert und in Abbildung 29b und c Proben mit Abweichungen größer bzw. kleiner 3s markiert.

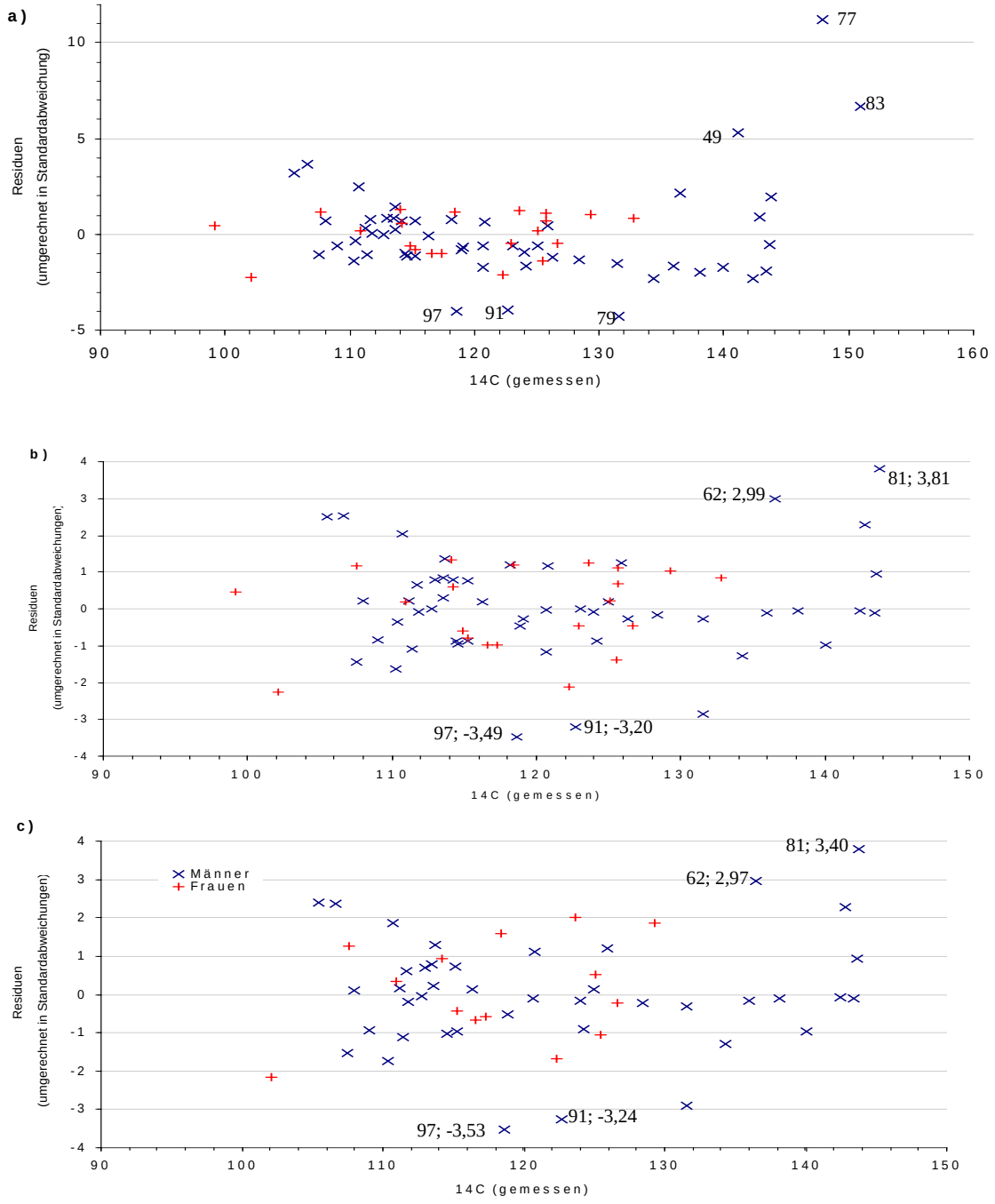


Abbildung 29: Resiudenplots (umgerechnet in Standardabweichungen: Residuum/s) für $^{14}C_{gemessen}$, getrennt für Männer und Frauen sowie mit Kennzeichnung von IDs mit Residuen |> 3s|:

a) Modell 1a: 53 Proben von 48 Männern und 21 Proben von 18 Frauen, Tabelle 38
b) Modell 1b: 50 Proben von 45 Männern und 21 Proben von 18 Frauen, Tabelle 38
c) Modell 2b: Proben von 42 Männern und 14 Frauen, Tabelle 39.

V 3.4 Schlussfolgerungen

Die im Kapitel V 3.3.2 erzielten hohen Übereinstimmungen zwischen berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten mit $R^2_{adj} \geq$ 95 % können nicht überraschen: Sie sind durch die endgültige Ausformulierung des Modells FoRCaDa bedingt. Dies wird besonders im Vergleich mit den Ergebnissen in Kapitel V 1.2.3 deutlich. Für die gesamte Stichprobe (n = 59, vgl. Modell 2a) wurde dort für den gemessenen ^{14}C-Wert in Abhängigkeit vom Geburtsjahr bzw. von Geburtsjahr und Alter jeweils ein R^2_{adj} von 40 % ermittelt. Dieser als entscheidend beurteilte und im Gegensatz zur klassischen Radiocarbon bestehende Zusammenhang wird in den Modellen 1 und 2 (Kap. V 3.3.2) beibehalten. Er verbirgt sich in den berechneten ^{14}C-Werten und erfährt durch die Berücksichtigung von Stoffwechselvorgängen mit den beiden Parametern ΔSM und $1/t_C$ sowie dem jeweiligen Zugriff auf die ^{14}C-Werte in der Atmosphäre eine entsprechende Präzisierung. Vielmehr muss argumentiert werden, dass diese hohe Abhängigkeit der gemessenen ^{14}C-Werte von den Lebensdaten sowie der Physiologie eines Individuums notwendig ist ($^{14}C_{berechnet}$), wenn zur Liegezeitbestimmung mittels gemessener ^{14}C-Werte ein geeignetes Instrument zur Hand sein soll. Es ist jedoch nicht beabsichtigt, die in Kapitel V 3.3.2 berechneten Regressions-Gleichungen zur Liegezeitbestimmung einzusetzen – vielmehr soll der theoretische Ansatz übernommen werden.

In einem ersten Schritt werden getrennt für beide Geschlechter für Austauschraten zwischen 1 und 6 % ^{14}C-Werte nach dem Algorithmus in Kapitel IV 3.4.1 berechnet. Damit liegen für jeden Messwert 11 berechnete Werte vor. Zum Vergleich mit dem gemessenen ^{14}C-Wert wird derjenige mit der kleinsten absoluten Differenz zwischen beiden Werten zur weiteren Beurteilung beibehalten. Es ist somit ohne Bedeutung, ob eine Über- oder Unterschätzung des Messwertes durch den Rechenwert vorliegt. Durch dieses Vorgehen wird eine Verbesserung in der Übereinstimmung von berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert bei den Männern von einem $R^2_{adj} > 70$ % auf 95 % und bei den Frauen von einem $R^2_{adj} > 40$ % auf 98 % erreicht (Kap. V 1.2.2, V 1.2.3, V 3.3.2).

Durch die Begrenzung der ursprünglich vorgewählten 24 Austauschraten auf Raten zwischen 1 und 6 % wird in der vorliegenden Referenzserie für 13 der 74 (18 %) Proben die durchschnittliche jährliche Austauschrate unterschätzt, wie Abbildung 30a und b zu entnehmen ist. In 12 Fällen ergibt sich als nächstbeste Übereinstimmung eine Rate von 6 %, für ID 80 von 1 %. Damit wird in der Tendenz die Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert geringfügig verschlechtert.

In einem zweiten Schritt wird geprüft, ob der berechnete ^{14}C-Wert in dem Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s liegt. In diesem Bereich kann zu 99,9 % der tatsächliche, aber unbekannte ^{14}C-Wert angenommen werden. Bei 71 der 74 (96 %) Proben liegt der berechnete ^{14}C-Wert in diesem Intervall. Durch Ausschluss der Proben von drei Männern (ID 49, 83, 77), für die sich keine ausreichende Übereinstimmung beider ^{14}C-Werte ergibt, kommt es zu einer Verbesserung des R^2_{adj} von 95 auf 98 % und damit erreicht dieses den bereits für die Frauen berechneten Wert (Kap. V 3.3.2). In der Referenzserie befinden sich für 68 von den 74 Proben (92 %, Abb. 30b) die berechneten ^{14}C-Werte sogar in dem Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 3$ s. In diesem Bereich kann zu 99,7 % der tatsächliche ^{14}C-Wert angenommen werden.

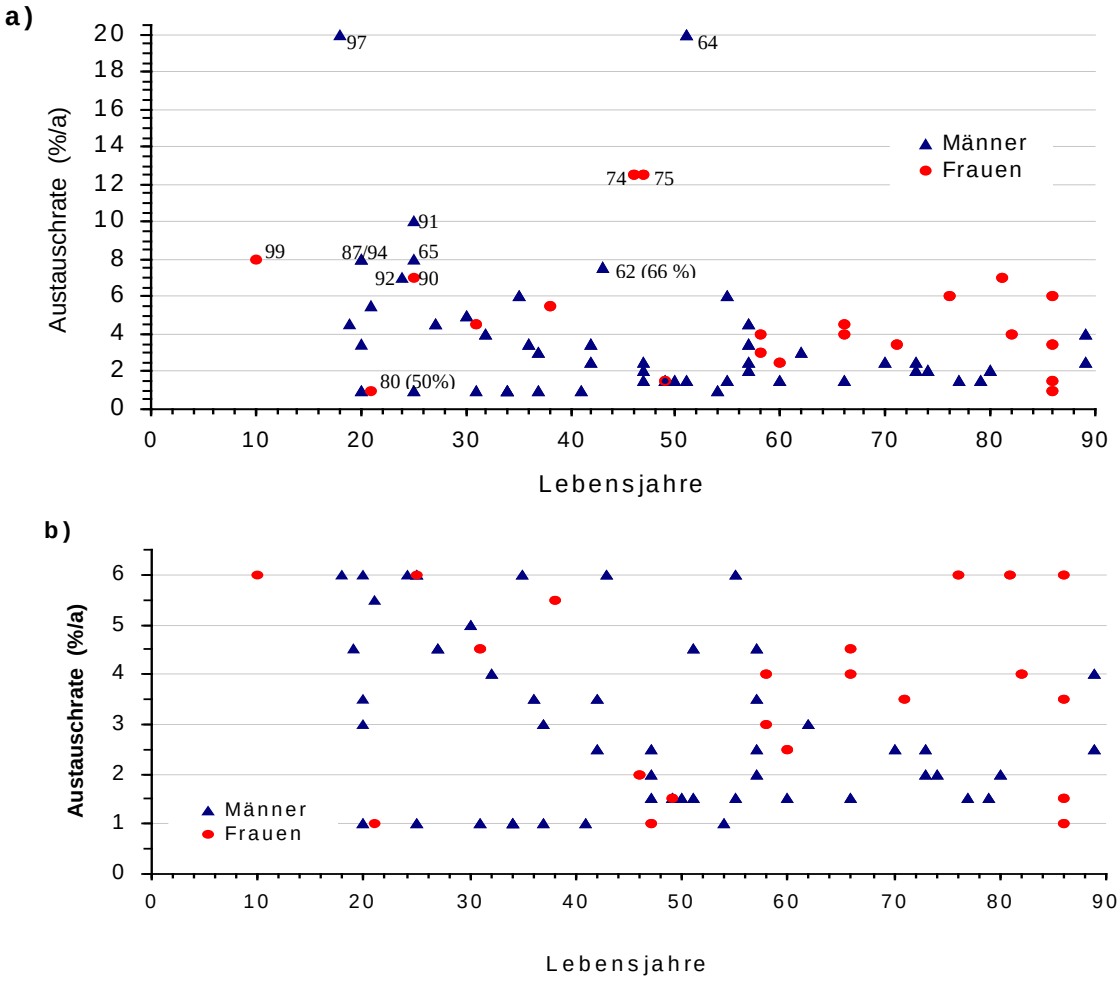


Abbildung 30: Abhängigkeit der Austauschrate von den Lebensjahren des Donors (74 Proben von 66 Individuen, Anhang 61).

a) Austauschrate zwischen 1 und 25 %, für welche die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert am kleinsten ist. (Markierung der Proben mit Austauschraten > 6 %)

b) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, für welche die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert am kleinsten ist.

Es wird deutlich, dass durch die Wahl des Übereinstimmungsbereiches für den berechneten ^{14}C-Wert in Abhängigkeit von der Standardabweichung des gemessenen ^{14}C-Wertes die Präzision der Radiocarbonmethode auf das Modell FoRCaDa übertragen wird. Dabei kann zu 99,9 % der tatsächliche ^{14}C-Wert in dem Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s erwartet werden. Durch die Breite dieses Intervalls werden jedoch Unterschiede zwischen den Skelettregionen (kranial / postkranial), der Gewebeart (Spongiosa / Kompakta) und dem Gewebealter sowie des Berechnungsmodus für die Lebensjahre vollständig überdeckt (keine Unterschiede zwischen den Regressions-Modellen 1b und 2b). Dennoch gelingt es in der vorliegenden Referenzserie für 3 der 74 (4 %) Proben nicht, eine ausreichende Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten zu erzielen. Das heisst, für einen kleinen, aber nicht zu vernachlässigenden Prozentsatz an Proben muss mit Fehlinterpretationen bei der Liegezeitbestimmung unter Verwendung des Modells FoRCaDa gerechnet werden (Kap. VI 3.3).

Für 71 (96 %) der 74 Proben lassen sich dagegen die gemessenen ^{14}C-Werte mit Austauschraten bis zu 6 % ausreichend präzise berechnen. Für Modell 1b liegen die beobachteten Abweichungen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten bei den Frauen zwischen -2,28 bis 1,63 pMC oder 0,02 bis 2,18 % und bei den Männern zwischen -3,89 bis 4,22 pMC oder 0,02 bis 3,19 %. Dies spricht unter Bezugnahme auf die gemessenen ^{14}C-Werte für eine hohe Richtigkeit der verwendeten Parameter und des angewendeten Algorithmus im Modell FoRCaDA. Gleichzeitig ist dieser wegen des Fehlens von Kindern bis zum 9. Lj. in der Stichprobe für Kinder zwischen dem 2. und 9. Lj. bzw. für nur Individuen älter als 84 Jahre wegen des extrapolierten Parameters ΔSM nur ansatzweise überprüf- und damit anwendbar.

Anhand der bereits vorgelegten Ergebnisse werden die Beobachtungen unterstützt, die Knochenkollagen zu den Körperbestandteilen mit einem trägen Stoffaustausch rechnen. Zum Beispiel umfasst das hier festgelegte Intervall den Bereich, der bereits durch L'ORANGE UND ZIMEN (1968a, 1969a) mit HWZ_{bio} von 18 ± 2 Jahren und damit Austauschraten von etwa 3,5 bis 4,5 % berechnet wurde. Es muss im Knochen für Radiocarbon daher mit einer HWZ_{bio} von mindestens 11,6 Jahren gerechnet werden (für eine Rate von 6 %, vgl. Tab. 11 Kap. II 5.5.3). Mit anderen Worten: Wenn ^{14}C in den Knochen aufgenommen wurde, bleibt es dort auch für lange Zeit.

Eine weitere Einschränkung auf nur eine Austauschrate gelingt jedoch nicht. Auch die Definition von „Stoffwechsel-Typen“, wie diese z. B. aus der Literatur zur Osteoporose-Forschung bekannt sind mit Raten für „langsame Stoffwechsler“ ≤ 2,0 %, für „normale Stoffwechsler“ zwischen 3,5 und 4,0 % und „schnelle Stoffwechsler“ zwischen 5,5 und 6,0 % und sich anhand Anhang 61 auch andeuten, stellt keinen sinnvollen Ansatz dar. Denn Einerseits kann bei dem verwendeten Algorithmus nicht entschieden werden, ob es sich dabei um eine lebenslang konstante Rate handelt oder sich diese „nur“ auf die „letzten“ Lebensjahre einese Individuums bezieht. Andererseits steht postmortal diese Information auch nicht mehr zur Verfügung. Anhand der eigenen Daten lässt sich die aus der Literatur bekannte Tatsache erkennen, dass jüngere Individuen im Vergleich zu älteren und vor allem erwachsene Frauen im Vergleich zu erwachsenen Männeren tendenziell höhere Austausch-raten und damit einen aktiveren Stoffwechsel aufzeigen, ohne dass eine eindeutige Unterscheidung vorgenommen werden kann. Es wird daher bei dem derzeitigen Stand der Modellentwicklung entschieden – nicht zuletzt um den Einschränkungen einer Klassierung zu entgehen – die insgesamt 11 Austauschraten zwischen 1 und 6 % dem Modell als gleichwertige Parameter sowohl für Männer als auch für Frauen zu hinterlegen.

V 3.5 Liegezeitbestimmung von Skelettfragmenten unter Verwendung des Modells FoRCaDa, eine Kasuistik

In diesem Kapitel wird der Versuch einer Liegezeitbestimmung für identifzierte (n = 10, IDs > 40) und nicht ausreichend identifizierte (n =12, mit IDs < 40) Skelettfragmente unternommen, wobei problematische Fälle besondere Beachtung finden (ID 49, 83, 77). Es wird unter Verwendung des Modells FoRCaDa von dem gemessenen auf berechnete ^{14}C-Werte geschlossen, wobei letztere dann Rückschlüsse auf mögliche Geburtsjahre und die erreichten Lebensjahre erlauben. Die berechneten ^{14}C-Werte müssen dabei in dem Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s liegen, der hier vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit. Dieses Intervall entspricht dem Bereich, in dem zu 99,9 % der tatsächliche, aber unbekannte ^{14}C-Wert für Knochenkollagen zu erwarten ist. Um die Anzahl möglicher, übereinstimmender

Werte sinnvoll einzuschränken, erfolgt die Suche in einem Bereich, der auch bei nicht-identifizierten Skelettfunden festgelegt wird durch (vgl. Kap. IV 3.4.3):

(1) Das anthropologisch bestimmte Geschlecht und das Sterbealter mit seinen Unsicherheitsgrenzen,
(2) Das Auffindungsjahr als Obergrenze und
(3) Das Kalenderjahr minus Lebensjahre plus 1 Jahr als Untergrenze, in dem in der Atmosphäre das erste Mal die gemessene ^{14}C-Konzentration für Werte > 100 pMC über- bzw. für Werte < 100 pMC wieder unterschritten wurde.

Im Folgenden wird dieses Vorgehen für insgesamt 22 Proben vorgestellt und es werden Hinweise auf die Anwendung des Models FoRCaDa zur Liegezeitbestimmung in der forensischen Routine gegeben. Die Einteilung der Proben erfolgt nach den mittleren anthropologisch bestimmten Lebensjahren in die Altersklassen Kinder (infans I und II: ≤ 12 Jahre; ID 18, 99), junge Erwachsene (juvenil und adult: < 40 Jahre; ID 97, 98, 11, 14, 9, 49 und 83) und ältere Erwachsene (matur und senil: ≥ 40 Jahre; ID 77, 13, 59, 66, 69, 45 sowie 15, 16 und 17). Unabhängig von dieser Klassierung werden vier Proben mit gemessenen ^{14}C-Werten unter 100 pMC vorgestellt (ID 3, 4, 5, 12).

Im Anhang werden je ID die Ergebnisse in drei Tabellen ausführlich dargestellt: In den Zeilenköpfen sind die Geburtsjahre und in den Spaltenköpfen die erreichten Lebensjahre angegeben, für die sich mit ausreichender Übereinstimmung ein ^{14}C-Wert berechnen lässt. In den Zellen selbst findet sich jeweils auf eine Nachkommastelle gerundet in den Tabellen:

a) Die Differenz von $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$, wobei eine Differenz < 0 eine Überschätzung und einen Differenz > 0 eine Unterschätzung des gemessenen ^{14}C-Wertes durch das Modell FoRCaDa bedeutet,
b) Die Umrechnung der absoluten Differenz in Anteile von der gemessenen Standardabweichung ($|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)} / s|$) bzw.
c) Die Austauschrate zwischen 1 und 6 %, für die sich die kleinstmögliche Differenz zwischen beiden ^{14}C-Werten ergab.

Nachfolgend werden die z. T. gekürzten Tabellen mit den in Anteilen der gemessenen Standardabweichung (s) umgerechneten absoluten Differenzen aufgeführt. In diesen erfolgt eine Markierung der Werte nach den Anteilen mit ≤ 2, zwischen > 2 und ≤ 3 sowie zwischen > 3 und ≤ 4. In diesen Bereichen ist mit 95,0, 99,7 bzw. 99,9 % der tatsächliche ^{14}C-Wert zu erwarten. Eine weitere Interpretation der Abweichungen erfolgt nicht. Außerdem wird in der Kopfzeile das bekannte bzw. mittlere geschätzte Lebensjahr und in der linken Randspalte das Geburtsjahr hervorgehoben, falls dieses bekannt ist.

V 3.5.1 Proben mit ^{14}C-Messwerten unter 100 pMC: ID 3, 4, 5 und 12

In der klassischen Radiocarbon-Methode werden Messwerte für ^{14}C < 100 pMC mit großer Wahrscheinlichkeit als mindestens prämodern eingeordnet, da die Reduktion von ^{14}C auf den radioaktiven Zerfall zurückgeführt und auf das Jahr 1950 bezogen wird (Kap. II 2). Anhand der nachfolgenden Beispiele kann jedoch gezeigt werden, dass bis zu Beginn der 1960er Jahre mit entsprechend niedrigen Werten gerechnet werden muss (vgl. auch Tab. 36, Kap. V 3.2). Somit lassen sich sehr große Übereinstimmungsbereiche feststellen, deren weitere Einschränkung nur aus dem Befund (Fundumstände) möglich ist. Es kann in Abhängigkeit von Geburtsjahr und Lebensjahren somit nur eine Obergrenze für das Sterbejahr angegeben werden, bis zu dem ein Individuum mit großer Wahrscheinlichkeit sicher verstorben ist. In den Tabellen 41 bis 43 sind die in Anteile von der Standardabweichung umgerechneten absoluten Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ enthalten. Es sind die Werte fett hervorgehoben, die dem Sterbejahr 1950 entsprechen. Gleichzeitig wird der Rahmen der Zellen fett markiert, für die sich berechnete ^{14}C-Werte < 100 pMC ergeben.

Tabelle 41: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 3: Auffindungsjahr 1993. Neurocranium. Sicher männlich, verstorben im 40. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 97,8 ± 0,6 pMC (vgl. Anhang 13 und 38).

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	32	33	34	35	36	37	38	39	**40**	41	42	43	44	45	46	47	48
1915	**0,5**	**0,4**	**0,4**	**0,3**	**0,2**	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	1,1	1,3	1,7	2,1	2,4	3,1
1916	**0,4**	**0,4**	**0,3**	**0,2**	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	3,0	
1917	**0,4**	**0,3**	**0,2**	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3	0,7	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	3,0		
1918	**0,3**	**0,2**	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3	0,7	0,9	1,2	1,6	1,9	2,3	2,9			
1919	**0,2**	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,7	0,9	1,1	1,5	1,9	2,3	2,9				
1920	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,8	1,0	1,4	1,8	2,2	2,8					
1921	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,8	1,0	1,4	1,8	2,2	2,8	4,0					
1922	0,0	0,0	0,2	0,6	0,7	0,9	1,3	1,7	2,1	2,7	3,9						
1923	0,0	0,1	0,5	0,6	0,8	1,3	1,6	2,0	2,6	3,8							
1924	0,1	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	2,0	2,6	3,8								
1925	0,4	0,5	0,7	1,1	1,5	1,9	2,5	3,7									
1926	0,4	0,7	1,1	1,4	1,8	2,5	3,7										
1927	0,6	1,0	1,4	1,8	2,4	3,6											
1928	1,0	1,4	1,8	2,4	3,6												
1929	1,3	1,7	2,3	3,5													
1930	1,6	2,3	3,5														
1931	2,2	3,4															
1932	3,3																

(Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr)
Werte fett: Sterbejahr ≤ 1950;
schwarzer Halbrahmen: $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ ≤ 100% für Sterbejahre bis 1963
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 3 (Anhang 38) handelt es sich um ein 1993 aufgefundenes Skelett eines sicher männlichen, 39 ± 8 Jahre alten Individuums. Anhand des für das Neurocranium gemessenen ^{14}C-Wertes von 97,8 ± 0,6 pMC wurde eine Liegezeit von 180 ± 50 Jahren vor 1950 unter Bezug auf die klassische Radiocarbonmethode angegeben. Unter Verwendung des Modells FoRCaDa kann jedoch als maximales Sterbejahr das Jahr 1963 angesehen werden, wobei dies einen 1932 geborenen und 32jährig verstorbenen Mann ebenso betreffen würde wie einen 1921 geborenen und 43jährig verstorbenen Mann. Zwischen diesen Grenzen lassen sich beliebige Übergänge bilden, die sich aus der Kombination von Geburtsjahr und Lebensjahr nach Tabelle 41 ergeben. Eine Untergrenze lässt sich nicht sinnvoll benennen. Zwar wurde erstmalig in der Atmosphäre der gemessene ^{14}C-Wert im Jahr 1932 wieder unterschritten, gleichzeitig liegen alle berechneten ^{14}C-Werte in dem vorgewählten Übereinstimmungsbereich für Geburtsjahre ab 1865, der im Modell FoRCaDa festgelegten Untergrenze. Bis zum theoretisch möglichen Sterbejahr 1955 wird die beste Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert für Austauschraten zwischen 5 und 6 % erreicht, ab dem theoretisch möglichen Sterbejahr 1957 nur noch für eine Rate von 1 % (Anhang 38c). Da das Skelett unter dem gefliesten, aber scheinbar unbeschädigten Boden eines vor 1920 errichteten Hauses gefunden wurde, ergibt sich aus dem Befund, jedoch nicht anhand der berechneten ^{14}C-Werte, eine eher prämoderne Zuordnung (vgl. ID 1, Kap. VI 3.2.2).

Tabelle 42: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 4: Auffindungsjahr 1990. Postkranial. Eher männlich, verstorben im 43. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 97,5 ± 0,8 pMC (vgl. Anhang 13 und 39).

Geburts-	Lebensjahr KI														
Jahr	35	36	37	38	39	40	41	42	**43**	44	45	46	47	48	49
1915	**0,6**	**0,6**	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	0,9	1,2	1,3	1,6	1,9	2,2	2,7	3,6
1916	**0,6**	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	0,9	1,1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,6	3,5	
1917	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	0,9	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1	2,6	3,5		
1918	0,4	0,4	0,4	0,6	0,9	1,1	1,2	1,5	1,8	2,1	2,6	3,5			
1919	0,4	0,4	0,6	0,9	1,0	1,2	1,5	1,8	2,1	2,6	3,4				
1920	0,4	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,5	3,4					
1921	0,5	0,8	0,9	1,1	1,4	1,7	2,0	2,5	3,3						
1922	0,8	0,9	1,1	1,4	1,7	2,0	2,4	3,3							
1923	0,8	1,0	1,3	1,6	1,9	2,4	3,3								
1924	1,0	1,3	1,6	1,8	2,3	3,2									
1925	1,2	1,5	1,8	2,3	3,2										
1926	1,5	1,7	2,2	3,1											
1927	1,7	2,2	3,1												
1928	2,2	3,1													
1929	3,0														

(Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr)
Werte fett: Sterbejahr ≤ 1950;
schwarzer Halbrahmen: $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ ≤ 100% für Sterbejahre bis 1963
($|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|$) / s ≤ 4: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 4 (Anhang 39) handelt es sich um 1990 aufgefundene Fragmente des (postkranialen) Skelettes eines eher männlichen, 42 ± 8 Jahre alten Individuums. Anhand des gemessenen ^{14}C-Wertes von 97,5 ± 0,8 pMC wurde eine Liegezeit von 205 ± 65 Jahren vor 1950 unter Bezug auf die klassische Radioarbonmethode angegeben. Unter Verwendung des Modells FoRCaDa ist ein maximales Sterbejahr von 1963 aber ebenso möglich, wobei dies einen 1929 geborenen 35jährigen Mann ebenso wie einen 1915 geborenen 49jährigen Mann betreffen könnte. Zwischen diesen Grenzen lassen sich beliebige Übergänge bilden, die sich aus der Kombination von Geburtsjahr und Lebensjahr nach Tabelle 42 ergeben. Eine Untergrenze lässt sich genau wie für ID 3 nicht sinnvoll benennen. Zwar wurde erstmalig in der Atmosphäre der gemessene ^{14}C-Wert im Jahr 1943 wieder unterschritten, gleichzeitig liegen alle berechneten ^{14}C-Werte in dem vorgewählten Übereinstimmungsbereich für Geburtsjahre ab 1865, der im Modell FoRCaDa festgelegten Untergrenze. Bis zum theoretisch möglichen Sterbejahr 1955 wird die beste Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert für eine Austauschrate von 6 % erreicht und ab dem Sterbejahr 1957 nur noch für eine Rate von 1 % (Anhang 39c).

Tabelle 43: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 5: Auffindungsjahr 1986. Postkranial. Eher männlich, verstorben im 45. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 98,3 ± 1,1 pMC (vgl. Anhang 13 und 40).

Geburts-	Lebensjahr												
Jahr	37	38	39	40	41	42	43	44	**45**	46	47	48	49
1918	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1	1,8	2,6	3,2	3,8
1919	0,1	0,0	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1	1,8	2,5	3,2	3,8	
1920	0,1	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,1	1,7	2,5	3,2	3,8		
1921	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,1	1,7	2,5	3,1	3,8			
1922	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7	2,4	3,1	3,7				
1923	0,2	0,4	0,6	1,0	1,6	2,4	3,1	3,7					
1924	0,4	0,6	1,0	1,6	2,4	3,0	3,7						
1925	0,6	0,9	1,6	2,3	3,0	3,6							
1926	0,9	1,5	2,3	3,0	3,6								
1927	1,5	2,3	3,0	3,6									
1928	2,3	2,9	3,5										
1929	2,9	3,5											
1930	3,5												

(Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr)
Werte fett: Sterbejahr ≤ 1950;
Schwarzer Halbrahmen: $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ ≤ 100% für Sterbejahre bis 1963
($|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|$) / s ≤ 4: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 5 (Anhang 40) handelt es sich um 1986 aufgefundene Fragmente des (postkranialen) Skelettes eines eher männlichen, 44 ± 8 Jahre alten Individuums. Anhand des gemessenen ^{14}C-Wertes von 98,3 ± 1,1 pMC wurde unter Bezug auf die klassische Radiocarbonmethode eine Liegezeit von 140 ± 85 Jahren vor 1950 angegeben. Unter Verwendung des Modells FoRCaDa ist ein maximales Sterbejahr von 1966 ebenso möglich, wobei dies einen 1930 geborenen 37jährigen Mann, aber auch einen 1918 geborenen 49jährigen Mann betreffen könnte. Zwischen diesen Grenzen lassen sich beliebige Übergänge bilden, die sich aus der Kombination von Geburtsjahr und Lebensjahr nach Tabelle 43 ergeben. Eine Untergrenze lässt sich nicht sinnvoll benennen. Zwar wurde erstmalig der gemessene ^{14}C-Wert im Jahr 1923 in der Atmosphäre wieder unterschritten, gleichzeitig liegen alle berechneten ^{14}C-Werte in dem Übereinstimmungsbereich für Geburtsjahre ab 1865, der im Modell FoRCaDa festgelegten Untergrenze. Für alle ^{14}C-Werte ergeben sich die besten Übereinstimmungen für eine Austauschrate von 1 % (Anhang 40c). Aus dem Befund lässt sich die Vermutung ableiten, dass es sich um einen 1945 gefallenen Soldaten handelt. Unter Berücksichtigung der anthropologischen Altersbestimmung ergeben sich für alle Jahre zwischen dem 37. und 53 Lj. ausreichend gute Übereinstimmungen, wobei ein 37jähriger Mann 1909 und ein 53jähriger Mann bereits 1893 geboren worden wäre (in Tabelle 43 und in Anhang 40 nicht dargestellt).

Entsprechende Ergebnisse liegen auch für ID 12 vor (Anhang 41). Bei der Probe handelt es sich um die 1994 aufgefundenen Fragmente des (kranialen) Skelettes eines eher männlichen, mindestens 60 Jahre alten Individuums. In der Atmosphäre wurde der gemessene ^{14}C-Wert von 98,8 ± 0,7 pMC im Jahr 1918 erstmals wieder unterschritten. Anhand des Messwertes wurde unter Bezug auf die klassische Radiocarbonmethode eine Liegezeit von:

- 1680 bis 1754 mit 26,7 %
- 1804 bis 1937 mit 72,6 % und
- 1954 bis 1956 mit 0,7 % angegeben.

Unter Verwendung des Modells FoRCaDa ist theoretisch ein maximales Sterbejahr von 1964 bzw. 1963 ebenso möglich, wobei dies einen 1905 geborenen 60jährigen Mann, aber auch einen 1865 geborenen 99jährigen Mann betreffen könnte, wobei sich diese Altersgrenze durch das im Modell FoRCaDa hinterlegte, maximal erreichbare Lebensjahr ergibt. Zwischen diesen Grenzen lassen sich beliebige Übergänge bilden. Eine Untergrenze lässt sich nicht sinnvoll benennen, da im Modell FoRCaDa das früheste Geburtsjahr mit 1865 festgelegt ist. Für ID 12 lassen sich sehr differenzierte Übergänge bei den Austauschraten

feststellen (Anhang 41c), für die sich die beste Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert ergibt, z. B.:

- Ein Sterbejahr bis 1941 für 60- bis 77jährige Männer mit Austauschraten ≥ 3,5 %
- Ein Sterbejahr ab 1942 für 60- bis 99jährige Männer mit Austauschraten < 3,5 %, wobei erst mit einem Sterbejahr nach 1958 eine Austauschrate von 1,0 % vorliegt.

V 3.5.2 Kinder (mittleres Alter ≤ 12 Jahre: infans I und II): ID 18 und 99

Zur Liegezeitbestimmung anhand von Skelettfragmenten von Kindern und zwar ganz besonders zwischen dem 2. und 9. Lj. ist das Modell FoRCaDa wegen des fast vollständigen Fehlens entsprechender Proben in der Referenzserie nur bedingt geeignet (Kap. V 3.3.3). Daher stellt die Bestimmung des Sterbejahres für die beiden Proben ID 18 und 99 einen ersten Versuch dar.

Tabelle 44: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 18: Auffindungsjahr nach 1995 bis 2000. AMS-Technik. Postkranial. Geschlecht indifferent, verstorben im 1. oder 2. Lj., $^{14}C_{gemessen}$ 112,2 ± 0,88 pMC (vgl. Anhang 13 und 42).

Geburts-Jahr	weiblich		männlich	
	Lebensjahr		Lebensjahr	
	1	2	1	2
1958	0,8		0,8	
...				
1989		3,8		3,8
1990	3,1	2,6	3,1	2,6
1991	1,9	1,7	1,9	1,7
1992	1,4	1,0	1,4	1,0
1993	0,5	0,2	0,5	0,2
1994	0,2	0,5	0,2	0,5
1995	1,1	1,4	1,1	1,4
1996	2,0	2,4	2,0	2,4
1997	3,1	3,4	3,1	3,4
1998	3,8		3,8	

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 18 (Anhang 42) handelt es sich um nach 1995 und vor 2000 aufgefundene Fragmente des (postkranialen) Skelettes eines Kleinstkindes im 1. Lj. unbestimmten Geschlechts (WILD ET AL. 2000). Die Berechnungen unter Verwendung des Modells FoRCaDa werden daher für beide Geschlechter durchgeführt. Geschlechtsunterschiede können wegen des zugrundeliegenden Algorithmus (Kap. IV 3.4.1) erst ab dem 2. Lj. erkannt werden und liegen hier im Bereich der Rundungsgenauigkeit. Der gemessene ^{14}C-Wert von 112,2 ± 0,88 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1959 überschritten. In Abhängigkeit vom Sterbealter und der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit ergeben sich für ein maximal im 2. Lj. verstorbenes Kind zwei gleichwertige Sterbezeitintervalle, wie Tabelle 44 zu entnehmen ist: 1958 (1jährig) und 1990 (1- und 2jährig) bis 1998 (1jährig). Diese Intervalle stimmen mit den durch WILD und Co-Autoren angegebenen Bereichen gut überein, die zudem eine Gewichtung mit 9 % Wahrscheinlichkeit für das Sterbeintervall 1957-1958 bzw. 91 % Wahrscheinlichkeit für das Intervall von 1991 bis 1997 vornehmen. Dies kann hier nicht nachvollzogen werden. Gleichzeitig stellt die hier berechnete Eingrenzung auf 10 Jahre im Zeitraum nach 1950 eine hilfreiche Einschränkung dar, die aus dem (nicht bekannten) Befund ggf. eine weitere Beschränkung erfahren könnte. Die besten Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert ergeben sich für 2jährig zwischen 1990 und 1994 verstorbene Kinder bei einer Austauschrate von 6 %, für alle anderen ermittelten Sterbejahre bzw. Sterbealter bei einer Rate von 1 % (Anhang 42c).

Tabelle 45: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 99: Auffindungsjahr 1986, Sterbejahr 1985. Postkranial. Sicher weiblich, verstorben im 10. Lj. ± 2 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 126,7 ± 1,5 pMC (vgl. Anhang 13 und 43).

Geburts-Jahr	Lebensjahr				
	8	9	**10**	**11**	12
1952					2,2
1953				1,6	0,1
1954			0,8	0,6	3,9
1955		0,0	2,1		
1956	0,1	3,7			
...					
1971					3,8
1972				3,4	2,4
1973		3,7	2,9	2,0	1,1
1974	3,3	2,5	1,6	0,7	**0,0**
1975	2,0	1,2	0,3	**0,0**	0,0
1976	0,8	0,0	**0,0**	0,5	1,0
1977	0,0	**0,4**	1,0	1,5	
1978	**0,8**	1,4	1,9		
1979	2,1	2,5			

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
Rahmen fett: Werte im Sterbejahr 1985
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 99 (Anhang 43) handelt es sich um das (postkraniale) Skelett eines 1985 ermordeten und Ende Dezember 1986 aufgefundenen und nachfolgend identifizierten Mädchens. Eine anthropologische Altersbestimmung würde ein Alter von 9 ± 2 Jahre ergeben. Der gemessene ^{14}C-Wert von 126,7 ± 1,5 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1962 überschritten. In Abhängigkeit vom Sterbealter und der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit ergeben sich für ein zwischen dem 8. und 12. Lj. verstorbenen Mädchens zwei gleichwertige Sterbezeitintervalle, wie Tabelle 45 zu entnehmen ist: 1963 bis 1965 (jeweils 12jährig) und 1982 (12jährig) bis 1987 (8- bis 12jährig). Wenn sich aus dem Befund keine weiteren Hinweise ableiten lassen, ergibt sich keine Bevorzugung eines der beiden Sterbezeitintervalle. Allerdings stellt bereits diese Einschränkung eine hilfreiche Eingrenzung auf 9 Jahre im Zeitraum nach 1950 dar. Die besten Übereinstimmungen zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert ergeben sich dabei z. T. in Beziehung zum Sterbealter für verschiedene Austauschraten (Anhang 43c):

- Für das Sterbejahr 1963 in Abhängigkeit von den erreichten Lebensjahren für Raten von mindestens 3,5 %
- Für die Sterbejahre 1964 und 1965 in Abhängigkeit von den erreichten Lebensjahren für Raten von höchstens 1,5 %
- Für die Sterbejahre 1982 und 1983 für eine Rate von 6,0 %
- Für die Sterbejahre 1984 und 1985 in Abhängigkeit von den erreichten Lebensjahren zwischen 1,0 und 6,0 %
- Für die Sterbejahre 1986 und 1987 für eine Rate von 1,0 %
- Für ein im Jahr 1975 geborenes und 10jährig verstorbenes Mädchen ergibt sich eine Rate von 6 % bei einer Differenz zwischen beiden ^{14}C-Werten von 0,3 s bzw. für ein 11jährig verstorbenes Mädchen eine Rate von 4 % und einer Differenz von 0,0 s (vgl. Kap VI 3.2.7).

V 3.4.3 Junge Erwachsene (mittleres Alter < 40 Jahre: juvenil und adult): D 97, 98, 11, 14, 9, 49 und 83

Bei ID 97 (Anhang 44) handelt es sich um das (postkraniale) Skelett eines 1991 im 18. Lj. gestorbenen Mannes. Für die simulierte Liegezeitbestimmung wird jedoch ein anthropologisch bestimmtes Alter zwischen 13 und 25 Jahren angenommen. Der gemessene ^{14}C-Wert von 118,6 ± 1,1 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1959 überschritten. In Abhängigkeit von den sich anhand der Altersbestimmung ergebenden Sterbealter sowie der

vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit lassen sich zwei gleichwertige Sterbezeitintervalle bestimmen: 1962 (14jährige) bis 1969 (26jährige) sowie 1988 (14- und 15jährige) bis 1990 (14- bis 21jährige). Eine Unterscheidung zwischen beiden Intervallen und eine weitere Einschränkung müsste aus dem Befund abgeleitet werden und ergibt sich nicht aus den in Tabelle 46 dargestellten Ergebnissen. Es lassen sich im ersten Sterbeintervall in Abhängigkeit vom jeweiligen Sterbejahr und von den erreichten Lebensjahren die besten Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert für unterschiedliche Austauschraten zwischen 1 und 6 % sehr differenziert beobachten, im Intervall 2 ergeben sich die Übereinstimmungen dagegen durchweg für eine Rate von 6 % (Anhang 44c).

Tabelle 46: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 97: Sterbejahr 1990. Postkranial. Sicher männlich, verstorben im 14. bis 26 Lj., $^{14}C_{gemessen}$ 118,6 ± 1,1 pMC (vgl. Anhang 13 und 44).

Geburts-	Lebensjahr												
Jahr	14	15	16	17	**18**	19	20	21	22	23	24	25	26
1939													2,8
1940												1,8	0,2
1941											0,9	0,0	0,4
1942									3,4	0,4	0,2	0,4	0,5
1943								0,5	0,3	0,4	0,3	0,7	0,1
1944							0,0	0,2	0,5	0,0	0,5	0,8	1,2
1945						0,1	1,7						
1946					0,2	2,4							
1947				0,2	3,2								
1948			0,2	4,0									
1949	3,7	0,0											
1950	0,2												
...													
1968													
1969													
1970								3,5					
1971						3,9	2,9						
1972					3,5	2,6	*1,7*	*1,1*	*0,7*	*0,3*	*0,1*	*0,0*	*0,0*
1973				3,2	2,3								
1974		3,8	2,9	2,0	*1,1*								
1975	3,5	2,6	1,7		*0,1*								
1976	2,3	1,4			*0,1*								
1977	1,1				*0,1*								

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
($|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|$) / s ≤ 4: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4,
kursiv: absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ - $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ für 1972 geborene und nach 1990 verstorbene Männer (waagerecht) bzw. nach 1972 geborene und 18jährig verstorbene Männer (senkrecht)

Auffällig ist, dass sich eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Messwert im zweiten Intervall erst für nach 1990 verstorbene Individuen ergibt, wenn entweder das Geburtsjahr 1972 bzw. die erreichten 18 Lj. als Bezugsgröße herangezogen werden. Dies kann als Hinweis auf eine Retardation von ID 97 im Vergleich zur durchschnittlichen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$, wie diese dem Modell FoRCaDa hinterlegt ist, angesehen werden.

Bei ID 98 (Anhang 45) handelt es sich um das (postkraniale) Skelett eines 1991 im 19. Lj. gestorbenen Mannes. Für die simulierte Liegezeitbestimmung ergibt sich ein anthropologisch bestimmtes Alter zwischen 14 und 26 Jahren. Der gemessene ^{14}C-Wert von 120,7 ± 0,8 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1959 überschritten. In Abhängigkeit vom Sterbealter und der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit ergeben sich zwei gleichwertige Sterbezeitintervalle, wie Tabelle 47 zu entnehmen ist. Dabei lassen sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Sterbejahr und von den erreichten Lebensjahren die besten Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert für unterschiedliche Austauschraten zwischen 1 und 6 % beobachten:

- Intervall 1: 1963 (15- bis 21jährig)

  1964 (17- bis 24jährig)

  1965 (21- bis 27jährig)

  1966 (22- bis 27jährig) bis 1970 (27jährig), wobei mit jedem Kalenderjahr das Sterbealter um ein Jahr zunimmt.

  Dabei ergibt sich je jünger bzw. früher ein Individuum verstorben ist, eine höhere Austauschrate (Anhang 45c).

- Intervall 2: 1988 (15- bis 17jährig)

  1989 (15- bis 21jährig) bis 1991 (15- bis 24jährig).

  Dabei ergibt sich je jünger bzw. später ein Individuum verstorben ist, eine niedrigere Austauschrate, wobei sich nur für höchstens 17jährig im Jahr 1991 verstorbene Männer Austauschraten ≤ 3,0 % ergeben (Anhang 45c). Für einen 19jährig im Jahr 1991 verstorbenen Mann ergibt sich bei einer Austauschrate von 4,5 % eine Abweichung zwischen beiden ^{14}C-Werten von 0,1 s.

Eine Unterscheidung zwischen beiden Intervallen und eine weitere Einschränkung müsste aus dem Befund abgeleitet werden und ergibt sich bei der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit nicht aus den in Tabelle 47 dargestellten Ergebnissen.

Tabelle 47: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 98: Sterbejahr 1991. Postkranial. Sicher männlich, verstorben im 15. bis 27. Lj., $^{14}C_{gemessen}$ 120,7 ± 0,8 pMC (vgl. Anhang 13 und 45).

Geburts-	Lebensjahr												
Jahr	15	16	17	18	**19**	20	21	22	23	24	25	26	27
1939													2,0
1940												0,7	0,7
1941										3,8	0,6	0,6	0,9
1942									2,0	0,7	0,6	0,9	0,4
1943							3,3	0,6	0,0	0,7	0,5	0,4	0,7
1944						0,4	0,5	0,2	0,7	0,1	0,8	1,0	0,6
1945					0,1	0,3	3,1	3,7					
1946				0,0	0,7								
1947			0,0	1,7									
1948		0,0	2,9										
1949	0,2												
...													
1968										3,5			
1969							3,9	3,2	2,5				
1970						3,1	2,1	1,5					
1971					2,7	1,4	0,4						
1972			3,6	2,2	1,0	0,0							
1973		3,1	1,8	0,5	0,1								
1974	2,6	1,4	0,1	0,1									
1975	0,9	0,1	0,0										
1976	0,1	0,1											
1977	0,2												

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Tabelle 48: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 11: Auffindungsjahr 1992. Postkranial. Sicher männlich, verstorben im 27. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 150,9 ± 0,8 pMC (vgl. Anhang 13 und 46).

Geburts-Jahr	Lebensjahr								
	19	20	21	22	23	24	25	26	**27**
1949					4,0				
1950		3,4	2,8	2,7	2,9	3,4			
1951	2,5	1,8	1,8	2,0	2,6	3,2			
1952	1,0	1,0	1,4	2,0	2,7	3,6			
1953	0,2	0,9	1,9	2,6	3,5				
1954	0,2	1,7	2,8	3,7					
1955	1,0	2,7							
1956	2,1								
1957	3,7								

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 11 (Anhang 46) handelt es sich um die 1992 aufgefundene nicht-identifizierte Wasserleiche eines sicher männlichen Individuums im Alter von 26 ± 8 Jahren. Der gemessene ^{14}C-Wert von 150,9 ± 0,8 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1963 überschritten. In Abhängigkeit von der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit ergibt sich ein Sterbezeitintervall von 1969 (19- und 20jährig) bis 1974/1975 (19- bis 24jährig), wie Tabelle 48 zu entnehmen ist. Auffällig ist, dass sich für Männer ab dem 25. Lj. keine Übereinstimmungen mehr errechnen lassen. Dies kann sowohl an einer tendenziellen Überschätzung der erreichten Lebensjahre durch die anthropologische Sterbealtersbestimmung liegen, oder aber auch an größeren individuellen Abweichungen von den im Modell FoRCaDa hinterlegten Durchschnittswerten, im Gegensatz zu ID 97 jedoch eher in einer Akzeleration. Somit könnte ID 11 eine Parallele zu ID 49 und ID 83 darstellen (Kap. VI 3.2.1 und nachfolgend). Die besten Übereinstimmungen zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert ergeben sich für alle bis auf einen 19jährig im Jahr 1975 verstorbenen Mann bei einer jährlichen Austauschrate von 6 % (Anhang 46c).

Bei ID 14 (Anhang 47) handelt es sich um 1995 aufgefundene Skelettfragmente eines sicher männlichen Individuums ebenfalls im Alter von 26 ± 8 Jahren. Der gemessene ^{14}C-Wert von 116,5 ± 0,6 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1959 überschritten, womit gleichzeitig die Untergrenze für mögliche Sterbejahre angedeutet ist. Mit dem Modell FoRCaDa lässt sich jedoch als frühestes Sterbejahr das Jahr 1963 berechnen. In Abhängigkeit von der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit ergeben sich zwei Sterbezeitintervalle, deren weitere Einschränkung nur aus dem Befund abgeleitet werden kann (Tabelle 49). Dabei lassen sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Sterbejahr und von den erreichten Lebensjahren die besten Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert für unterschiedliche Austauschraten zwischen 1 und 6 % beobachten:

- Intervall 1: 1963 (19- bis 22jährig)
  1964 (21- bis 28jährig)
  1965 (22- bis 35jährig)
  1966 (23- bis 35jährig) bis 1977 (35jährig), wobei mit jedem Kalenderjahr das mögliche Sterbealter um ein Jahr zunimmt.
  Dabei ergibt sich je jünger bzw. früher ein Individuum verstorben ist, eine höhere Austauschrate (Anhang 47c).
- Intervall 2: 1993 (19- bis 21jährig) bis 1995 (19- bis 24jährig).
  Dabei ergibt sich mit Ausnahme von höchstens 20jährig im Jahr 1995 verstorbene Männer eine Austauschrate von 6 % (Anhang 47c).

Tabelle 49: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 14: Auffindungsjahr 1995. AMS-Technik. Kranial. Sicher männlich, verstorben im 27. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 116,5 ± 0,6 pMC (vgl. Anhang 13 und 47).

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	19	20	21	22	23	24	25	26	**27**	28	29	30	31	32	33	34	35
1931																	1,1
1932																1,1	1,0
1933															1,1	1,0	1,5
1934														1,1	1,1	1,4	1,3
1935													1,0	1,2	1,3	1,4	0,2
1936												0,7	1,3	1,0	1,7	0,5	1,4
1937										4,0	0,2	0,8	0,5	1,2	1,0	0,9	0,8
1938									3,2	0,7	0,1	0,4	0,3	1,9	0,0	1,7	1,3
1939								1,7	0,1	1,1	1,1	1,3	0,2	1,6	1,0	0,3	1,3
1940							0,1	0,5	0,9	0,9	0,1	1,8	0,4	1,0	2,2	1,3	0,5
1941						0,2	0,9	0,1	0,2	1,5	0,1	1,6	1,2	0,1	0,7	1,5	2,1
1942				2,7	0,6	0,4	0,2	0,5	1,3	0,8	0,5	1,6	1,8	1,2	0,6	0,0	0,4
1943			0,5	0,2	0,7	0,4	1,0	0,1	1,0	1,9	1,4	0,8	0,4	0,0	0,3	0,6	0,9
1944		0,3	1,5	2,6	3,6												
1945	0,1																
...																	
1972					4,0	3,2											
1973			3,5	2,8	2,1												
1974		2,7	1,7	1,1													
1975	2,3	1,0	0,0														
1976	0,6	0,1															
1977	0,1																

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
Schwarzer Halbrahmen: Markierung des Sterbejahres 1959, dem Jahr, in dem der gemessene ^{14}C-Wert in der Atmosphäre erstmals überschritten wurde.
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 9 (Anhang 48) handelt es sich um 1980 aufgefundene Fragmente des (post-kranialen) Skelettes eines sicher männlichen Individuums mit einem Alter von 29 ± 8 Jahren. Der gemessene ^{14}C-Wert von 139,0 ± 1,4 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1963 überschritten, womit die Untergrenze für mögliche Sterbejahre angedeutet ist. In Abhängigkeit von der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit ergibt sich ein Sterbezeitintervall, welches sich in Abhängigkeit von den erreichten Lebensjahren weiter strukturieren lässt, wie Tabelle 50 zu entnehmen ist, z. B ergeben sich für:

- 38jährig verstorbene Männer Sterbejahre von 1977 bis 1980
- 35jährig verstorbene Männer Sterbejahre von 1974 bis 1980
- 30jährig verstorbene Männer Sterbejahre von 1972 bis 1980
- 25jährig verstorbene Männer Sterbejahre von 1968 bis 1977 sowie 1979 und 1980
- 22jährig verstorbene Männer Sterbejahre von 1966 bis 1973 und von 1977 bis 1980.

Anhand der Berechnungen ist daher mit einem Sterbejahr vor 1966 nicht zu rechnen. Weitere Einschränkungen müssen aus dem Befund abgleitet werden, die eventuell einen Hinweis auf älter (mindestens 30 Jahre alt) und später verstorben (frühestens ab 1972) ergeben. Für ID 9 lassen sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Sterbejahr und von den erreichten Lebensjahren die besten Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert für unterschiedliche Austauschraten zwischen 1 und 6 % beobachten. So findet sich z. B. eine Rate von 6 % bei 1980 verstorbenen Individuen für höchstens 28jährige bzw. mindestens 36jährige Männer (Anhang 48c).

Tabelle 50: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 9: Auffindungsjahr 1980. Postkranial. Sicher männlich, verstorben im 30. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 139,0 ± 1,4 pMC (vgl. Anhang 13 und 48).

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	22	23	24	25	26	27	28	29	**30**	31	32	33	34	35	36	37	38
1940														3,9	3,8	3,7	3,8
1941												3,8	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4
1942										3,5	3,2	3,0	2,9	2,9	2,9	3,0	3,2
1943							3,4	2,7	2,2	2,0	1,8	1,8	1,8	2,0	2,1	2,4	2,7
1944			3,8	2,8	1,9	1,2	0,7	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,1	1,6	
1945	2,3	1,2	0,4	0,3	0,1	0,4	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,3	0,0	0,1	0,4		
1946	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0			
1947	0,4	0,0	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2				
1948	0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1					
1949	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0						
1950	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7							
1951	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,0	1,9								
1952	3,4	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9									
1953				3,9	3,8	3,7	3,3										
1954					4,0	3,2											
1955				3,8	3,0												
1956			3,5	2,8													
1957	3,8	3,1	2,4														
1958	2,7	2,0															
1959	1,6																

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
Schwarzer Halbrahmen: Markierung des Sterbejahres 1962, dem Jahr, in dem der gemessene ^{14}C-Wert in der Atmosphäre erstmals überschritten wurde.
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 49 (Anhang 49, Tab. 51, 52) handelt es sich um postkraniale Skelettfragmente eines 1995 im 31. Lj. verstorbenen Mannes. Der gemessene ^{14}C-Wert von 141,1 ± 1,2 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1963 überschritten, womit die Untergrenze für mögliche Sterbejahre angedeutet ist. Für 31jährig verstorbene Männer werden Geburtsjahre von 1944 bis 1963 ausgegeben, was einem Sterbezeitintervall von 1977 bis 1993 entspricht. Das tatsächliche Sterbejahr wird somit um mindestens 2 Jahre unterschätzt. Für 31jährig im Jahr 1995 verstorbene Männer ergibt sich dagegen die beste Übereinstimmung zwischen beiden ^{14}C-Werten bei einer jährlichen Austauschrate von 1 % und beträgt 7,7 pMC bzw. 11 s.

Tabelle 51: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 49: Sterbejahr 1995. AMS-Technik. Postkranial. Sicher männlich, verstorben im 31. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 141,1 ± 1,2 pMC (vgl. Anhang 13 und 49, Kap. V1.3.1, VI 1.3.1).

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	23	24	25	26	27	28	29	30	**31**	32	33	34	35	36	37	38	39
1943										3,9	3,9	3,9					
1944					3,2	2,6	2,1	2,0	1,9	2,0	2,2	2,4	2,7	3,1	3,6		
1945	3,1	2,2	1,4	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,7	2,3	2,9	3,6	
1946	0,2	0,0	0,4	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,3	0,0	0,1	0,5	1,1	1,8	2,6	3,3	
1947	0,1	0,3	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	1,0	1,8	2,6	3,3	
1948	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1	0,3	1,1	1,9	2,5	3,2	3,7
1949	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	0,5	1,2	1,8	2,3	2,7	3,1
1950	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,4	0,9	1,3	1,7	1,9	2,2
1951	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
1952	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,3
1953	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,1	1,2	0,3	0,1	0,0	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3
1954	3,5	3,4	3,3	2,9	2,0	1,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,5
1955	3,8	3,5	2,7	1,8	0,9	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,0	0,4	0,6
1956	3,1	2,3	1,5	0,6	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,0	0,3	0,7	0,5
1957	1,9	1,1	0,2	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,4	0,3	0,1	0,4	0,7	0,4	0,2
1958	0,6	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1	0,3	0,6	0,5	0,3	0,0	
1959	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2	0,1	0,4	0,1	0,2	0,6	0,5	0,2	0,0	0,3		
1960	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,2	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0			
1961	0,3	0,0	0,3	0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	1,8				
1962	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5					
1963	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2						
1964	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,8											
1965																	

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Muss dagegen bei der (simulierten) Liegezeitbestimmung auf eine anthropologische Altersbestimmung zurückgegriffen werden, lässt sich zwar ein Zusammenhang mit den erreichten Lebensjahren erkennen. Jedoch ergibt sich in Abhängigkeit von der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit von $^{14}C_{gemessen}$ ± 4 s auch hierbei für das Geburtsjahr von 1965 keine Übereinstimmung für Individuen zwischen dem 23. und 39. Lj.. Es lassen sich die besten Übereinstimmungen zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert in Abhängigkeit von den erreichten Lebensjahren und dem Sterbejahr bei unterschiedlichen Austauschraten erkennen, wobei sich zwei ineinandergreifende Intervalle andeuten. Für beide gilt: Je jünger und früher ein Individuum verstorben ist, um so höher ist die Austauschrate. Der Übergang zwischen beiden Intervallen deutet sich dabei für höchstens 32jährig in den Jahren 1978 bis 1980 verstorbene Männer an (Anhang 49c).

Tabelle 52: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ für Fett
ID 49: Geburtsjahr 1965. AMS-Technik. Postkranial. Sicher männlich, verstorben im 31. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 113,7 ± 0,55 pMC (vgl. Anhang 13, 15, Kap. V1.3.1, VI 1.3.1).

1/t_C	3 HWZ_{bio} (Austausch von 99,6 %)	8 HWZ_{bio} (Austausch von 99,6 %)	Lebensjahr	25	26	27	28	29	30	**31**	*32*	*33*	*34*	*35*
			Sterbejahr	1989	1990	1991	1992	1993	1994	**1995**	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*
66 %	3,2	8,4		5,0	3,1	1,2	0,0	1,3	2,5	3,8	*5,3*	*7,0*	*8,2*	*9,3*
50 %	4,2	11,1		5,9	4,0	2,1	0,8	0,6	1,9	3,2	*4,6*	*6,2*	*7,6*	*8,7*
40 %	5,2	13,9		6,8	5,0	3,1	1,6	0,2	1,1	2,5	*3,9*	*5,5*	*6,8*	*8,0*
25 %	8,3	22,2		9,8	7,9	5,9	4,3	2,7	1,3	0,2	*1,6*	*3,2*	*4,6*	*5,9*
20 %	10,4	27,7		11,7	9,8	7,8	6,2	4,5	3,0	1,5	*0,0*	*1,6*	*3,0*	*4,4*

$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün ≤ 2, grau ≤ 3, Rahmen fett ≤ 4, kursiv „Sterbejahr“ nach 1995

Für ID 49 liegt zusätzlich ein ^{14}C-Wert für Fett vor. Bei Fett ist mit deutlich höheren Austauschraten als für Kollagen zu rechnen. Für eine erste Näherung werden hier zwischen 20 und 66 % angenommen (Tabelle 52). Danach ergeben sich für einen 1965 geborenen Mann Übereinstimmungen, wenn dieser zwischen dem 26. und 34. Lj. verstorben ist. Bei einer Austauschrate von jährlich 66 % und damit einer biologischen HWZ_{bio} von 1,05 Jahren haben auf den berechneten ^{14}C-Wert Effekte aus der Zeit des Skelettwachstums keinen Einfluss mehr, sollten jedoch bei der Interpretation der Werte für jüngere Männer und vor allem bei den niedrigeren Austauschraten berücksichtigt werden (Tabelle 51). Bei aller notwendigen Zurückhaltung heisst das jedoch für den vorliegenden Vergleich von Kollagen- und Fettprobe, dass bei der Interpretation des Fett-Wertes Einflüsse des Gewebealters bzw. des Reservoirs eine deutlich geringere Rolle spielen und dieser daher zur Festlegung eines Sterbezeitintervalls besser geeignet ist. Jedoch muss bei Fettproben prinzipiell auch mit zwei Sterbezeitintervallen gerechnet werden. Dagegen sind bei der Kombination der Messwerte für beide Gewebefraktionen die besten Ansätze für eine präzise und richtige Liegezeitbestimmung gegeben. Im Vergleich beider Gewebefraktionen für ID 49 werden die Probleme einer materialsparenden Probengewinnung bei der AMS-Technik erneut unterstrichen (vgl. Kap. V 1.3.1, VI 1.3.1, V 3.3, VI 3.2.1).

Dass enstprechende Probleme nicht nur bei der AMS-Technik auftreten, wird am nachfolgenden Beispiel von ID 83 (Anhang 50) dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Probe vom prostkranialen Skelett eines 1991 im 37. Lj. verstorbenen Mannes. Wie Tabelle 53 zu entnehmen ist, lassen sich für diese Probe keine Übereinstimmungen zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert sogar für ein Intervall von $^{14}C_{gemessen}$ ± 6 s finden. Die beste Übereinstimmung zwischen beiden ^{14}C-Werten ergibt bei einer jährlichen Austauschrate von

1 % und beträgt 8,6 pMC bzw. 8,6 s. Muss bei dem (simulierten) Liegezeitbestimmung auf ein anthropologisch bestimmtes Alter (37 ± 10 Jahre) zurückgegriffen werden, lässt sich ebenfalls keine zufriedenstellende Übereinstimmung für Individuen zwischen dem 27. und 47. Lj. erzielen. Dabei werden die besten Übereinstimmungen zwischen beiden ^{14}C-Werten für Austauschraten von mindestens 3,5 % erreicht (Anhang 50c).

Allerdings wurde der gemessene ^{14}C-Wert von 151,0 ± 1,0 pMC in der Atmosphäre das erste Mal 1963 überschritten, sodass sich damit eine Untergrenze für mögliche Sterbejahre ergibt.

Eine Vertauschung oder Verunreinigung bei der Beprobung von ID 83 kann mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden. Daher findet dieses Ergebnis nur eine Erklärung, wenn deutliche Abweichungen zwischen individueller Entwicklung und der im Modell FoRCaDa hinterlegten durchschnittlichen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ (ΔSM) angenommen werden, die z. B. auch in unerkannten pathologischen Prozessen begründet sein könnten. Da die in Tabelle 53 dargestellten Ergebnisse so auffällig von den Erwartungen abweichen, würde man anhand dieser Probe eher keine Liegezeitbestimmung vornehmen. Es wäre in einem solchen Fall also eine erneute Messung für Kollagen und evtl. parallel dazu von Fett anzuraten.

Tabelle 53: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 83: Sterbejahr 1991. Postkranial. Sicher männlich, verstorben im 37. Lj. ± 10 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 151,0 ± 1,0 pMC (vgl. Anhang 13 und 50).

Geburts-Jahr	Lebensjahr										
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	**37**
1947	6,0										
1948	5,1	5,6									
1949	4,7	5,4									
1950	4,7	5,5									
1951	4,9	5,7									
1952	5,4										
1953	5,9										
1954											
1955											

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr

Werte grau: > 4 und ≤ 6

V 3.5.4 Ältere Erwachsene (mittleres Alter ≥ 40 Jahre: matur und senil): ID 77, 13, 59, 66, 69, 45, 15, 16 und 17

Bei ID 77 (Anhang 51) handelt es sich um kraniale Skelettfragmente eines 1988 im 42. Lj. verstorbenen Mannes. Diese Probe ist wegen ihres auffälligen Messwertes bereits mehrfach diskutiert worden (vgl. Kap. V 3.3, VI 3.2.1). Der gemessene ^{14}C-Wert von 147,9 ± 1,1 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1963 überschritten, womit gleichzeitig die Untergrenze für ein Sterbezeitintervall angedeutet ist. Für 42jährig verstorbene Männer ergeben sich für einen Geburtszeitraum von 1946 bis 1957 keine Übereinstimmungen bei tolerierten Abweichungen bis zu 6s. Für das Geburtsjahr 1947 beträgt die beste Übereinstimmung 13,7 s bei Austauschraten von 3,0 bzw. 3,5 %. Wird bei der (simulierten) Liegezeitbestimmung auf ein anthropologisch bestimmtes Alter von 42 ± 10 Jahre zurückgegriffen, ergeben sich Übereinstimmungen nur für 1985 bis 1987 und im 32. bzw. 33. Lj. verstorbene Männer (Tab. 54). Dabei ergeben sich die besten Übereinstimmungen zwischen beiden ^{14}C-Werten für ein Sterbejahr vor 1981 bei einer Austauschrate von 6 % und ab dem Sterbejahr 1984 bei einer Rate von 1 % (Anhang 51c).

Tabelle 54: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 77: Sterbejahr 1988. Kranial. Sicher männlich, verstorben im 42. Lj. ± 10 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 147,9 ± 1,1 pMC (vgl. Anhang 13 und 51).

Geburts-Jahr	Lebensjahr										
	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	**42**
1946	5,6										
1947	4,9	5,6									
1948	4,8	5,7									
1949	5,1	5,9									
1950	5,3	6,0									
1951	5,2	5,7									
1952	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	6,0					
1953	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1						
1954	3,9	4,1	4,3	4,6							
1955	3,7	4,0	4,2								
1956	3,8	4,1									
1957	4,1										

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
$|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: Rahmen fett ≤ 4, Werte grau > 4 und ≤ 6

Eine Vertauschung oder Verunreinigung bei der Beprobung kann mit großer Sicherheit für ID 77 ausgeschlossen werden. Daher findet dieses Ergebnis nur eine Erklärung, wenn deutliche Abweichungen zwischen individueller Entwicklung und der im Modell FoRCaDa hinterlegten durchschnittlichen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ angenommen werden, die z. B. neben unerkannten pathologischen Prozessen durch die Probenentnahme am Schädel begründet sein könnte (vgl. Kap. II 5.4.5). Da die in Tabelle 54 dargestellten Ergebnisse so auffällig von den Erwartungen abweichen, würde man anhand dieser Probe keine Liegezeitbestimmung vornehmen. In einem solchen Fall wäre eine erneute Messung für Kollagen und evtl. von Fett anzuraten. Damit stellt ID 77 eine Parallele zu ID 83 und ID 49 dar, die in Kapitel V 3.4.3 bereits vorgestellt wurden.

Tabelle 55: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 13: Auffindungsjahr 1995. AMS-Technik. Kranial. Sicher männlich, verstorben im 44. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 108,1 ± 1,1 pMC (vgl. Anhang 13 und 52).

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	36	37	38	39	40	41	42	43	**44**	45	46	47	48	49	50	51	52
1912																	0,4
1913																0,4	0,6
1914															0,4	0,6	0,6
1915														0,4	0,6	0,5	0,5
1916													0,4	0,6	0,5	0,5	0,7
1917												0,4	0,6	0,5	0,5	0,7	0,7
1918											0,4	0,7	0,5	0,4	0,7	0,7	1,7
1919										0,4	0,7	0,5	0,4	0,7	0,7	1,7	0,8
1920									0,3	0,7	0,5	0,4	0,8	0,6	1,8	0,8	0,1
1921								0,3	0,7	0,4	0,4	0,8	0,6	1,8	0,8	0,1	0,9
1922							0,3	0,7	0,4	0,3	0,8	0,6	1,9	0,9	0,0	0,9	1,6
1923						0,3	0,8	0,4	0,3	0,9	0,5	1,8	0,9	0,0	0,8	1,5	2,2
1924					0,3	0,8	0,3	0,3	0,9	0,5	1,8	1,0	0,1	0,8	1,5	2,1	2,5
1925				0,3	0,8	0,3	0,2	0,9	0,5	1,8	1,0	0,1	0,7	1,4	2,1	2,6	2,1
1926			0,3	0,8	0,3	0,2	1,0	0,4	1,7	1,1	0,1	0,7	1,4	2,1	2,6	2,2	1,8
1927		0,2	0,9	0,3	0,2	1,0	0,4	1,7	1,1	0,2	0,7	1,4	2,0	2,6	2,2	1,8	1,4
1928	0,2	0,9	0,2	0,2	1,0	0,4	1,7	1,1	0,2	0,6	1,3	2,0	2,6	2,2	1,9	1,5	1,2
1929	0,9	0,2	0,1	1,1	0,3	1,7	1,1	0,2	0,6	1,3	2,0	2,6	2,3	1,9	1,5	1,2	0,9
1930	0,2	0,1	1,1	0,3	1,6	1,2	0,3	0,6	1,3	1,9	2,5	2,3	1,9	1,6	1,2	1,0	0,7
1931	0,1	1,1	0,3	1,6	1,2	0,3	0,5	1,2	1,9	2,5	2,4	2,0	1,6	1,3	1,0	0,7	0,5
1932	1,2	0,2	1,6	1,3	0,4	0,5	1,2	1,9	2,4	2,4	2,0	1,7	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3
1933	0,2	1,6	1,3	0,4	0,5	1,2	1,9	2,4	2,4	2,0	1,7	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3	0,1
1934	1,6	1,2	0,3	0,5	1,2	1,9	2,5	2,4	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3	0,1	0,0
1935	1,1	0,2	0,6	1,3	2,0	2,6	2,3	1,9	1,5	1,2	0,9	0,6	0,4	0,2	0,0	0,2	0,3
1936	0,1	1,0	1,7	2,3	2,3	1,9	1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8
1937	1,5	2,2	2,2	1,8	1,3	1,0	0,6	0,3	0,0	0,2	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4
1938	1,7	1,2	0,8	0,4	0,0	0,4	0,7	0,9	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,3	2,3
1939	0,5	0,9	1,3	1,7	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7	3,7	3,8	3,9
1940	3,0	3,4	3,7														

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
Schwarzer Halbrahmen: Markierung des Sterbejahres 1958, dem Jahr, in dem der gemessene ^{14}C-Wert in der Atmosphäre erstmals überschritten wurde.
$|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 13 (Anhang 52) handelt es sich um 1995 aufgefundene kraniale Skelettfragmente eines sicher männlichen Individuums im Alter von 43 ± 8 Jahren. Der gemessene ^{14}C-Wert von 108,1 ± 0,7 pMC wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1958 überschritten, womit die Untergrenze für ein Sterbezeitintervall angedeutet ist. Weiterhin wurde die Suche von übereinstimmenden ^{14}C-Werten ab einem Geburtsjahr von 1907 durchgeführt (1958 abzüglich maximaler 52 Lj. plus 1 Jahr). Die Ergebnisse sind in Tabelle 55 dargestellt. Danach ergibt sich unter Verwendung des Modells FoRCaDA als frühestmögliches Sterbejahr in Abhängigkeit von der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit für 36- bis 52jährige Männer das Jahr 1963. In Abhängigkeit von den erreichten Lebensjahren ergibt sich weiterhin als Obergrenze für einen 36jährigen Mann das Sterbejahr 1975 und für einen 52jährigen das Jahr 1990. Damit ist eine Liegzeit von mindestens 5 Jahren mit hoher Sicherheit anzunehmen. Jedoch können weitere Einschränkungen innerhalb des Übereinstimmungsbereiches nur aus dem Befund abgeleitet werden. Die besten Übereinstimmungen zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert lassen sich spätestens ab dem Sterbejahr 1970 für Austauschraten $\leq$ 1,5 % beobachten, nachdem diese kontinuierlich von einer Rate von 5,5 % im Sterbejahr 1963 abgenommen haben (Anhang 52c).

Nachfolgend werden ID 59 und 66 besprochen, für die wie für ID 49, 15 und 16 ein ^{14}C-Wert für Kollagen und Fett vorliegt (Anhang 15). Ergebnisse zu beiden Individuen wurden bereits in Kapitel V 1.3.1 (Abb. 22) vorgestellt und in Kapitel VI 1.3.1 diskutiert. Es wurde bereits die Möglichkeit einer qualitativen Datierungs-Hilfe aus der Kombination beider Messwerte dargelegt, die hier konkretisiert und als quantitives Verfahren erweitert werden soll. Es wird deutlich: Es gelingt eine präzisere Bestimmung der Liegezeit als dies unter Verwendung nur eines Messwertes möglich wäre. Jedoch lässt sich auch für dieses Vorgehen die Vorstellung einer „punktgenauen“ Zuordung nicht bedienen, da zum Einen die Übereinstimmungsgenauigkeit von ± 4s berücksichtigt werden muss, zum Anderen eine anthropologische Altersbestimmung bei erwachsenen Individuen immer mehrere Jahre umfasst.

Für ID 59 (Anhang 53, Tab. 56) können bei einer simulierten Liegezeitbestimmung mit dem Sterbejahr 1974 als Obergrenze folgende Ergebnisse festgehalten werden:

(1) Für die Kollagenprobe mit 112,7 ± 1,2 pMC ergibt sich ein homogenes Sterbeintervall von 1963 bis 1974, wobei fast alle Werte in dem Übereinstimmungsbereich von ± 2 s um den Messwert liegen

(2) Für die Fettprobe mit 145,7 ± 1,3 pMC ergeben sich dagegen zwei Sterbeintervalle:
- 1962 bis 1966, wobei im Jahr 1962 erstmalig die für Fett gemessene ^{14}C-Konzentration überschritten wurde und
- 1971 bis 1974, wobei im Jahr 1972 erstmalig dieser Wert wieder unterschritten wurde.

Durch die Kombination beider Intervalle lässt sich somit eine Eingrenzung auf 8 anstatt von 12 Jahren vornehmen, wobei verstorbene Männer zwischen dem 39. und 55. Lj. eingeschlossen sind. Auch wird deutlich, dass mit dem Modell FoRCaDa die unterschiedlichen ^{14}C-Werte für Kollagen von 112,7 ± 1,2 pMC und für Fett von 145,7 ± 1,3 pMC plausibel erklärt werden können, wenn für Kollagen Austauschraten bis maximal 6 % und für Fett von mindestens 20 % angenommen werden. Gelänge eine weitere Begrenzung bei den Austauschraten, würde sich die Anzahl entsprechender Jahre weiter einschränken lassen, was jedoch späteren Projekten überlassen ist. Bis dahin müsste diese – wenn möglich – aus dem Befund abgeleitet werden.

Tabelle 56: Orientierender Vergleich der in Anteile von der jeweils gemessenen Standardabweichung umgerechneten absoluten Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ für Kollagen und Fett
ID 59: Geburtsjahr 1928. Postkranial. Sicher männlich, verstorben im 47. Lj. ± 8 Jahre,
Kollagen: $^{14}C_{gemessen}$ 112,7 ± 1,2 pMC; Fett: $^{14}C_{gemessen}$ 145,7 ± 1,3 pMC (vgl. Anhang 13, 15 und 53, Kap. V1.3.1, VI 1.3.1).

Geburts-	Lebensjahre																
Jahr	39	40	41	42	43	44	45	46	**47**	48	49	50	51	52	53	54	55
1910																40/50	≤25
1911															40/50	≤25	≤25
1912														40/50	≤25	≤25	≤25
1913													40/50	≤25	≤25	≤25	
1914												40/50	≤25	≤25	≤25		
1915											40/50	≤25	≤25	≤25			
1916										40/50	≤25	≤25	≤25				
1917									40/50	≤25	≤25	≤25					≥40
1918								40/50	≤25	≤25	≤25					≥40	≤66
1919							40/50	≤25	≤25	≤25					≥40	≤66	≤66
1920						40/50	≤25	≤25	≤25					≥40	≤66	≤66	≤50
1921					40/50	≤25	≤25	≤25					≥40	≤66	≤66	≤50	
1922				40/50	≤25	≤25	≤25					≥40	≤66	≤66	≤50		
1923			40/50	≤25	≤25	≤25					≥40	≤66	≤66	≤50			
1924		40/50	≤25	≤25	≤25					≥40	≤66	≤66	≤50				
1925	40/50	≤25	≤25	≤25					≥40	≤66	≤66	≤50					
1926	≤25	≤25	≤25					≥40	≤66	≤66	≤50						
1927	≤25	≤25					≥40	≤66	≤66	≤50							
1928	≤25					≥40	≤66	≤66	≤50								
1929					≥40	≤66	≤66	≤50									
1930				≥40	≤66	≤66	≤50										
1931			≥40	≤66	≤66	≤50											
1932		≥40	≤66	≤66	≤50												
1933	≥40	≤66	≤66	≤50													
1934	≤66	≤66	≤50														
1935	≤66	≤50															
1936	≤50																

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
Halbrahmen: Übereinstimmungsbereich für Kollagen und Fett
für Kollagen: $(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$:
grün ≤ 2, grau ≤ 3, innerhalb des stark umrandeten Bereiches und weiß ≤ 4
für Fett Zahlen entsprechen den Austauschraten für die $(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}|) / s \leq 4$

Tabelle 57: Orientierender Vergleich der in Anteile von der jeweils gemessenen Standardabweichung umgerechneten absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$ für Kollagen und Fett
ID 66: Geburtsjahr 1937. Kranial. Sicher männlich, verstorben im 49. Lj. ± 8 Jahre,
Kollagen: $^{14}C_{gemessen}$ 111,4 ± 1,2 pMC; Fett: $^{14}C_{gemessen}$ 123,8 ± 2,0 pMC (vgl. Anhang 13, 15 und 54, Kap. V 1.3.1, VI 1.3.1).

Geburts-	Lebensjahre																
Jahr	41	42	43	44	45	46	47	48	**49**	50	51	52	53	54	55	56	57
1908												66	≥40	≥40	≤50	≤25	
1909											66	≥40	≥40	≤50	≤25		
1910										66	≥40	≥40	≤50	≤25			
1911									66	≥40	≥40	≤50	≤25				
1912								66	≥40	≥40	≤50	≤25					
1913							66	≥40	≥40	≤50	≤25						
1924						66	≥40	≥40	≤50	≤25							
1915					66	≥40	≥40	≤50	≤25								
1916				66	≥40	≥40	≤50	≤25									
1917			66	≥40	≥40	≤50	≤25										
1918		66	≥40	≥40	≤50	≤25											
1919	66	≥40	≥40	≤50	≤25												
1920	≥40	≥40	≤50	≤25													
1921	≥40	≤50	≤25														
1922	≤50	≤25															
1923	≤25																66
1924																66	≥40
1925															66	≥40	≥40
1926														66	≥40	≥40	≤66
1927													66	≥40	≥40	≤66	≤66
1928												66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66
1929											66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66
1930										66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66	
1931									66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66		
1932								66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66			
1933							66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66				
1934						66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66					
1935					66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66						
1936				66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66							
1937			66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66								
1938		66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66									
1939	66	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66										
1940	≥40	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66											
1941	≥40	≤66	≤66	≤66	≤66												
1942	≤66	≤66	≤66	≤66													

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
Halbrahmen: Übereinstimmungsbereich für Kollagen und Fett
für Kollagen: $(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$:
grün ≤ 2, grau ≤ 3, innerhalb des stark umrandeten Bereiches und weiß ≤ 4
für Fett Zahlen entsprechen den Austauschraten für die $(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}|) / s \leq 4$

Bei ID 66 handelt es sich um einen Mann, der 1985 im 49. Lj. verstorben ist. Für Kollagen wurden 111,4 ± 1,2 pMC und für Fett 123,8 ± 2,0 pMC gemessen. Aus der Kombination beider Werte können bei einer simulierten Liegezeitbestimmung mit dem Sterbejahr 1985 als Obergrenze folgende Ergebnisse festgehalten werden (Anhang 54, Tab. 57):

(1) Für Kollagen ergibt sich ein einheitliches Intervall von 1963 bis 1985, wobei fast alle Werte im Übereinstimmungsbereich von ± 2 s um den Messwert liegen

(2) Für die Fettprobe ergeben sich zwei Intervalle

- 1959 bis 1963, wobei 1962 dem Jahr entspricht, indem der im Fett gemessene Wert erstmalig überschritten wurde. Allerdings liegen die Jahre vor 1963 außerhalb des Bereichs, der sich anhand der Kollagenprobe ergibt und können daher unberücksicht bleiben
- 1979 bis 1982/1985, wobei 1983 dem Jahr entspricht, indem der im Fett gemessene Wert erstmalig wieder unterschritten wurde.

In Zusammenfassung beider Teilergebnisse kann für ID 66 der Zeitraum von 23 Jahren auf 5 bis 8 Jahre eingeschränkt werden, wenn für die späteren Sterbejahre nur Männer ab dem 44. Lj. eingeschlossen werden. Weitere Einschränkungen des Intervalls müssten dagegen aus dem Befund abgeleitet werden.

Bei ID 69 (Anhang 55) handelt es sich um postkraniale Skelettfragmente eines 1991 im 54. Lj. verstorbenen Mannes. Der gemessene ^{14}C-Wert von 109,0 ± 0,8 pMC im Kollagen wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1958 überschritten, womit die Untergrenze für ein Sterbeintervall angedeutet ist. ID 69 entspricht somit etwa Probe ID 13 (s. o.). Die Ergebnisse sind in Tabelle 58 dargestellt. Für 54jährig verstorbene Männer ergeben sich Sterbejahre von 1963 bis 1991. Um eine Intervallsuche zu simulieren, wird mit dem Modell FoRCaDa nach Übereinstimmungen in einem Altersbereich von 53 ± 8 Jahren beginnend ab einem Geburtsjahr von 1897 gesucht (1958 abzüglich 62 Jahre plus 1 Jahr). Als frühestmögliches Sterbejahr ergibt sich in Abhängigkeit von der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit für 46- bis 62jährige Männer das Jahr 1963. In Abhängigkeit von den erreichten Lebensjahren ergibt sich weiterhin als Obergrenze für einen 46jährigen Mann das Sterbejahr 1985 und für einen 62jährigen Mann das Jahr 1991. Weitere Einschränkungen innerhalb des Übereinstimmungsbereiches können nur aus dem Befund abgeleitet werden. Spätestens ab dem Sterbejahr 1971 lassen sich die besten Übereinstimmungen zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert für Austauschraten $\leq$ 1,5 % beobachten, nachdem diese kontinuierlich von einer Rate von 6,0 % im Sterbejahr 1963 abgenommen haben (Anhang 55c).

Tabelle 58: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 69: Sterbejahr 1991. Postkranial. Sicher männlich, verstorben im 54. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 109,0 ± 0,8 pMC (vgl. Anhang 13 und 55).

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	46	47	48	49	50	51	52	53	**54**	55	56	57	58	59	60	61	62
1902																	0,3
1903																0,3	0,0
1904															0,3	0,0	0,5
1905														0,3	0,0	0,5	0,5
1906													0,3	0,0	0,5	0,5	1,2
1907												0,3	0,0	0,5	0,5	1,1	0,3
1908											0,3	0,0	0,5	0,6	1,1	0,3	0,9
1909										0,3	0,1	0,6	0,6	1,1	0,3	0,8	1,5
1910									0,3	0,1	0,6	0,6	1,1	0,3	0,8	1,6	0,8
1911								0,3	0,1	0,6	0,6	1,1	0,4	0,8	1,6	0,8	0,1
1912							0,3	0,1	0,6	0,6	1,0	0,4	0,7	1,6	0,8	0,1	0,5
1913						0,3	0,1	0,6	0,7	1,0	0,4	0,7	1,7	0,9	0,2	0,5	1,0
1914					0,3	0,1	0,6	0,7	1,0	0,4	0,7	1,7	0,9	0,2	0,4	1,0	1,5
1915				0,3	0,1	0,7	0,7	1,0	0,5	0,7	1,7	0,9	0,2	0,4	1,0	1,5	2,0
1916			0,2	0,1	0,7	0,7	1,0	0,5	0,7	1,7	0,9	0,2	0,4	1,0	1,5	2,0	2,3
1917		0,2	0,1	0,7	0,7	1,0	0,5	0,7	1,7	1,0	0,2	0,4	1,0	1,5	1,9	2,4	2,0
1918	0,2	0,1	0,7	0,7	0,9	0,5	0,6	1,7	1,0	0,3	0,4	0,9	1,4	1,9	2,3	2,1	1,8
1919	0,2	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	1,7	1,0	0,3	0,3	0,9	1,4	1,9	2,3	2,1	1,8	1,6
1920	0,7	0,8	0,9	0,6	0,6	1,7	1,0	0,3	0,3	0,9	1,4	1,9	2,3	2,1	1,9	1,6	1,4
1921	0,8	0,9	0,6	0,6	1,6	1,1	0,4	0,3	0,9	1,4	1,8	2,3	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2
1922	0,9	0,6	0,5	1,6	1,1	0,4	0,2	0,8	1,3	1,8	2,2	2,2	1,9	1,7	1,4	1,2	1,1
1923	0,7	0,5	1,6	1,1	0,4	0,2	0,8	1,3	1,8	2,2	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0
1924	0,5	1,6	1,2	0,5	0,2	0,7	1,3	1,7	2,2	2,3	2,0	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,8
1925	1,5	1,2	0,5	0,1	0,7	1,2	1,7	2,1	2,3	2,1	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8
1926	1,3	0,5	0,1	0,7	1,2	1,7	2,1	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7
1927	0,5	0,1	0,7	1,2	1,6	2,1	2,4	2,1	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6
1928	0,1	0,6	1,1	1,6	2,1	2,4	2,1	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
1929	0,6	1,1	1,6	2,0	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5
1930	1,1	1,6	2,0	2,4	2,2	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
1931	1,5	2,0	2,4	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	
1932	1,9	2,4	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5		
1933	2,4	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5			
1934	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5				
1935	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4					
1936	1,4	1,2	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1						
1937	0,7	0,5	0,4	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3							
1938	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	1,0	**1,0**								
1939	1,8	1,9	2,0	2,1	2,1	2,2	2,3	2,3									
1940	3,5	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8										

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
Schwarzer Halbrahmen: Markierung des Sterbejahres 1958, dem Jahr, in dem der gemessene ^{14}C-Wert in der Atmosphäre erstmals überschritten wurde.
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Bei ID 45 (Anhang 56) handelt es sich um postkraniale Skelettfragmente einer 1968 im 86. Lj. verstorbenen Frau. Der gemessene ^{14}C-Wert von 102,1 ± 0,8 pMC im Kollagen wurde in der Atmosphäre das erste Mal 1956 überschritten, womit die Untergrenze des Sterbezeitintervalls im Rahmen der Messgenauigkeit markiert ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 59 dargestellt. Für im 86. Lj. verstorbene Frauen ergeben sich Sterbejahre von 1950

bis 1968. Für das Sterbejahr 1968 ergibt sich bei einer Austauschrate von 1 % die kleinste Abweichung zwischen beiden ^{14}C-Werten mit 2,8 s. Um eine Intervallsuche zu simulieren, wird in einem Altersbereich von 85 ± 8 Jahren beginnend ab dem möglichen Geburtsjahr 1865 gesucht (1956 abzüglich 93 Jahre plus 1 Jahr < 1865). Als Obergrenze für das Sterbezeitintervall ergibt sich weiterhin in Abhängigkeit von der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit für 78- bis 94jährige Frauen das Jahr 1968. Eine Untergrenze lässt sich dagegen mit dem Modell FoRCaDa nicht ermitteln. Diese wird durch das Jahr 1865 als erstem verfügbaren Geburtsjahr markiert. Weitere Einschränkungen innerhalb des Übereinstimmungsbereiches können nur aus dem Befund abgeleitet werden. Die besten Übereinstimmungen zwischen beiden ^{14}C-Werten ergeben sich für Frauen, die zwischen dem 78. und 94. Lj. verstorben sind (Anhang 56c):

- Für die Sterbejahre vor 1957 (78- bis 93jährig) und Sterbejahre ab 1964 (78- bis 94jährig) für eine Rate von 1,0 %
- Für die Sterbejahre 1958 bis 1960 (78- bis 94jährig) für eine Rate von 6,0 %
- Für das Sterbejahr 1961 (78- bis 94jährig) für eine Rate von 4,5 %
- Für das Sterbejahr 1962 (78- bis 94jährig) für eine Rate von 3,0 % und
- Für das Sterbejahr 1963 (78- bis 94jährig) für eine Rate von 1,5 %.

Tabelle 59: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 45: Sterbejahr 1968. Postkranial. Sicher weiblich, verstorben im 86. Lj. ± 8 Jahre, $^{14}C_{gemessen}$ 102,1 ± 0,8 pMC (vgl. Anhang 13 und 56).

Geburts-Jahr	Lebensjahr																
	78	79	80	81	82	83	84	85	**86**	87	88	89	90	91	92	93	94
1865	3,6	3,6	3,6	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,7	3,2
1866	3,6	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8	3,7	3,2	1,5
1867	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1
1868	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2
1869	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1
1870	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4
1871	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4
1872	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,5
1873	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,5	1,4
1874	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,5	1,4	2,1
1875	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,6	1,4	2,1	2,8
1876	3,9	3,9	3,9	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,6	1,4	2,1	2,8	
1877	3,8	3,8	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8		
1878	3,8	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8			
1879	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,2	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8				
1880	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,2	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8					
1881	3,2	1,5	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8						
1882	1,5	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,5	2,2	2,9							
1883	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,5	2,2	2,8								
1884	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8									
1885	0,2	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8										
1886	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8											
1887	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8												
1888	0,6	1,4	2,2	2,8													
1889	1,4	2,2	2,8														
1890	2,2	2,8															
1891	2,8																

Sterbejahr= Geburtsjahr – 1 + Lebensjahr
Schwarzer Halbrahmen: Markierung des Sterbejahres 1956, dem Jahr, in dem der gemessene ^{14}C-Wert in der Atmosphäre erstmals überschritten wurde.
$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4

Abschließend werden die Ergebnisse für die Literaturproben ID 15 sowie ID 16 und 17 dargestellt (ROM ET AL. 1997, WILD ET AL. 2000, Anhang 57 bis 59). Die Proben stammen von zwei identifizierten Schwestern, die nach mehrjähriger Liegezeit und unbekanntem Sterbejahr im Jahr 1992 in ihrem Haus aufgefunden wurden. Für beide Schwestern wurde zusätzlich zur Kollagenprobe aus Langknochen eine Fettprobe mit der AMS-Technik gemessen, deren ^{14}C-Werte insgesamt erstmals 1959 erreicht und überschritten wurden. Für ID 16 wurde zusätzlich noch eine Rippe beprobt (ID 17), deren ^{14}C-Wert von 123,7 ± 0,84 pMC im Jahr 1962 ersmals erreicht und überschritten wurde. In Kapitel V 1.3.1 wurden die unterschiedlichen ^{14}C-Messwerte für die beiden ähnlich alten Schwestern bereits vorgestellt und in Kapitel VI 1.3.1 als Ansatz für ein qualitatives Datierungsverfahren diskutiert, die sich nach den Berechnungen mit dem Modell FoRCaDa nicht mehr als so

unterschiedlich darstellen. Weiterhin lassen sich keine qualitativen Unterschiede für die Langknochen- bzw. Rippenprobe feststellen (ID 16 bzw. 17, Tab. 61). Wird eine Intervallsuche für jeweils 77- bis 93jährig verstorbene Frauen mit dem Modell FoRCaDa simuliert, ergibt sich für:

- ID 15 ein Sterbezeitintervall von 1965 bis 1992 (Anhang 57)
- ID 16 ein Sterbezeitintervall von 1963 bis 1992 (Anhang 58)
- ID 17 (gleiche Frau wie ID 16) ein Sterbezeitintervall von 1966 bis 1992 (Anhang 59).

Anhand des Befundes konnte jedoch für beide Schwestern ein Sterbejahr in den 80er Jahren abgeleitet werden, wobei die ältere der beiden Schwestern (ID 15) auch eher verstorben sein soll. Anhand der Berechnungen ergibt sich jedoch auch, dass sich für alle Jahre zwischen 1979 bis 1992 die berechneten ^{14}C-Werte für alle drei Kollagenproben von den gemessenen ^{14}C-Werten maximal um 1,1 s unterscheiden (Tab. 60 und 61). Anhand dieser Werte kann somit nicht unterschieden werden, in welchem Jahr jede der beiden Schwestern oder auch nur welche von beiden zuerst verstorben ist. Im Vergleich dazu lassen die Fettproben eine bessere Eingrenzung der Sterbezeitintervalle erkennen. Dieser Zusammenhang ist jedoch von der angenommenen Austauschrate für Knochenfett abhängig. In jedem Fall ergeben sich für die Fettproben höchstens drei Jahre umfassende Sterbezeitintervalle z. B.:

- Bei einer Austauschrate von 66 % für ID 15 die Sterbejahre 1985 bis 1987 und für ID 16 1986 bis 1988 oder
- Bei einer Austauschrate von 20 % für ID 15 die Sterbejahre 1989 bis 1991 und für ID 16 1990 bis 1992.

Damit unterscheiden sich die Ergebnisse für die Austauschraten zwischen 20 und 66 % deutlich voneinander. Eine Vergleich zwischen den beiden Schwestern ermöglicht dagegen nur das Aufzeigen einer Tendenz, wonach die ältere Schwester zwar etwa ein Jahr eher, aber auch erst nach ihrer jüngeren Schwerster verstorben sein könnte.

Tabelle 60: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 15: Geburtsjahr 1900. Auffindungsjahr 1992. AMS-Technik. Postkranial. Sicher Weiblich (vgl. Anhang 13 bis 15 und 57).

a) Kollagen: $^{14}C_{gemessen}$ 118,2 ± 0,74 pMC.

b) Fett: $^{14}C_{gemessen}$ 119,5 ± 0,47 pMC.

a)

Lebensjahr	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
Sterbejahr	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
	0,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,4

$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2

b)

1/t_C	3 HWZ_{bio} (Austausch von 87,5 %)	8 HWZ_{bio} (Austausch von 99,6 %)	Lebensjahr	85	86	87	88	89	90	91	92	93
			Sterbejahr	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
66 %	3,2	8,4		4,7	2,3	0,5	1,8	4,3	6,5	8,7	11,0	12,3
50 %	4,2	11,1		6,5	3,8	0,9	0,8	3,2	5,4	7,6	9,9	11,4
40 %	5,2	13,9		8,4	5,4	2,5	0,5	1,9	4,2	6,4	8,7	10,4
25 %	8,3	22,2		14,5	11,1	7,9	5,2	2,6	0,0	2,4	4,9	6,9
20 %	10,4	27,7		18,3	14,9	11,5	8,7	5,9	3,2	0,6	2,0	4,2

$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4, graue Zahlen > 4

Tabelle 61: In Anteile von der gemessenen Standardabweichung umgerechnete absolute Differenzen zwischen $^{14}C_{gemessen}$ und $^{14}C_{berechnet(Minimum)}$
ID 16 und 17: Geburtsjahr 1903. Auffindungsjahr 1992. AMS-Technik. Postkranial. Sicher weiblich (vgl. Anhang 13 bis 15, Anhang 58 und 59).

a) Kollagen (ID 16, Langknochen): $^{14}C_{gemessen}$ 112,3 ± 0,89 pMC und
Kollagen (ID 17, Rippe): $^{14}C_{gemessen}$ 123,7 ± 0,84 pMC.

b) Fett (ID 16, Langknochen): $^{14}C_{gemessen}$ 118,4 ± 0,52 pMC.

a)

Lebensjahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Sterbejahr	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Langknochen	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
Rippe	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1

$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2

b)

1/t_C	3 HWZ_{bio} (Austausch von 87,5 %)	8 HWZ_{bio} (Austausch von 99,6 %)	Lebensjahr	83	84	85	86	87	88	89	90
			Sterbejahr	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
66 %	3,2	8,4		4,2	1,7	0,4	1,8	3,8	5,7	7,8	9,0
50 %	4,2	11,1		5,5	2,9	1,4	0,8	2,8	4,8	6,8	8,2
40 %	5,2	13,9		7,0	4,4	2,5	0,4	1,7	3,7	5,8	7,3
25 %	8,3	22,2		12,2	9,2	6,9	4,4	2,1	0,1	2,3	4,1
20 %	10,4	27,7		15,6	12,5	10,0	7,4	5,0	2,6	0,3	1,7

$(|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet(Minimum)}|) / s \leq 4$: grün bzw. dunkelgrau ≤ 2, hellgrau ≤ 3, weiß ≤ 4, graue Zahlen > 4

Kapitel VI

Diskussion

Inhaltsverzeichnis

VI		Diskussion	287
VI	1	Auswahl von Einflussgrößen auf die ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe	289
VI	1.1	Einführung	289
VI	1.2	Der Einfluss von Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion und Pathologien auf die ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen	290
VI	1.3	Der Einfluss der Gewebefraktion, der Aufbereitungsmethode, der Gewebeart und des Gewebealters auf die ^{14}C-Konzentration	294
VI	1.3.1	Gewebefraktion und Aufbereitungsmethode	294
VI	1.3.2	Gewebeart	300
VI	1.3.3	Gewebealter	301
VI	2	Die Bestimmung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM)	303
VI	2.1	Einführung	303
VI	2.2	Die Arbeiten von TROTTER und GARN	304
VI	2.2.1	Die Arbeiten von TROTTER und Co-Autoren	304
VI	2.2.2	Die Arbeiten von GARN und Co-Autoren	306
VI	2.2.3	Vergleich der Arbeiten von TROTTER und GARN	308
VI	2.3	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ von der Geburt bis zum 3. Ljz. (0 bis 22,5 Jahre)	314
VI	2.3.1	Die Beurteilung der Homoskedastizität	314
VI	2.3.2	Auswahl von Einflussgrößen auf die Skelettmasse$_{netto}$	316
VI	2.3.3	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Männer im Alter von 0 bis 22,5 Jahre	318
VI	2.3.4	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Frauen im Alter von 0 bis 22,5 Jahre	322
VI	2.4	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ ab dem 3. Ljz. (20,5 bis 84,5 Jahre)	325
VI	2.4.1	Die Beurteilung der Homoskedastizität	325
VI	2.4.2	Die Selektion von Einflussgrößen auf die Skelettmasse	326
VI	2.4.3	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahre	328
VI	2.4.4	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahre	332

VI	2.5	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ von 0 bis 99 Jahre	336
VI	2.5.1	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Männer im Alter von 0 bis 83 (99) Jahre	341
VI	2.5.2	Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Frauen im Alter von 0 bis 84 (99) Jahre	345
VI	2.6	Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM)	349
VI	3	Entwicklung, Überprüfung und Beurteilung des Modells FoRCaDa	352
VI	3.1	Einführung	352
VI	3.2	Der Vergleich von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten	353
VI	3.2.1	Individuen ohne Übereinstimmung zwischen den ^{14}C-Werten: ID 49, 83, 77	356
VI	3.2.2	^{14}C-Konzentrationen unter 100 pMC – kein sicherer Hinweis auf ein Sterbejahr vor 1950: ID 1	357
VI	3.2.3	Kind: ID 99	359
VI	3.2.4	Individuen zwischen dem 18. und 25. Lebensjahr	360
VI	3.2.5	Individuen nach dem 25. Lebensjahr	361
VI	3.2.6	Gewebeart und Gewebealter	364
VI	3.2.7	Einfluss der Berechnung der Lebensjahre auf den berechneten ^{14}C-Wert	364
VI	3.3	Vergleich von gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten: Ein erster Schritt zur Validierung des Modells FoRCaDa	367

VI 1 Auswahl von Einflussgrößen auf die ^{14}C-Konzentration im humanen Knochengewebe

VI 1.1 Einführung

Für die „klassische“ Radiocarbon-Methode haben die nachfolgenden Überlegungen dann kaum eine Bedeutung, wenn – wie im LIBBY'SCHEN Modell vorgesehen (Kap. II 2) – von einer konstanten ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre und den nachfolgenden ^{14}C-Reservoiren und somit auch in der Nahrung (während der Lebenszeit eines Menschen) ausgegangen wird. Es spielt bei diesen Annahmen daher keine Rolle, wann, wie lange und auf welche Weise der Mensch auf seine Nahrung zurückgegriffen hat, denn in dieser lagen theoretisch immer konstant 100 % ^{14}C im Vergleich zum Referenzjahr 1950 vor. Somit wird bis zum Lebensende des Menschen die ^{14}C-Konzentration in allen kohlenstoffhaltigen Bestandteilen seines Körpers ebenfalls konstant 100 % betragen, da die Reduktion von ^{14}C durch den radioaktiven Zerfall bei einer HWZ von 5730 ± 40 Jahren und einer Lebenserwartung eines historischen oder prämodernen Menschen von durchschnittlich 25 bis 32 Jahren vernachlässigt werden kann. Es spielt somit keine Rolle, anhand welcher Gewebefraktion (Kollagen, Apatit, Fett) oder Gewebeart (Kampakta vs. Spongiosa, postkraniales vs. kraniales Skelett) die Datierung vorgenommen wird, wie groß das Knochenfragment war und wo es entnommen wurde (Gewebealter) oder welche Aufbereitungsmethode (harte oder weiche Kollagendarstellung) bzw. Datierungsmethode (AMS oder Zählrohre) zur Anwendung kam.

Die Ausführungen gewinnen dann – und dann eben auch für die „klassische“ Radiocarbondatierung – an Bedeutung, wenn von der Konstanz des ^{14}C in der Atmosphäre nicht mehr ausgegangen werden kann und die Änderungen in einem relativ kurzen Zeitraum stattfanden, wie diese z. B. durch den Kernwaffen-Effekt verursacht wurden. Im Gegesatz zu der in Kapitel II geführten Diskussion orientieren sich die nachfolgende Ausführungen jedoch eng an den im Kapitel V vorgestellten Ergebnissen bzw. deren theoretischen Grundlagen.

VI 1.2 Der Einfluss von Sterbejahr, Alter, Geburtsjahr, Geschlecht, Skelettregion und Pathologien auf die ^{14}C-Konzentration im Knochenkollagen

Die Abbildung 2 (Kap. II 3.2) ist eine Umzeichnung des Diagramms Fig. 3 aus STENHOUSE UND BAXTER (1977b). Die Autoren setzten den gemessenen ^{14}C-Kollagenwert mit dem Sterbejahr in Beziehung und berücksichtigten zudem zwei Waschstumsschübe bei der Skelettreifung im Kindes- und Jugendalter. Im Ergebnis erwarteten sie die deutliche Beziehung ihrer Messwerte mit einer ihrer Modellkurven für konstante Verweilzeiten (t_C) zwischen 5 und 30 Jahren über die restliche Lebensspanne eines Individuums. Diese Erwartung wurde nicht erfüllt. Individuen, die ihre Reife deutlich vor 1950 abgeschlossen hatten, liegen unter der Kurve t_C = 20 Jahre, ab 1970 auch deutlich unter der Kurve von t_C = 30 Jahre. Spätjuvenile und frühadulte Individuen legen eine Beziehung zu der Kurve t_C = 10 Jahre nahe. Die Werte für die Kleinkinder (Knorpel-Kollagen) folgen dagegen der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre.

2001 veröffentlichte M. GEYH auf der Grundlage eines Teils (48 Proben) der hier jetzt vollständig vorgelegten Daten einen Artikel, in welchem er einen Korrekturwert für die Datierung historischer Ereignisse auf Grundlage von ^{14}C-Werten für humanes Knochenkollagen vorschlägt:

„The confirmation that the main uptake of carbon in bone collagen ceases at 19 years and the subsequent carbon exchange occurs at a low rate of about 1.5 % affects the conventional ^{14}C dating of bone collagen. Any conventional ^{14}C age t of human bone collagen has to be corrected to take into account the fact that the main ^{14}C uptake ceases in the adult human. The correction term E_{corr} depends on the age t_{life} of the individual at death. The real ^{14}C age t_{real} is obtained from $t_{real} = t - E_{corr}$. This correction is important for dating historic events related to dated bones. Figure 2 shows, for example that 32 years have to be substracted from the ^{14}C age of bone collagen of an individual who was 65 years old at death.“ (GEYH 2001, S. 727).

Bei der ‚*exchange rate*‘ handelt es sich um die Austauschrate im Knochen, die sich als Reziproke der Verweilzeit als $1/t_C$ errechnet. Diese hat uns in den Kapiteln II 3.2 und II 5 bereits beschäftigt und erfasst zusammen mit der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse den biologischen Hintergrund für den (Kohlenstoff)Stoffwechsel im Knochen. Unabhängig davon, ob mit 19 Jahren tatsächlich der Wachstumsabschluss angenommen werden kann und danach für alle Individuen eine konstante Austauschrate über die verbleibende Lebensspanne vorliegt, wird das Bezugsjahr zur Interpretation der gemessenen ^{14}C-Werte und davon abgeleitet der Radiocarbon-Jahre nur um eine definierte Anzahl von

Jahren vor das (vermutliche) Sterbejahr verschoben. Das heisst, die ^{14}C-Konzentration wird bis zu diesem Zeitpunkt in allen Reservoiren immer noch als konstant 100 % vorausgesetzt. Darüberhinaus bleibt zu fragen, ob diese Verschiebung tatsächlich notwendig ist. Die Angabe des (Sterbe)Alters gerade für ältere Menschen stellt in der Skelettanthropologie ein Problem dar und kann, wenn keine Zähne vorhanden sind, nur mit größeren Vertrauensbereichen mit bis zu mehreren Jahrzehnten angegeben werden (Kap. II 5.4.3). Darüberhinaus wurden historische und prämoderne Menschen eher selten 40, 50 oder gar 65 Jahre, so dass eine Korrektur um die beispielhaft genannten 32 Jahre selten notwendig werden sollte und auch dann kaum einen Effekt im Sinne einer Präzisierung der Datierung haben kann. Denn bei den Radiocarbon-Jahren handelt es sich um Intervalle die durch einen Mittelwert mit Standardabweichung angegeben werden und die eine unlösbare Einheit bilden (GEYH 1983), wobei sich aus der Standardabweichung häufig mehrere Jahrzehnte bis zu 100 Jahre umfassende Intervalle ableiten. Bei Kindern und Jugendlichen ist eine Korrektur überhaupt nicht notwendig und bei Individuen bis zu 40 Jahren begeht man nach den Ausführungen von GEYH (2001) kaum einen Fehler im Rahmen der historischen Anwendung, wenn man ungeachtet einer Austauschrate bis zu 3 % die Datierung auf ein (Sterbe)Alter von 19 Jahren zentriert, also das Bezugsjahr um die Differenz aus Alter und 19 Jahre vor das Sterbejahr verlegt. Denn der maximale Unterschied (für ein 40jähriges Individuum bei einer Umbaurate von 3 % nach dem 19. Lebensjahr) beträgt nur +5 Jahre zu dieser Differenz.

Andererseits sind die Kurven für einen Teil der hier vorgelegten Daten modelliert worden – ohne dass die genaue Exponential-Funktion durch GEYH (2001) angegeben wird – und zeigen auf, dass selbst so geringe Einflüsse wie eine konstante Austauschrate von jährlich 1,5 % (was einer Verweilzeit von ca. 67 Jahren und einer biologischen HWZ_{bio} von 46 Jahren entspricht) deutliche Effekte auf die Verknüpfung von Lebens- und Kalenderdaten mit Hilfe von ^{14}C-Werten gewinnen können.

Wie aus den Ergebnissen der multiplen Datenanalyse in Kapitel V 1.2.2 und V 1.2.3 deutlich wird, zeigen nur die 3 Zeitvariablen Sterbejahr, Alter und Geburtsjahr einen (linearen) Effekt auf die mittlere gemessene ^{14}C-Konzentration im Kollagen. Obwohl diese Variablen über die einfache Formel: Alter = Sterbjahr – Geburtsjahr miteinander verknüpft sind, beschreiben sie jeweils völlig andere Aspekte eines Lebenszyklus:

- Das *Geburtsjahr* legt fest, ab wann das Individuum mit der Umwelt in Wechselwirkung tritt
- Das *Sterbejahr* legt fest, wann diese Wechselwirkung endet
- Das *Alter* beinhaltet die Dauer dieser Wechselwirkung.

In den Ergebnissen der multiplen (linearen) Datenanalyse spiegeln sich die im Kapitel II diskutierten Grundlagen für die vorliegende Arbeit wider: Bei dem Versuch, den Kernwaffeneffekt als Datierungshilfe für rezente menschliche Skelettfunde zu nutzen, handelt es sich um eine deutlich von biologisch-physiologischen Prozessen beeinflusste Methode und nicht – und trotz aller Nähe zur Radiocarbonmethode – um eine physikalische Methode. Dieser Unterschied wird auch ganz konkret dadurch gekennzeichnet, dass über das Sterbejahr allein kein interpretierbarer Zusammenhang mit den gemessenen ^{14}C-Konzentrationen herausgearbeitet werden konnte.

Bei allen Einschränkungen, die sich aus der ersten Annäherung an die Datensituation aus den gemischten linearen Modellen bzw. linearen Regressionsmodellen ergeben und sich in den Residuenplots (Kap. V 1.2.3 Abb. 20) darstellen, ist es dennoch bemerkenswert, dass bereits ca. 40 % der beobachteten Variabilität der mittleren gemessenen ^{14}C-Konzentration allein durch die jeweils in den Regressions-Modellen berücksichtigten Zeitvariablen erfasst werden. Gleichzeitig konnte für wichtige, aus Biologie und Medizin bekannte Einflussgrößen kein Effekt auf die Zielgröße gezeigt werden. Für die vorliegende Stichprobe müssen als ungenügend angesehen werden:

- Die sehr grobe Unterscheidung in postkraniale und kraniale Skelettregion
- Die zu häufig fehlenden Angaben zu Pathologien, die bei älteren Menschen erwartet werden müssen
- Die unzureichenden Angaben zur Bearbeitung der Asservate und den Aufbereitungs- und Datierungsmethoden der einzelnen Proben vor allem bei den Literaturdaten sowie
- Die überhaupt fehlenden Angaben zu Lebensgewohnheiten und zum Verlauf der ontogenetischen Entwicklung, die ingesamt auf den Unterschied zwischen chronologischem und biologischem Alter einwirken. Wie wirksam sich diese auf die gemessene ^{14}C-Konzentration im Gewebe auswirken können, wird im nachfolgenden Kapitel VI 1.3 für ID 49 und ID 94 bis 96 diskutiert.

Aus den Ausführungen in Kapitel II 5 wird deutlich, dass für beide Geschlechter mit ihrem unterschiedlichen Eintritt in die und einer unterschiedlichen Dauer der einzelnen Entwicklungsabschnitte mit entsprechenden Effekten auf die ^{14}C-Konzentration gerechnet werden muss. Diese lassen sich aber in den vorliegenden Daten nicht wiederfinden. Dies liegt am ehesten daran, dass es sich bei den Proben hauptsächlich um solche von erwachsenen Individuen handelt. Besonders auffällig ist die Verteilung der Frauen nach Sterbejahr und Alter: Von den 18 Frauen waren 1968 bereits 10 verstorben und von den verbleibenden 8 Frauen waren 5 mindestens 45 Jahre alt. Das leitet sich direkt aus der

Herkunft der Proben aus anatomischen (der betagte Tod ist eher weiblich) und rechtsmedizinischen Instituten her (der unzeitige Tod ist eben eher jung und meist männlich).

An dieser Stelle könnte man sich in einem nächsten Schritt für eine bessere Anpassung der mathematischen Modelle an die vorliegenden Daten entscheiden. Diese könnte erfolgen mit der Herleitung von:

(1) Multiplen linearen Modellen im Sinne von fraktionellen Polynomen, z. B.

   a) Wie hier bei der Skelettmasse-Entwicklung umgesetzt mit (Ausgleichs)Polynomen des 2. bis 4. Grades für Zeitvariablen, besonders für das Alter. Diese finden sich wiederholt zur Beschreibung von sich über die Lebenszeit ändernden Konzentrations-Verhältnissen bestimmter Minerale im Gewebe (RINGE ET AL. 1977, RIGGS ET AL. 1981) oder zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung (GARN UND SHAW 1976) bzw.

   b) Log_{10}-transformierten Ziel- und Einflussgrößen wie z. B. für die Bestimmung der Skelettmasse (TROTTER UND PETERSON 1969a, b, TROTTER UND PETERSON 1970, TROTTER UND HIXON 1974) oder von

(2) Modellen unter Verwendung von Splines anstatt oder zusätzlich zu Polynomen. Bei Splines handelt es sich um „Einschnitte“, die eine wichtige Einflussgröße in qualitativ unterschiedliche Intervalle einteilt: Zum Beispiel könnte man das Alter in physiologisch sinnvolle Abschnitte unterteilen. Für diese Intervalle könnten dann jeweils eigene mathematische Modelle angepasst werden, die dann häufig weniger spezielle Annahmen erfordern. Diese Anwendung wurde zum Beispiel für die Beschreibung des Mineralverlustes im Knochen (SMITH ET AL. 1976a, b), der Knochendicke (BIRKENHÄGER-FRENKEL ET AL. 1993) oder Skelett- und Muskelmasse-Entwicklung durchgeführt (GARN 1970 Appendix I, ALOIA ET AL. 2000) und bei der Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung auch im Rahmen dieser Arbeit diskutiert wird (Kap. IV 3.3.3, VI 2.3) oder von

(3) Exponentialfunktionen, z. B. für die ^{14}C-Austauschrate (STENHOUSE UND BAXTER 1979a, b, GEYH 2001), den Mineralverlust im Knochen (SMITH ET AL. 1976a, b) bzw. den Knochenumbau und Kalziumstoffwechsel (BRYANT ET AL. 2003).

Die unter Punkt 1 und 2 aufgeführten Modelle ließen sich als gemischte lineare Modelle entwickeln und auch miteinander vergleichen. Doch insgesamt kann dies nicht darüber hinwegtäuschen, dass über die Form der Verteilung der ^{14}C-Werte keine weiteren Hinweise vorliegen, als dass diese bei Berücksichtigung der 3 Zeitvariablen als Einflussgrößen eben nicht einfach *nur* linear ist. Deswegen wird an dieser Stelle und unter Beachtung der erarbeiteten Grundlagen in Kapitel II 5 darauf verzichtet, die mathematischen Modelle besser an die Datenstruktur anzupassen.

Denn im Gegensatz zu den unter 1 und 2 angeführten Anwendungen ist die gemessene ^{14}C-Konzentration nicht nur von „biologischen“ Einflussgrößen wie Alter und Geschlecht

abhängig, sondern wird eben auch ganz entschieden von dem sich jährlich ändernden ^{14}C-Angebot in der Atmosphäre und den nachfolgenden Reservoiren beeinflusst und auch dadurch, wie sich jedes Individuum diesen Gegebenheiten mit seinen Lebensdaten zuordnet.

Um sich von diesem und vor allem für die Zeit des Anstiegs der ^{14}C-Werte in der Atmosphäre von 1950 bis 1964 mathematisch kaum zu modellierenden Einfluss unabhängig zu machen, wird daher versucht, die Aufnahme von Kohlenstoff in das Gewebe zu erfassen. Die Grundlagen dafür werden, wie in Kapitel II 5 ausgeführt, in der möglichst genauen mathematischen Beschreibung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse und der jährlichen Austauschrate gesehen. In einem nachfolgenden Schritt werden für jedes Individuum unter Berücksichtigung seiner Lebensdaten diese biologischen Prozesse mit der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre verknüpft. Auf diese Weise kann für jeden Donor ein ^{14}C-Wert berechnet und mit der gemessenen ^{14}C-Konzentration im Kollagen verglichen werden. Erst aus dem Vergleich der berechneten und gemessenen ^{14}C-Werte wird dann zu schlussfolgern sein, ob und wie die Methode der forensischen Radio-Carbon-Datierung (FoRCaDa) zur Anwendung gelangen kann. Die Beschreibung des Kohlenstoffaustausches im Gewebe über biologische Prozesse und die Verknüpfung mit der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre stellen den zentralen Unterschied des hier gewählten Ansatzes zur „klassischen“ Radiocarbon-Methode dar.

VI 1.3 Der Einfluss der Gewebefraktion, der Aufbereitungsmethode, der Gewebeart und des Gewebealters auf die ^{14}C-Konzentration

VI 1.3.1 Gewebefraktion und Aufbereitungsmethode

Für 24 Individuen wurde mehr als eine Gewebefraktion bestimmt. Aus dem Vergleich der vorliegenden ^{14}C-Konzentrationen (Kap. V 1.3.1, Abb. 22) deutet sich die Möglichkeit an, die Messungen von mehr als einer Fraktion als *Datierungs-Hilfe* zu verwenden. Dieser Ansatz ist aber – im Gegensatz zur Methode FoRCaDA – viel stärker auf die Interpretation der Messwerte ausgerichtet, welche immer eine hohe forensisch-osteologische Kompetenz des Bearbeiters voraussetzt.

Eine vollständige Gleichsetzung des Menschen mit einjährigen Organismen ist selbst für Gewebe mit nur einjähriger Verweilzeit (HWZ_{bio} 0,7 Jahre) oder Substanzen ohne nach-

folgenden Kohlenstoffaustausch nicht möglich (kurze Haare: GEYH 2001, Gallensteine: DRUFFEL UND MOK 1983, Zahnkronen: SPALDING ET AL. 2005), da der Mensch nicht direkt auf atmosphärisches ^{14}C zurückgreift, sondern dieses über die Nahrung aufnimmt und welches somit unterschiedlichen Reservoir-Effekten unterliegt. Die Annahme von WILD ET AL. (2000, S. 946), dass dieser nur etwa ein Jahr beträgt, ist nicht nachzuvollziehen. Daher ist auch für diese Gewebe und Substanzen keine Datierungsgenauigkeit zu erzielen, wie diese z. B. bei Getreide gelang (Whisky: WALTON ET AL. 1967, Wein: L'ORANGE UND ZIMEN 1968c, 1969a, b, ZIMEN 1972/73, siehe Kap. I). Somit sind auch die Datierungsversuche von WILD ET AL. (2000, auch WILD ET AL. 1998, ROM ET AL. 1998) kritisch zu bewerten, auch wenn diese als kalibriertes Alter mit einer zweifachen Standardabweichung sowie einer Wahrscheinlichkeit dafür angegeben werden, mit welcher die Probe aus dem angegebenen Zeitintervall stammen könnte. Dieser Einwand gilt ungeachtet der Tatsache, dass dieses Verfahren in der Radiocarbon-Methode üblich ist und unter Verwendung eines etablierten Kalibrierungs-Programmes erfolgte (CalibETH: NICKLAUS ET AL. 1992, Calib3.0: STUIVER UND REIMER 1993, INTCAL98: PUCHEGGER ET AL. 2000). Die Kritik soll hier anhand von ID 49 verdeutlicht werden:

Für die Kollagenprobe (Probe D bei WILD ET AL. 2000, tbl. 3, p. 949) wurden 141,12 ± 1,20 pMC gemessen (MW ± 1s). Das zur Beurteilung herangezogene Intervall von WILD ET AL. reicht danach von 138,72 bis 143,52 pMC (MW ± 2s). Dieser Wert wurde in der Atmosphäre erstmalig im Laufe des Jahres 1962 überschritten und 1963 lagen bereits 171,1 pMC vor (vgl. Anhang 1a). Die Wahrscheinlichkeit, dass ID 49 im Jahr 1962 verstorben sei, wird durch WILD ET AL. mit 4 % angegeben. Weiterhin überdeckt das Intervall die Kalenderjahre 1973 bis 1975, in denen in der Atmosphäre ^{14}C-Werte zwischen 141,9 bis 136,8 pMC vorlagen (Anhang 1a). Die Sterbewahrscheinlichkeit für ID 49 wird mit 96 % für dieses Intervall angenommen. Anhand der Fett-Probe von ID 49 mit 113,73 ± 0,55 pMC (MW ± 1s) würden nach entsprechendem Vorgehen als mögliche Sterbeintervalle 1990 bis 1994 zu 93 % und 1957 bis 1958 zu 7 % anzunehmen sein. Das wirkliche Sterbejahr 1995 wird somit jedesmal *nicht* mit eingeschlossen. Das Problem dabei ist nämlich, dass mit dem von WILD ET AL. (2000) gewählten Vorgehen und der Anwendung eines Kalibrierungsprogrammes (PUCHEGGER ET AL. 2000) der jährliche Stoffwechsel im Gewebe indirekt auf 100 % gesetzt und der Mensch im Hinblick auf seine Gewebezusammensetzung auf einen kurzlebigen bzw. sogar einjährigen Organismus reduziert wird (vgl. Kap. II 2.2.2). Diese Annahme lässt sich auch nicht durch die Berücksichtigung der zweifachen Standardabweichung und damit der Verbreiterung des Vertrauensintervalls ausgleichen. Zwar ist das

auch WILD ET AL. irgendwie bewusst, aber sie schlussfolgern daraus, dass Kollagen wegen der relativ langen Verweilzeit von Kohlenstoff ganz im Gegensatz zu Haar- und Fett-Proben ungeeignet für die Liegezeitbestimmung sei. Diese Schlussfolgerung ist aber nur aufrechtzuerhalten, wenn den angegebenen Wahrscheinlichkeiten für die Sterbeintervalle irgendeine Bedeutung für nachfolgende Entscheidungen beigemessen wird. Es ist aber nicht einsichtig, warum und wie diese berücksichtigt werden sollten, solange keine Vorstellungen zu den Reservoir-Effekten sowie zu den Verweilzeiten von Kohlenstoff im Knochenfett bzw. -kollagen vorliegen oder auch nur eine annähernd ausreichende Referenzserie von modernen Proben untersucht wurde.

Dass aber unabhängig von dieser Kritik die Kombination von zwei unterschiedlichen Proben eines Individuums als Datierungshilfe verwendet werden kann, wurde bereits erwähnt. Besonders aus der Kombination des stoffwechsel*trägen* Kollagens bzw. Apatits mit dem stoffwechsel*aktiveren* Fett lassen sich wichtige Hinweise zum Sterbejahr erkennen (Abb. 22). Um die Möglichkeiten und Grenzen dieser Anwendung aufzuzeigen, werden nachfolgend die Proben zu ID 59, 66, 15, 16 und 49 diskutiert. Die Bewertung der gemessenen ^{14}C-Konzentrationen der einzelnen Proben eines Individuums erfolgt dabei im Vergleich zu den ^{14}C-Werten in der Atmosphäre, wie diese im Anhang 1a aufgeführt sind. Ein „Automatismus“ ist dabei ausgeschlossen, wie dieser z. B. mit den Kalibrierungs-Programmen verbunden ist.

Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen den ^{14}C-Konzentrationen von Kollagen bzw. Apatit und Fett bei ID 59: Der Donor ist ein 1928 geborener und 46jährig verstorbener Mann. Dieser hat den Großteil seiner Skelettmasse deutlich vor 1955 aufgebaut, dem Jahr, indem erstmals wieder 100 pMC in der Atmosphäre gemessen wurden und er bereits 27 Jahre alt war. Die ^{14}C-Konzentration von 145,7 ± 1,30 pMC im Fett besagt, dass dieser Mann entweder einige Jahre „um“ 1962 bzw. „um“ 1972 gestorben sein muss (vgl. Kap. V 3.5.4 Tab. 56). 1962 ist das Jahr, in dem in der Atmosphäre erstmalig eine Konzentration von 145 pMC erreicht und überschritten wurde. 1972 ist das Jahr, in dem der im Fett gemessene ^{14}C-Wert in der Atmosphäre erstmalig wieder unterschritten wurde. Es lassen sich auch nur wenige Jahre um 1962 bzw. 1972 als mögliche Sterbejahre diskutieren, weil sonst der ^{14}C-Wert für Fett „zu weit weg“ von der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre rücken würde.

Im Vergleich dazu haben sich bei ID 66 die ^{14}C-Konzentrationen aus allen drei Fraktionen angeglichen: Der Donor, ein 1985 im 49. Lj.verstorbener Mann, hat zwar auch den Großteil seiner Skelettmasse vor 1955 aufgebaut und 11 Jahr länger als ID 59 mit dem erhöhten ^{14}C-

Angebot gelebt. Gleichzeitig kam es in den 11 Jahren von 1974 bis 1985 aber zu einer weiteren Reduktion der ^{14}C-Werte in der Atmosphäre, so dass bei ID 66 im Vergleich zu ID 59 der ^{14}C-Wert für Fett (123,8 ± 2,0 pMC) reduziert und die ^{14}C-Werte für Kollagen (111,4 ± 1,2 pMC) und Apatit (116,1 ± 2,0 pMC) gleichzeitig annähernd gleich sind (siehe unten zum Vergleich der ^{14}C-Werte von Kollagen und Apatit; Kap. V 3.5.4).

Bei ID 15 und 16 handelt es sich um zwei Schwestern, die beide mindestens 85jährig verstorben sind und für die eine mehrjährige Liegezeit vor dem Auffindungsjahr 1992 angenommen werden muss. „Verschiebt" man, wie in Abbildung 22 geschehen, die ^{14}C-Werte der beiden Schwestern von 1992 (Auffindungsjahr) nach 1987 bis 1989 (mögliche Sterbejahre nach WILD ET AL. 2000), „passen" die gemessenen ^{14}C-Konzentrationen der beiden Fett-Proben besser zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre (ID 15: 119,5 ± 0,47 pMC; ID 16: 118,4 ± 0,52 pMC). Interessant ist der Vergleich der Kollagenwerte beider Schwestern. Vor allem der Wert von 112,3 ± 0,89 pMC von ID 16 deutet einen geringen Stoffwechsel an. Diese Frau hat von 1959 bis zu ihrem Tod, also bis zu 34 Jahre, mit ^{14}C-Werten in der Atmosphäre über 114 pMC gelebt, was dem gemessenen ^{14}C-Wert + 2 s entspricht (vgl. Kap. V 3.5.4).

Auch die beiden ^{14}C-Werte von Fett und Kollagen stellen in ihrer Kombination für ID 49 ein Problem dar. Bei dem Donor handelt es sich um einen 1995 verstorbenen 30jährigen Mann (WILD ET AL. 1998, 2000). Liefert die Fett-Probe mit 113,7 ± 0,55 pMC einen ^{14}C-Wert, der gut mit dem Sterbejahr 1995 vereinbar ist, bleibt der Kollagen-Wert von 141,1 ± 1,2 pMC schwierig zu interpretieren (vgl. Kap. V 3.5.3, VI 3.2.1):

Ein im Kollagen höherer ^{14}C-Wert als im Fett ordnet diese Probe weit nach dem ^{14}C-Gipfel von 1964 zu. Als frühestes Sterbejahr kommen somit erst „einige" Jahre nach 1991 in Betracht, dem Jahr, in dem die im Fett gemessene ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre erstmalig wieder unterschritten wird. Das heisst aber, z. B. für das Sterbejahr 1995, dass ID 49 nur von 1965 bis 1973 unter Bedingungen gelebt hat, in denen die ^{14}C-Werte in der Atmosphäre höher als die im Kollagen gemessene Konzentration war. Diese Zeitspanne entspricht seinen ersten 8 Lj.. Aus dieser Zeit stammen aber deutlich weniger als 50 % der Skelettmasse (vgl. Kap. VI 2.5.1) und somit kann der hohe Wert im Kollagen eigentlich nicht erreicht werden. Für einen 30jährigen Mann wie ID 49 würde man auch nicht 1995, sondern spätestens 1992/93 als Sterbejahr diskutieren (vgl. Kap. V 3.5.3). Wie können diese Werte plausibel erklärt werden, ohne dass eine Kontamination mit probenfremden Kohlenstoff bei der Aufbereitung bemüht werden muss?

WILD ET AL. (2000) haben für diesen Donor weitere Kollagen-Proben mit anderen, weichen Methoden aufbereitet, mit denen nur Werte zwischen 123,3 ± 0,6 bzw. 126,2 ± 1,0 pMC gemessen wurden. ID 49 hätte nach diesen Werten mindestens seine ersten 17 bis 19 Lj. mit einem ^{14}C-Angebot über den gemessenen ^{14}C-Werten im Kollagen gelebt. WILD ET AL. sehen in diesen deutlich niedrigeren Werten einen Hinweis dafür, dass durch die „weichen" Methoden der Kollagenaufbereitung (EDTA, EDTA und Pepsin) nur weniger vernetztes und damit jüngeres Kollagen aus dem Gewebe herausgelöst wurde im Gegesatz zur „harten" Methode der Gelatine-Herstellung, wie diese in der Radiocarbon-Methode üblich und auch für die Aufbereitung der eigenen Proben angewendet wurde (Kap. IV 1.5.3). Die ^{14}C-Werte jeder einzelnen der drei „weichen" Methoden im Vergleich zur „harten" Methode der Kollagen-Darstellung sind so verschieden, dass man mit 99,9 %er Sicherheit (MW ± 4s) ausschließen würde, dass diese von ein- und demselben Individuum stammen könnten. Wenn auch ein Effekt der Aufbereitungs-Methoden als Reservoir-Effekt nicht ausgeschlossen werden kann, wird die Ursache für die hohe ^{14}C-Konzentration vor allem in der Kombination der eingesetzten, materialsparenden AMS-Methode und des Gewebealters und der Gewebeart der Probe gesehen. Leider gibt es für ID 49 zum Ort der Probenentnahme am Femur keine weiteren Hinweise in den vorliegenden Publikationen (ROM ET AL. 1998, WILD ET AL. 1998, 2000). Dass die Auswirkungen von Gewebeart und Gewebealter auf die gemessene ^{14}C-Konzentration aber auf keinen Fall unterschätzt werden dürfen, wird weiter unten mit der Gegenüberstellung von gleichzeitig gewonnenen Spongiosa- und Kompakta-Proben (Gewebeart) einiger Individuen sowie für den Vergleich von drei Kollagenproben aus einer Tibia (Gewebealter) gezeigt.

Daneben kann zur Interpretation der beiden Proben von ID 49 als Alternative im Sinne eines Reservoir-Effektes ein vor 1974 deutlich erhöhter Stoffwechsel, z. B. nach einer Fraktur, oder ein extremes Nahrungverhalten – wie z. B. die Ernährung mit jahrealten Konserven – *konstruiert* werden. Letzteres beinhaltet einen Reservoir-Effekt, wie er für Tiergewebe bereits nachgewiesen wurde (BEAVAN-ATHFIELD ET AL. 2001, BEAVAN-ATHFIELD UND SPARKS 2001, hier Kap. II 3.2). Zwar würde jeder Reservoir-Effekt beide Gewebefraktionen gleichermaßen betreffen, sich aber nur im Kollagenwert widerspiegeln, wenn dieses ausreichend lange, aber höchstens bis zu einem bestimmten Zeitpunkt, angehalten *hätte*. Da auch (Knochen)Fett eine mehrjährige Verweilzeit von Kohlenstoff hat, müsste bis zum Tod des Mannes ein Zeitintervall gelegen haben, in der sich die ^{14}C-Werte für Fett wieder „normalisieren" und der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre zuordnen konnten. Dieses Intervall darf gleichzeitig jedoch nicht zu groß werden, damit der erhöhte ^{14}C-Wert im

Kollagen über das 20. Lj. hinaus konserviert bleibt und der nachfolgende ^{14}C-Austausch im Knochen diesen nicht mehr stark verringern kann. Diese Erklärung ist konstruiert, verdeutlicht jedoch das Problem der Nicht-Verfügbarkeit entsprechender Informationen für forensisches Knochenmaterial.

Zusammenfassend für diese Beispiele erscheint die Annahme berechtigt, dass aus der Gegenüberstellung der Messwerte für Fett und Kollagen und/oder Apatit eines Individuums dieses relativ gut der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre zugeordnet und damit das Sterbejahr sinnvoll eingegrenzt werden kann. Andererseits kann so ein abweichender Stoffwechsel für eine Fraktion erkannt werden, was einer Fehldatierung entgegenwirkt (vgl. Kap. V 3.5.3, V 3.5.4). Stehen keine ^{14}C-Werte für Fett zur Verfügung, kann aber auch aus dem Vergleich des ^{14}C-Wertes für Kollagen mit dem für Apatit ein Anhaltspunkt für den möglichen Sterbezeitraum gewonnen werden. Erste Hinweise dafür lassen sich aus dem Vergleich der Werte für insgesamt 21 Individuen finden. Allerdings ist die Beurteilung der Werte wesentlich stärker vom Alter des Donors und vielleicht sogar von der Skelettregion abhängig, wie nachfolgend gezeigt wird:

Die 1967 bzw. 1968, also kurz nach dem ^{14}C-Gipfel im Jahr 1964 mit 183,5 pMC verstorbenen und von L'ORANGE UND ZIMEN (1968a, 1969a) untersuchten 15 Individuen (ID 100, 28-35, 37, 39, 41, 43, 45 und 47) zeigten bis auf ID 41 in der Femurkompakta höhere ^{14}C-Konzentrationen im Apatit als im Kollagen. Die berechneten ^{14}C-Differenzen aus Kollagen undApatit sind somit negativ. Der Unterschied beträgt mindestens 3,3 ± 1,70 pMC (ID 39) bis maximal 16,4 ± 0,98 pMC (ID 37). Im Apatit wird somit der steile ^{14}C-Anstieg in der Atmosphäre zu Beginn der 1960er Jahre etwas besser erfasst und kann als ein weiterer Hinweis (vgl. Kap. II 3.4) auf die im Vergleich zum Kollagen etwas höhere Stoffwechselrate im Apatit gewertet werden.

Demgegenüber zeigt ID 79 fast gleich hohe Konzentrationen in beiden Gewebefraktionen. Die Proben stammen von einem ebenfalls 1967 verstorbenen 19jährigen Mann. Dieser hat seit 1962, also seit seinem 13. Lj., mit einem ^{14}C-Angebot gelebt, welches deutlich über den in seinen Geweben gemessenen ^{14}C-Konzentrationen lag (Kap. V 1.3.1 Abb. 22). Um dieses Alter beginnt bei Jungen der puberale Wachstumsschub, mit und ab dem etwa 50 % der Skelettmasse gebildet werden (Kap. VI 2.5). Dies erklärt, warum die gemessenen ^{14}C-Konzentrationen nicht deutlich höher sind, weil ja 50 % der Skelettmasse aus einer Zeit mit deutlich niedrigeren ^{14}C-Werten stammen und dies erklärt auch, warum der Unterschied zwischen diesen beiden Fraktionen gering ist. Denn der vorhandene, aber geringe

Unterschied in den beiden Stoffwechselraten von Kollagen und Apatit kann durch den im Vergleich dazu schnellen Massezuwachs ab der Pubertät überprägt werden.

Weiterhin sind für ID 59, 58 und 72 die ^{14}C-Werte für Kollagen höher als die dazugehörigen ^{14}C-Werte im Apatit. Diese drei mindestens 40jährigen und nicht vor 1974 verstorbenen Individuen haben zwar die Skelettmasse deutlich vor 1960 aufgebaut, aber den ^{14}C-Gipfel vollständig erlebt. In dem stoffwechselträgeren Kollagen „erhalten“ sich die durch Umbauprozesse im Gewebe angereicherten ^{14}C-Konzentrationen länger als im Apatit.

Diese Beobachtung wiederholt sich für ID 87, aber auf einem deutlich höheren Niveau. Der Donor, ein 20jähriger Mann, hat nur 6 Jahre mit einem ^{14}C-Angebot gelebt, welches unter der im Apatit gemessenen ^{14}C-Konzentration von 136,7 pMC lag. Diese Zeitspanne hat jedoch ausgereicht, um einen Unterschied zwischen den Messwerten von Kollagen und Apatit hervorzubringen. Im Gegensatz zu diesen 4 Individuen steht ID 66 (ein 1985 im 49. Lj. verstorbener Mann), dessen Kollagenwert niedriger als der dazugehörige Apatit-Wert ist. Ob dies an der Skelettregion (kraniales Skelett, Neurocranium) liegt, kann nicht entschieden werden. Jedoch würde diese Beobachtung gut zu dem im Vergleich zum postkranialen Skelett früheren Wachstumsabschluss im kranialen Skelett passen (Kap. II 5.4.5).

VI 1.3.2 Gewebeart

Innerhalb einer Gewebefraktion sind die Unterschiede zwischen den beiden Gewebearten Kompakta und Spongiosa relativ groß, wie Abbildung 23 (Kap. V 1.3.2) entnommen werden kann. Bei einem Vergleich der Messwerte für ID 47/48, 43/44, 45/46 und 37/38 käme es selbst dann nicht zu einer Überschneidung der Intervalle, wenn diese mit der dreifachen Standardabweichung um den jeweiligen Mittelwert gebildet werden (MW ± 3 s). Das heisst, man würde mit 99,7 %iger Sicherheit nicht mehr davon ausgehen, dass diese Proben zu einem Individuum gehören (Kap. IV 3.2, GEYH 1983). Diese Beobachtung erinnert an die Ergebnisse der ^{90}Sr Methode (Kap. II 3.3 Tab. 1), bei der in spongiosareichen Skelettelementen, z. B. Rippen und Wirbeln, im Vergleich zum Gesamtskelett oder Langknochen deutlich höhere Konzentrationen gemessen wurden. Beispielsweise wurde für Wirbel im Vergleich zu Diaphysen je nach Autor die zwei- bis vierfache Stoffwechselrate errechnet.

VI 1.3.3 Gewebealter

Um den Einfluss des Gewebealters auf die gemessene ^{14}C-Konzentration ansatzweise beurteilen zu können, wurden 3 Proben von der linken Tibia eines 19jährigen Mannes gewonnen. Die Tibia hatte eine gesamte Länge von 47,4 cm. Beide Epiphysenfugen waren bereits verschlossen und schwer erkennbar. Nach MAAT (1984) ergibt sich daraus eine Diaphysenlänge von 41,8 cm (gesamte Länge x 0,8834). Bei der Tibia ist das primäre Ossifikationszentrum nicht genau in der Diaphysenmitte (DM), sondern etwas distal verschoben. Die physiologisch distale Diaphysenhälfte umfasst 43 % der Diaphysenlänge und misst somit 17,9 cm und wurde hier komplett der Beprobung zugeführt (ID 96). Die physiologisch proximale Diaphysenhälfte umfasst 57 % der Diaphysenlänge und misst damit 23,9 cm. Diese Hälfte wurde nochmals geviertelt und das zweite (ID 95) und vierte (ID 94) Viertel, ausgehend von der physiologischen Mitte (pM) des Knochens, wurden ebenfalls beprobt. Nach TAYLOR (1992) werden jedoch im Gegensatz zu MAAT (1984) nur 55 % der Länge an der proximalen Epiphyse der Tibia gebildet und führt zu einem Längenunterschied für die proximale Diaphysenhälfte von -0,9 cm.

Nach 10 Jahren hat die Tibia eines Mannes zwar ca. 75 % ihrer Länge (nach MAAT 1984) aber das postkraniale Skelett deutlich weniger als 50 % seiner maximalen Masse im Erwachsenenalter erreicht (TROTTER UND HIXON 1974, hier Kap. II 5.4.5 Abb.8, Kap. VI 2.5.1). Die unterschiedlichen Zahlen lassen sich leicht damit erklären, dass sowohl das Dickenwachstum des Knochens als auch die Masseentwicklung des Skelettes im Vergleich zum Längenwachstum zurücksteht.

In den ersten 10 Lj. des jungen Mannes waren die ^{14}C-Werte in der Atmosphäre zwar deutlich erhöht, doch ist diese Zeit aus der Sicht der Skelettmassebildung und im Vergleich zum (prä)puberalen Wachstumsschub relativ unproduktiv. Mit 14 ± 2 Jahren setzt bei den Jungen eine für die Skelettmassebildung im postkranialen Skelett aktivere Zeit ein. Für den Donor von ID 94 bis 96 beginnt dieser Spurt somit nicht vor 1983. Da lagen die ^{14}C-Werte in der Atmosphäre aber bereits wieder unter der im Kollagen der jeweiligen Probe gemessenen ^{14}C-Konzentration.

Im Gegensatz zu ID 94 umfassen ID 95 und 96 annähernd die gesamte Lebenszeit des 19jährigen Donors (Kap. V 1.3.3 Tab. 35) und das Gewebe wurde in den ersten 11 von 18 Lj. (ID 95; 123,1 ± 1,0 pMC) bzw. den ersten 10 von 19 Lj. (ID 96; 125,0 ± 0,9 pMC)

unter Bedingungen gebildet, in denen in der Atmosphäre höhere ^{14}C-Werte vorlagen als in der Probe gemessen wurden. Im Gegensatz dazu repräsentiert nach MAAT (1984) ID 94 nur die letzten 7 Lj. des Donors. Und nur im ersten Jahr der Gewebebildung wurden im vorliegenden Fall in der Atmosphäre Werte über der gemessenen ^{14}C-Konzentration erreicht (120,7 ± 0,9 pMC). Damit erscheint der gemessene Wert theoretisch nicht möglich und lässt entweder an einen höheren Anteil sekundären Radiocarbons oder an ein höheres Gewebebildungsalter denken. Dies lenkt wiederum die kritische Aufmerksamkeit auf die mögliche Übertragbarkeit von Durchschnittswerten auf Einzelindividuen.

Aus diesen Beobachtungen und unter Berücksichtigung der Ausführungen zu ID 49 lässt sich erkennen, dass das Gewebealter und nicht das Alter des Individuums die eigentliche Bezugsgröße bei der Interpretation der gemessenen ^{14}C-Werte darstellt. Diese Schlussfolgerung ist nicht überraschend und steht in Übereinkunft mit den Ausführungen zu Alter und Gewebealter in den Kapiteln II 5.4.3 und II 5.4.4. Da einerseits die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ nur für das gesamte Skelett bestimmt werden kann und andererseits keine Methode existiert, das Gewebealter ausreichend exakt zu bestimmen, sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass sich Alter und Gewebealter annähernd entsprechen. Die Möglichkeit besteht nur dann, wenn vom postkranialen Skelett ganze Knochen bzw. deren vollwertige Äquivalente, z. B. Längs- bzw. Querhälften (oder Knochenspäne derselben), einer Beprobung zugeführt werden. Beim Schädel kann dies evtl. anders gehandhabt werden. Denn viele Schädelteile sind bei der Geburt bereits als Knochen angelegt und erfüllen somit die Forderung nach einem vollwertigen Äquivalent. Allerdings folgen kraniales und postkraniales Skelett unterschiedlichen Entwicklungstempi, wie bereits in Kapitel II 5.4.5 ausgeführt wurde, so dass aus diesen Gründen auf eine Beprobung kranialen Gewebes verzichtet werden sollte.

VI 2 Die Bestimmung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM)

VI 2.1 Einführung

Wie bereits mehrmals betont, liefern die Arbeiten zur Radiocarbon-Methode keine ausreichenden Lösungsansätze zur Beurteilung gemessener ^{14}C-Konzentrationen im Knochenkollagen (Kap. VI 1). Die Annahme von mehr oder weniger altersunabhängigen oder gar konstanten Verweilzeiten von Kohlenstoff im Knochengewebe – sei es nun im Apatit oder Kollagen – erwies sich als unzureichend. Vielmehr wurde die physikalische Größe „Verweilzeit" auf die biologischen Größen Knochenbildung und -umbildung zurückgeführt (Kap. II). Diese erscheinen über die Knochen- bzw. Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ und die Austauschrate von ^{14}C ausreichend quantifizierbar. Allerdings werden dabei nicht die komplexen und z. T. gegensätzlichen Teilprozesse vor allem bei der Masse-Entwicklung berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Arbeit interessiert als einer von zwei Parametern für das Modell FoRCaDa (Kap. V 2, VI 3) die *jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$* ΔSM, die in der Auxologie mit der Entwicklungsgeschwindigkeit beispielsweise für das Körperhöhenwachstum ihre Entsprechung findet. Denn nur entsprechend des *Anteils* an Skelettmasse, der jährlich und in Bezug auf das schon vorhandene Gewebe aufgebaut wird, gelangt auch das ^{14}C in das Knochenkollagen und wird nachfolgend durch Austauschprozesse modifiziert. Es stehen jedoch keine Daten zur Verfügung, die diesen Parameter ausreichend gut beschreiben. Daher wird hier der Versuch unternommen, an Literaturdaten mathematische Modelle für die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ – und zwar getrennt für beide Geschlechter – schrittweise anzupassen, aus denen dann der Parameter ΔSM abgeleitet wird.

In der Literatur werden vor allem die Arbeiten von TROTTER und Co-Autoren bzw. GARN und Co-Autoren angeführt und als grundlegend für die Beurteilung der Skelettmasse-Entwicklung betrachtet. In Kapitel VI 2.2 werden diese Arbeiten zuerst kurz vorgestellt und kritisch bewertet. Die Beschreibung und Diskussion der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ auf Grundlage der Literaturdaten erfolgt in Kapitel VI 2.3 für Individuen von 0 bis 22,5 Jahre und in Kapitel VI 2.4 für Individuen von 20,5 bis 84,5 Jahre. In Kapitel VI 2.5 werden diese Ergebnisse zusammengefasst und im Vergleich mit Literaturangaben diskutiert. In Kapitel VI 2.6 erfolgt die Diskussion der sich daraus ableitenden jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse$_{netto}$.

VI 2.2 Die Arbeiten von TROTTER und GARN

VI 2.2.1 Die Arbeiten von TROTTER und Co-Autoren

Die im vorliegenden Zusammenhang wichtigste Arbeit von TROTTER UND PETERSON (1970) basiert auf 144 Skeletten negrider und europider Amerikaner beiderlei Geschlechts im Alter von 23 Tagen bis 23 Jahren. Diese Sammlung wurde zwischen 1918 und 1969 zusammengetragen. Für 72 % aller Individuen waren die Todesumstände bzw. die Vorerkrankungen bekannt:

- 5 % waren mental retardiert
- 5 % hatten einen Hydrocephalus
- 11 % waren unterernährt
- 25 % litten an angeborenen, chronischen oder Langzeiterkrankungen (Tbc, Syphilis)
- 26 % verstarben an einer akuten Erkrankung oder einem Unfall.

Diese Zusammenstellung unterstreicht die grundsätzlichen Vorbehalte gegen ältere Skelettsammlungen, die vor allem die Validität von Schlussfolgerungen für gesunde anhand von kranken Individuen betreffen (SAUNDERS UND HOPPA 1993, hier Kap. II 5.3). Wesentlich problematischer ist jedoch, dass die Originaldaten dieser Arbeit nicht erreichbar waren noch sind. Die vollständigen Daten wurden ursprünglich im NAPS Document 01083 des ASIS National Auxiliary Publications Service dokumentiert. Diese Einrichtung existiert nicht mehr. Kontakte zu RR PETERSON über RL JANTZ erbrachten ebenfalls keinen Erfolg. Über die Library of Congress, Washington DC, waren diese Daten auch nicht aufzufinden. Ihr Verbleib ist damit z. Zt. unklar.

In einem ersten Schritt wurde die Zusammensetzung der Stichprobe entsprechend Alter, Geschlecht und Rasse aus table 1, p. 315 (TROTTER UND PETERSON 1970)entnommen. Im nächsten Schritt wurde figure 2, p. 318 derselben Arbeit verzerrungsfrei vergrößert, so dass die Skelettmassen bei einer Messgenauigkeit von 0,5 mm auf ± 12,5 g genau abgelesen werden konnten. Wegen der großen Punktdichte im 1. und 2. Lj. konnte hier jeweils nur ein Wert für alle 22 (1. Lj.) bzw. 15 Individuen (2. Lj.) geschätzt werden. Von dieser Einschränkung abgesehen, ergab sich eine gute Übereinstimmung von table 1 und figure 2 bei der Verteilung der Individuen auf die nach Rasse und Geschlecht gruppierten Alterskohorten. Lediglich in den Altersklassen 18 und 19 wurde jeweils ein Wert zwischen

negriden Männern und negriden Frauen in der Originalarbeit vertauscht. Im Anhang 17 sind die rekronstruierten Daten gelistet. Bei einem Vergleich dieser Tabelle mit der Originalarbeit ist zu beachten, dass im Gegensatz zu dieser nicht die untere Altersgrenze, sondern das Altersintervall angegeben wurde: TROTTER UND PETERSON klassierten Kinder im Alter zwischen Geburt und 1. Lj. in die Altersklasse B(irth), Kinder zwischen dem 1. und 2. Lj. in die Altersklasse 1 etc. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten zu ermöglichen, werden daher die Altersintervalle angegeben. Aus den Intervallgrenzen wurde dann, soweit notwendig, ein Durchschnittsalter berechnet.

Für die Teilstichprobe der 41 negriden Frauen konnten die aus der Abbildung rekonstruierten Werte für die Skelettmasse mit den durch TROTTER UND PETERSON (1970) erhobenen Werten verglichen werden (tbl. 3, p. 322). Als Problem ist jedoch zu benennen, dass in table 3 die Individuen nicht mit ihrer Altersklasse bezeichnet wurden, sondern die Skelettmasse in Relation zur Radiuslänge betrachtet wurde. Obwohl im Kindes- und Jugendalter von einer engen Beziehung zwischen Körperhöhen- und damit auch Radiuswachstum und Lebensalter ausgegangen werden kann, ist dieser Zusammenhang dennoch nicht deterministisch. Für einen Vergleich wurden daher sowohl die abgelesenen Werte aus figure 2 als auch die Werte aus table 3 der Größe nach sortiert und einander zugeordnet. Diese Gegenüberstellung findet sich in Anhang 18. Es wird deutlich, dass die angestrebte Ablesegenauigkeit nicht eingehalten wurde. Ab der Altersklasse der 2- bis 3jährigen wird die Skelettmasse im Mittel um 30 g oder 1 % unterschätzt. Die Gründe dafür mögen in einer eingeschränkten Ablese-, aber auch Zeichengenauigkeit liegen oder einer nicht in jedem Fall richtigen Zuordnung der beiden Werte zu einem Individuum. Die Beobachtung lässt es sinnvoll erscheinen, erneut nach den Originaldaten zu recherchieren. In diese Arbeit gehen wegen einer Vergleichbarkeit aller vier Teilstichproben (negride Männer, negride Frauen, europide Männer, europide Frauen) auch die negriden Frauen mit ihren rekonstruierten Skelettmasse-Werten ein.

Die Skelettmasse bei der Geburt lässt sich anhand der vorgenannten Arbeit nicht bestimmen, denn in der Altersklasse B(irth) der Originalarbeit sind Kinder zwischen dem 23. Lebenstag und dem erstem Geburtstag enthalten. Um die Lücke für das somit fehlende Geburtsgewicht zu schließen, wurden die drei Arbeiten von TROTTER UND PETERSON (1969a, b) und TROTTER UND HIXON (1974) herangezogen. Grundlage bilden die Werte von Feten der 37. bis 44. Schwangerschaftswoche. Diese Feten sind als geburtsreif zu betrachten. Die Werte sind ebenfalls Anhang 17 zu entnehmen.

Weiterhin wurden Werte von TROTTER UND HIXON (1974) für die Altersgruppe der 1-2jährigen negriden Kinder und europiden Jungen bzw. für die 2- bis 3jährigen europiden Mädchen übernommen. Dabei handelt es sich jedoch um Durchschnittswerte von 0,5- bis 3jährigen Kindern. Eine zusammenfassende Darstellung der Skelettmasse in Abhängigkeit von Alter, Geschlecht und Rasse und im Vergleich zu den Ergebnissen von GARN findet sich in Abbildung 31, Kapitel VI 2.2.3.

VI 2.2.2 Die Arbeiten von GARN und Co-Autoren

Im Gegensatz zu der invasiven Arbeitsmethode von TROTTER und Mitarbeitern nutzte GARN die Möglichkeiten der zerstörungsfreien Röntgentechnik. Die Arbeit von 1970 kann als Zusammenfassung vorangegangener Arbeiten angesehen werden (GARN ET AL.1964a, b, GARN UND WAGNER 1969). Als nachfolgende Arbeit seien GARN (1972) und GARN ET AL. (1976) genannt.

Für die Arbeit von 1970 wurden über 25 000 Radiographien des Metacarpus II (MC II) und Literaturdaten ausgewertet. Die Einzeldaten wurden je Altersklasse (Zweijahres-Intervalle) und Geschlecht zu maximal 9 Stichproben zusammengefasst, entweder nach den Ländern Lateinamerikas (Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panama) oder für die USA nach den Gruppen „Mexican American“, „American Negros“ und „White Ohio“. Jede einzelne Stichprobe repräsentiert ca. 25 Individuen (Kap. II 5.4.6; Anhang 4 und 5).

Anhand einer standardisierten Radiographie wurden in der Diaphysenmitte des MC II der subperiostale Gesamtknochendurchmesser d_T (total subperiostal diameter) und der Markhöhlendurchmesser d_M (medullary cavity width) jeweils in Millimetern gemessen. Die Kompaktadicke d_C (cortical thickness) ergibt sich als Differenz aus Gesamtknochen- und Markhöhlendurchmesser (Tab. 62). Bei der Methode geht GARN von einer hohen Reproduzierbarkeit der Ergebnisse von deutlich über 95 % aus. Gleichzeitig stellte er fest, dass es tendenziell zu einer Überschätzung des Gesamtknochendurchmessers d_T und einer Unterschätzung des Markhöhlendurchmessers d_M kommt. Letzteres liegt vor allem in der schwierigen Abgrenzung von Kompakta und endostal-trabekularer Schicht. GARN geht daher von einer leichten Überschätzung des tatsächlichen Kompaktadurchmessers d_C aus. Von

einer wesentlich schlechteren Reproduzierbarkeit der Methode gehen dagegen MAZESS UND CAMERON (1972) aus und geben den Intra- und Interobserver-Fehler jeweils mit 4 bis 5 % an bzw. den Fehler bei der Verwendung von Bildduplikaten mit 5 bis 10 %. Damit seien die Fehler z. T. erheblich größer als der jährliche Zuwachs an Knochen (bei Schulkindern). In ähnlicher Weise äußert sich erneut MAZESS (1983), der für die Präzision einen Fehler zwischen 5 bis 10 % und für die Richtigkeit einen Fehler von 10 bis 25 % bei Radiographien des MC II angibt. Nicht ganz vergleichbar mit diesen Angaben ist der Hinweis von TANNER ET AL. (1981), die in ihrer Arbeit für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse anhand der Differenz von Messwerten zwischen Duplikaten von Röntgenbildern einen Variations-Koeffizienten (%cv=100 x s/MW) von weniger als 4 % angeben.

Tabelle 62: Bezeichnung und Berechnung der Parameter nach GARN (1970; die grau hervorgehobenen Parameter werden am Röntgenbild gemessen) zur Berechnung der Skelettmasse anhand des Metacarpus II.

Metarcarpus II (MC II)	Gesamtknochen	Markhöhle	Kompakta
- **D**urchmesser (d)	d_T	d_M	$d_C = d_T - d_M$
- **F**läche* (f)	$f_T = d_T^2 \times \pi / 4$ $= d_T^2 \times 0{,}7854$	$f_M = d_M^2 \times \pi / 4$ $= d_M^2 \times 0{,}7854$	$f_C = (d_T^2 - d_M^2) \times \pi / 4$ $= (d_T^2 - d_M^2) \times 0{,}7854$
- **L**änge (l)	l	l	l
- **V**olumen (V)	$V_T = d_T^2 \times l \times \pi / 4$ $= d_T^2 \times l \times 0{,}7854$	$V_M = d_M^2 \times l \times \pi / 4$ $= d_M^2 \times l \times 0{,}7854$	$V_C = (d_T^2 - d_M^2) \times l \times \pi / 4$ $= (d_T^2 - d_M^2) \times l \times 0{,}7854$
Skelett**M**asse* (SM)			$SM = V_C \times 0{,}969$ $= (d_T^2 - d_M^2) \times l \times 0{,}7611$

* f_C ist nicht $d_C^2 \times 0{,}7854$, Bsp,:
$d_T = 1$, $d_M = 0{,}5$, $d_C = d_T - d_M = 0{,}5$
$f_C = (d_T^2 - d_M^2) \times 0{,}7854 = (1^2 - 0{,}5^2) \times 0{,}7854 = 0{,}75 \times 0{,}7854 = 0{,}58905$ (richtig)
$f_C = d_C^2 \times 0{,}7854 = 0{,}5^2 \times 0{,}7854 = 0{,}25 \times 0{,}7854 = 0{,}19635$ (falsch)

GARN nimmt für den MC II in der Diaphysenmitte einen annähernd runden Querschnitt an. Unter dieser Annahme können die subperiostale Gesamtknochenfläche f_T, die Markhöhlenfläche f_M und die Kompaktafläche f_C als Kreisflächen errechnet werden. Multipliziert man diese mit der gleichzeitig ermittelten Gesamtknochenlänge l des MC II, ergibt sich das Gesamtvolumen V_T, das Markhöhlenvolumen V_M und das Kompaktavolumen V_C. Der MC II wird dadurch auf die Form eines Hohlzylinders reduziert. Diese Vereinfachung wurde nachfolgend hinterfragt. LAZENBY (2002) konnte zeigen, dass diese Annahmen zu einer Überschätzung der Knochengröße und -masse führen. Mit Hilfe von Skelettserien konnte er nachweisen, dass eine elliptische Form des MC II den Gegebenheiten besser entspricht.

Weiterhin setzt GARN (1970) das Kompaktavolumen über einen konstanten Faktor von 0,969 g/mm³ mit der Skelettmasse SM in Beziehung. Dieser Faktor ergibt sich als Quotient aus dem Skelettgewicht für im Durchschnitt 25 Jahre alte Europide (4290 g) aus der Studie von BAKER UND NEWMAN (1957) und dem Kompaktavolumen V_C für Männer der Gruppe „White Ohio“ im Alter von 30 Jahren (4425 mm³). Diese Beziehung ist nach GARN unabhängig von Rasse, Geschlecht, Alter und Skelettregion und beruht auf seiner Annahme einer konstanten Knochendichte zwischen $1{,}028_{europid}$ bzw. $1{,}024_{negrid}$ g/cm³ (vgl. Kap. II 5.3.1).

Im Ergebnis seiner Modellierungen steht bei GARN die Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung eines geschlechtsspezifischen Durchschnittsindividuums, wobei er eine „RMS variability“ der Skelettmasse von 12 % angibt (1970, tbl. XXXIV, p. 83). Eine Übernahme dieser Werte (Gruppe der „White Ohio“ in Zweijahres-Intervallen) findet sich in Anhang 19 und diese werden zusammen mit den Werten von TROTTER und Mitarbeitern in Abbildung 31 dargestellt.

Bei der Neuberechnung der Kompaktafläche nach den Vorgaben von GARN entsprechend Tabelle 62 ergaben sich Abweichungen zu den in der Arbeit von 1970 publizierten Werten. Die Unterschiede ergeben sich, da je Altersklasse nur die Mittel- und nicht die Einzelwerte durch GARN angegeben wurden und damit die Berechnung zwangsläufig anhand der Mittelwerte erfolgen musste. Tendenziell werden durch die Neuberechnung der Kompaktafläche für alle Altersklassen die Skelettmassen bei den Männern leicht unterschätzt und bei den Frauen leicht überschätzt. Die Unterschiede sind jedoch gering. Nachfolgend werden hier die Originalwerte berücksichtigt.

VI 2.2.3 Vergleich der Arbeiten von TROTTER und GARN

In Abbildung 31 werden die nach GARN (1970) berechneten Skelettmassen mit den Werten von TROTTER und Co-Autoren verglichen. Damit enstpricht diese der bei TROTTER UND PETERSON (1970) gezeigten figure 2, die jedoch Werte von GARN UND WAGNER (1969) verwendeten. Die Werte von GARN UND WAGNER (1969) und GARN (1970) unterscheiden sich je Altersklasse nur unwesentlich voneinander. Eine entsprechende Abbildung auf Grundlage von Daten von GARN (1976) findet sich bei FORBES (1987, fig. 5.11, p. 191) jedoch nicht für die Skelettmasse, sondern für die Kompaktafläche f_C des MC II.

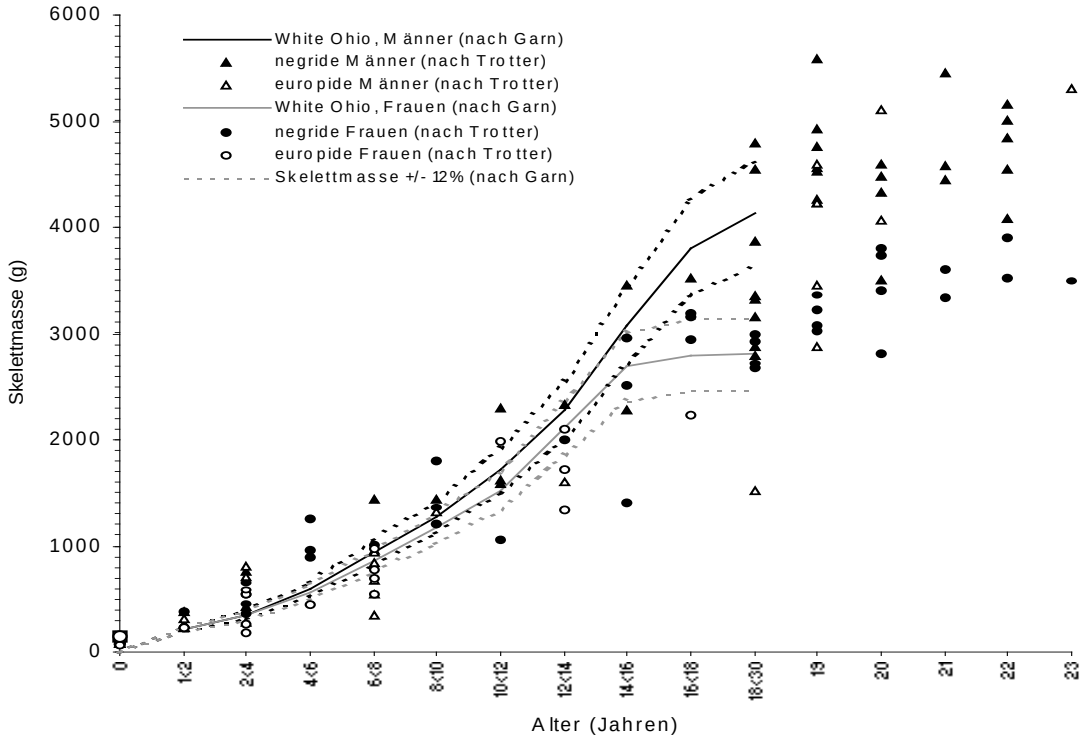


Abbildung 31: Vergleich der Arbeit von GARN (1970, Anhang 19) mit den Arbeiten von TROTTER UND PETERSON (1969a, b, 1970) sowie TROTTER UND HIXON (1974, Anhang 17).

Nach GARN (1970) haben Frauen von der Geburt bis zum 16. Lj. einen tendenziell längeren MC II, dennoch weisen die Männer bereits ab dem 2. Lj. eine im Durchschnitt tendenziell höhere Skelettmasse auf (Anhang 19). Dieser Unterschied nimmt mit zunehmendem Alter kontinuierlich zu und wird auch nicht durch den bei Mädchen um ca. 2 Jahre früher einsetzenden präpuberalen Wachstumsschub unterbrochen. Doch erst nach dem 14. Lj. überlagern sich die Intervalle beider Geschlechter aus durchschnittlicher Skelettmasse ± 12 % nicht mehr.

Anhand der Längendifferenz des MC II von Mädchen und Jungen lässt sich der Beginn des Wachstumsschubes ansatzweise erfassen: Bis zum 10. Lj. ist der Unterschied in der Länge des MC II zwischen Mädchen und Jungen geringer als 1 mm. Im Alter von 10 Jahren steigt der Unterschied auf 1,6 mm, um im Alter von 12 Jahren bereits 2,6 mm zu betragen. Doch schon mit 14 schrumpft der Unterschied auf 0,3 mm, danach ist und bleibt der MC II bei den Männern länger als bei den Frauen.

Ab dem 16. Lj. ist die Skelettmasse der Frauen deutlich geringer als die der Männer: Die Intervallgrenzen (Skelettmasse + 12 %)$_{Frauen}$ und (Skelettmasse - 12 %)$_{Männer}$ überlappen sich ab diesem Zeitpunkt nicht mehr. GARN UND WAGNER (1969) gehen zusammenfassend davon aus, dass ca. 50 % der Skelettmasse bis zum 10. Lj. gebildet werden und ca. 5 % der Skelettmasse nach dem 18. Lj., wobei diese Phase bis zum Ende des 4. Ljz. andauern kann. Vergleicht man nun diese Kurven mit den (Einzel)Werten von TROTTER und Co-Autoren, gewinnt man den Eindruck, dass die Skelettmassen durch die Modellierung von GARN ab dem 14. Lj. – und besonders deutlich bei den Frauen – unterschätzt werden. GARN schreibt dazu (1970, S. 84):

„Most recently, Trotter and Peterson (1970) have compared actual weights of infant, child, adolescent and young adult skeletons with the estimates previously given by us (Garn and Wagner, 1969). They report a close fit between our skeletal weight *estimates* and their measurements, though nothing a somewhat later adolescent gain in their skeletal material, comparable to what we have found in lower socio-economic groups in Texas, Michigan, Louisiana, New York and West Virginia."

Dieser Argumentation kann hier nicht zugestimmt werden. Vielmehr werden die Ursachen in einem methodischen Problem gesehen: Der MC II ist ab einem Alter von 14 Jahren bei den Mädchen und ca. 17 Jahren bei den Jungen nicht mehr oder nur deutlich eingeschränkt zur Modellierung der Skelettmasse geeignet. Dies lässt sich aus ontogenetischer Sicht durchaus erklären. Die distalen Extremitätenabschnitte beginnen und enden eher mit dem Wachstum während des (prä)puberalen Wachstumsschubes im Vergleich zu proximal gelegeneren Skelettabschnitten der Extremitäten bzw. im Vergleich zum Rumpfskelett, so z. B. gezeigt bei TANNER ET AL. (1981, fig. 4) mit einem Vergleich von Tibia und Humerus von Jungen und Mädchen bezüglich der durchschnittlichen Wachstumsbeschleunigung (in mm/a). Nach GREULICH UND PYLE (1959) beginnt bei den Mädchen im Alter von 13,5 Jahren der Verschluss der (distalen) Epiphysenfuge. Bereits mit 15 Jahren ist dieser Prozess abgeschlossen. Bei den Jungen beginnt dieser Prozess erst im Alter von 15,5 Jahren und ist im Alter von 17 Jahren beendet. Zu diesen Zeitpunkten findet jedoch in anderen Abschnitten des postkranialen Skelettes noch deutliches Wachstum statt, wenn auch eher Dicken- als Längenwachstum (Anhang 20 und 21, Abb. 32):

Das Längenwachstum des MC II entspricht in guter Näherung dem Längenwachstum von Tibia und Femur (ANDERSON UND GREEN 1948, MARESH 1955, MAAT 1984), für welches ebenfalls bis zum 13. Lj. kein Geschlechtsunterschied erkennbar wird. Dagegen wird das Körperlängenwachstum nach FLÜGEL ET AL. (1986) durch den MC II etwas unterschätzt. Weiterhin unterscheidet sich die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ deutlich vom Dickenwachs-

tum (Körpergewicht: FLÜGEL ET AL. 1986, Kompakta-Fläche: GARN 1970) und auch von der Entwicklung des Kalzium-Anteils (CHRISTIANSEN ET AL. 1975a, b). Nach CHRISTIANSEN ET AL. (1975b) haben Jungen vom 6. bis zum 9. und dann wieder ab dem 15. Lj. einen signifikant höheren Kalziumwert als gleichaltrige Mädchen. In der Literatur finden sich für den Kalziumanteil im Knochenmineral Werte von ca. 32 bis ca. 40 %, die wiederum ca. 99 % des Gesamtkörperkalziums entsprechen. Obwohl diese Werte für Erwachsene ermittelt wurden und Beobachtungen für Nichterwachsene nicht vorliegen, konnten BAILEY ET AL. (2000) unter Annahme entsprechender Verhältnisse in einer Längsschnittstudie an 60 Jungen und 53 Mädchen nachweisen, dass das Maximum der Kalziumaufnahme im Knochen bei den Jungen etwa 0,6 Jahre und bei den Mädchen etwa 0,7 Jahre dem individuellen Maximum des Körperlängenwachstums folgt. Weiterhin stellten sie fest, dass während des (prä)puberalen Wachstumsschubes etwa 26 % des im Erwachsenenalter vorliegenden Gesamtknochenkalziums aufgenommen werden. Damit liegt dieser hohe Zuwachs um 27 bis 34 % über dem aus vergleichbaren Querschnittsstudien ermittelten Werten, was den schon von EVELETH UND TANNER (1990) aufgezeigten problematischen Vergleich zwischen Quer- und Längsschnittstudien entspricht (Kap. II 5.4.3). Bei allen Werten zeigten Jungen höhere Werte als Mädchen und bestätigen somit den deutlichen Sexualdimorphismus beim Menschen.

Nach ROCHE (1978, Fig. 11, S. 331) ist der Zusammenhang zwischen Körper- und Femurlänge linear und spiegelt den deutlichen Zusammenhang zwischen Körper bzw. Gesamtskelett und postkranialem Skelett wider (Kap. II 5.4.5). Dagegen ist der funktionale Zusammenhang zwischen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ und Körperlänge eher sigmoidal: Phasen einer raschen Skelettmasse-Zunahme wechseln mit Phasen einer langsameren Zunahme ab. Die Phasen der relativ langsamen Masse-Zunahme liegen bei Jungen – auf der Grundlage der Daten von TROTTER UND PETERSON (1970) – bei Individuen zwischen ca. 103 und 116 cm (etwa 3. bis 5./6. Lj. nach FLÜGEL ET AL. 1986: erste Streckung) und ca. 140 und 174 cm ((prä)puberaler Wachstumsschub). Erst nach Erreichen einer Körperhöhe von 174 cm, was nach FLÜGEL ET AL. (1986) einem Alter von mindestens 15 Jahren entspricht, werden bei den Männern von ca. 2100 g auf ca. 3800 g noch 1700 g oder 45 % der Skelettmasse aufgebaut. In der gleichen Zeit erhöht sich nach ROCHE die Körperlänge nur noch um etwa 4 cm. Auch wenn ROCHE wegen der geringen Fallzahlen seine Gegenüberstellung nur als Veranschaulichung eines allgemeinen Trends verstanden wissen will, wird deutlich: Diese hohe Massezunahme nach dem 16. Lj. kann durch das Modell von GARN nicht erfasst werden. Denn bei GARN fällt das Ende der deutlichen Skelettmasse-Zunahme mit dem Verschluss der Epiphysenfuge zusammen, wie in Abbildung 32 erkennbar

wird. Darüber hinaus muss noch ein eher genereller Einwand von CARLSON ET AL. (1976) für die Verwendung des MC II als Modell zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung berücksichtigt werden, die diesen mit einer wesentlich geringeren mechanischen Belastung der Hand im Vergleich zu den massereichen Knochen der Beine begründen (Kap. II 4.2).

Der Unterschied zwischen den Arbeiten von GARN und TROTTER wird also nicht – und entgegen GARNS Einschätzung – in einer Akzeleration oder Retardation einer der beiden Stichproben gesehen, sondern in methodischen Problemen. Die Entwicklung eines Einzelknochens kann nur in Annäherung als pars pro toto die Skelettentwicklung beschreiben, die sich ja als durchschnittliche Entwicklung aus der Summe aller Einzelknochen ergibt. Die Abweichungen liegen bei den Einzelknochen im zeitlich unterschiedlichen Auftreten der Knochenkerne und Schließen der Epiphysenfuge(n) sowie dem Abschluss des Dickenwachstums begründet. Anhand der Abbildung 32 kann die Annahme von GARN (1970), aber auch von LAZENBY (2002), nicht bestätigt werden, dass durch die Verwendung des MC II als pars pro toto für das Gesamtskelett die Skelettmasse eher überschätzt wird.

Ein wichtiges Argument für die Wahl des MC II zur Modellierung der Skelettmasse lag für GARN – neben der relativ kostengünstigen und für den Probanden/Patienten wenig belastenden Radiographie der Hand – in einem ähnlichen Verhältnis von Kompakta und Spongiosa wie im Gesamtskelett von 80 % zu 20 %. Doch gerade an dieser Gleichsetzung greift die Kritik von MAZESS UND CAMERON (1972) an. Sie schreiben dort:

„The mere measurement of large number of subjects does not insure the validity of results. For example Garn and Wagner (1969) have estimated total skeletal mass, and dietary mineral requirements, based on radiographic morphometry of the second metacarpal in thousands of subjects. The representativeness of this site and this bone, the accuracy of the local measurement, and the validity of the extrapolation to the total skeleton have not been demonstrated. Such majestic speculation, though perhaps correct, must be viewed with candor; like the fabled emporer more substantial clothig, in the form of validation, is required prior to public acceptance.“ (S. 88).

Ob diese ‚Erhöhung der Substanz‘ mit der Akzeptanz der Arbeiten von GARN durch SEEMAN (2001b) nachgeholt wurde, mag offen bleiben. Jedoch kann darin ein weiterer Hinweis auf die schwierige Tradierung von Erkenntnis in den Skelettwissenschaften nach FROST (1998) gesehen werden (Kap. II 4.1).

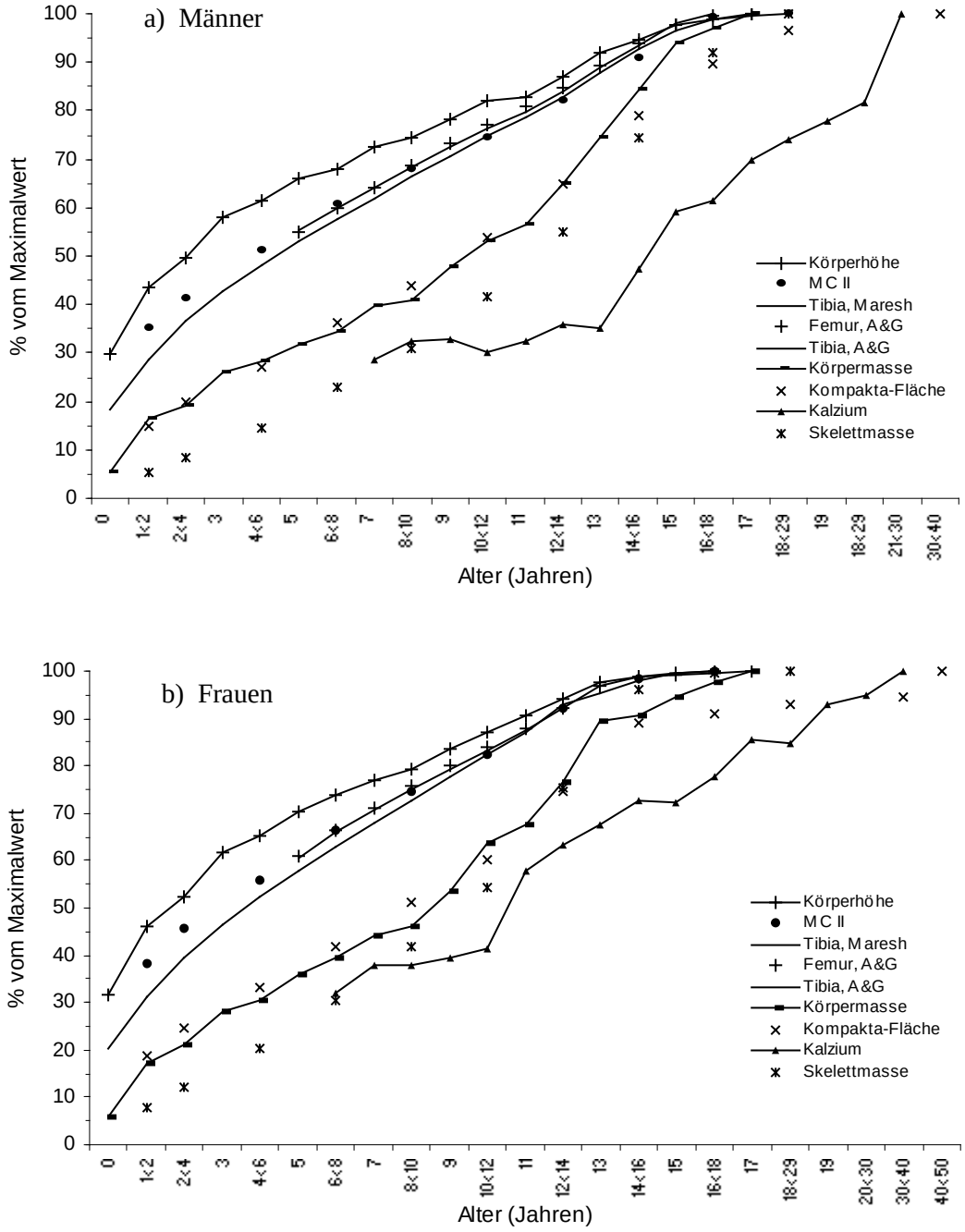


Abbildung 32: Alter und prozentuale Entwicklung der Länge des MC II, der Kompakta-Fläche des MC II und der Skelettmasse (nach GARN 1970), der Länge der Tibia (MARESH 1984), der Länge der Tibia und des Femur (nach ANDERSON UND GREEN 1948), der Körperhöhe und des Körpergewichtes (nach FLÜGEL ET AL. 1986) sowie des Kalziumanteils (nach CHRISTIANSEN 1975a, b).

a) Männer (Anhang 20)
b) Frauen (Anhang 21)

(Je Altersklasse Prozent jeweils vom Maximalwert).

Wie bereits erwähnt, verglichen auch TROTTER UND PETERSON (1970) ihre Werte mit der Studie von GARN UND WAGNER (1969) und versuchten, die Entwicklung der Skelettmasse in Abhängigkeit zum Alter mathematisch zu erfassen. Obwohl sie, wohl auch in Anlehnung an das Modell von GARN, einen s-förmigen Kurvenverlauf vemuteten, gelang es ihnen nicht, ein mathematisches Modell anzupassen. Dagegen versuchten sie einen Zusammenhang mit der Länge von Extremitätenknochen herzustellen. Diese Modelle sind für die vorliegende Studie jedoch ungeeignet. Vielmehr soll hauptsächlich anhand der Daten von TROTTER und Co-Autoren erneut versucht werden, ein mathematisches Modell für die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ zu entwickeln, aus der nachfolgend die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ berechnet werden kann (Kap. V 2). Dies erfolgt in vollem Bewusstsein dessen, dass die ausgewählten Studien im Sinne der vorliegenden Fragestellung nicht als ideal angesehen werden können. Geeignetere Arbeiten konnten jedoch nicht recherchiert werden und wie aus Abbildung 32 ersichtlich, lässt sich die Skelettmasse nur schwer über das Längen- bzw. Dickenwachstum oder anhand von Gewebefraktionen wie Kalzium erfassen (siehe auch Kap. II 5). Nicht zuletzt aus diesen Gründen und nach einer nicht mehr überschaubaren Flut von Arbeiten zur Knochendichte-Messung griffen auch KLEIN UND WOLFE (2001) wieder auf eine Skelettserie zur Bestimmung der Sklettmasse ab dem 20. bis zum 90. Lj. zurück.

VI 2.3 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ von der Geburt bis zum 3. Ljz. (0 bis 22,5 Jahre)

VI 2.3.1 Die Beurteilung der Homoskedastizität

Nach Ausschluss ungeeigneter Datensätze (Anhang 22, Kap. IV 2.2) verbleiben zur Modellierung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ im Alter von 0 bis zu 22,5 Jahren 141 Datensätze bzw. 277 Individuen, die ca. 10 % der zusammengetragenen Datenbasis darstellen. Im Anhang 23 findet sich für 24 Altersklassen von 0 bis 22,5 Jahre die Deskription für die Skelettmasse unter Berücksichtigung der je Datensatz enthaltenen Individuen, getrennt für beide Geschlechter und zusammen für diese beiden. Es ist deutlich zu erkennen: Mit zunehmendem Alter steigt sowohl die mittlere Skelettmasse als auch die Streuung der Einzelwerte um den jeweiligen Mittelwert an. Diese zunehmende Streuung ist bei Wachs-

tums- und Reifungsprozessen in der Anthropologie, Humanbiologie und Medizin sehr häufig zu beobachten und ist häufig Ausdruck einer mit dem Alter zunehmenden interindividuellen Variabilität. Nach Abschluss des Wachstums und mit dem Eintritt in einen stabile(re)n Entwicklungsabschnitt wird das erreichte Niveau an interindividueller Variabilität beibehalten, wenn diese nicht nur durch unterschiedliche Entwicklungstempi hervorgerufen wurde, sondern auf unterschiedliche Niveaus führt, wie diese z. B. auch bei der maximalen Skelettmasse$_{netto}$ der Fall sind.

Um die zunehmende interindividuelle Variabilität bei der Auswertung besser entgegenzuwirken, wurde für jede der 24 Altersklassen zwischen 0 und 22,5 Jahre die mittlere Skelettmasse anhand gewichteter Datensätze berechnet (Anhang 24). Beurteilt man nun die Abhängigkeit der Streuung von der mittleren Skelettmasse je Altersklasse mit Hilfe einfacher linearer Regressionsmodelle für die Altersklassen, in denen mindestens zwei Datensätze vorlagen (Männer: n = 13, Frauen: n = 19), kann gezeigt werden, dass die Heteroskedastizität durch die Gewichtung der Datensätze (Kap. IV 3.3.1 Formel 14) im Vergleich zu Berechnungen unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Datensatz tatsächlich reduziert wird (p-Wert für Test auf Heteroskedastizität nimmt zu). Dieser Effekt ist jedoch für die gesamte Stichprobe deutlicher als für die nach Geschlecht getrennten Teilstichproben (Tab. 63). Demgegenüber besteht weiterhin zwischen Streuung und mittlerer Skelettmasse je Altersklasse für die Gesamtstichprobe ein stärkerer und bei den Männern noch ein leichter Zusammenhang (p-Werte für die mittlere Skelettmasse: 0,001 bzw. 0,047). Und es können weiterhin noch immer durch die Variabilität der mittleren Skelettmasse etwa 44 bzw. 25 % der Variabilität der Streuung erklärt werden (R^2_{adj}).

Zusammenfassend wird dennoch die Gewichtung der Datensätze als das bessere und gleichzeitig ausreichende Vorgehen für die Modellierung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ durch lineare Regressions-Modelle angesehen (SAS®-Code, siehe Kap. IV 3.3.1). Durch den gewählten Gewichtungsfaktor wird berücksichtigt, dass es sich bei den Werten für die Skelettmasse um Durchschnittswerte anhand unterschiedlicher Individuenzahlen (n = 1 bis n = 15) handelt und ein deutlicher Zusammenhang zwischen zunehmender Variabilität und Lebensalter besteht.

Tabelle 63: Beurteilung der Streuung der Einzelwerte um die mittlere Skelettmasse je Altersklasse für Männer und Frauen im Alter von 0 bis 22,5 Jahre (SAS®-Code Kap. IV 3.3.1)

a) Unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Datensatz (Anhang 23)

b) Unter Berücksichtigung von gewichteten Datensätzen (Kap. IV 3.3.1 Formel 14, Anhang 24).

a)

Modell	Anzahl der Datensätze[x]	p-Wert für die mittlere Skelettmasse*	R^2_{adj}**	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*
gesamt	22	<0,001	0,690	0,088
Männer	13	0,003	0,537	0,176
Frauen	19	0,130	0,079	0,401

b)

Modell	Anzahl der Datensätze[x]	p-Wert für die mittlere Skelettmasse*	R^2_{adj}**	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*
gesamt	22	<0,001	0,439	0,212
Männer	13	0,047	0,250	0,223
Frauen	19	0,776	-0,054	0,482

[x] In die Modelle gehen nur Altersklassen ein, die durch mindestens zwei Datensätze repräsentiert werden.

* Je größer, desto besser
** Je kleiner, desto besser
} da möglichst kein Zusammenhang nachgewiesen werden soll

VI 2.3.2 Auswahl von Einflussgrößen auf die $Skelettmasse_{netto}$

Für alle 141 Datensätze waren neben Alter und Geschlecht die Rasse und die Literatur-Quelle bekannt. Die Literatur-Quelle steht dabei für den Einfluss der Methode auf die $Skelettmasse_{netto}$, wobei diese nur für 6 Individuen nicht am Skelett, sondern indirekt anhand des MC II bestimmt wurde. Anhand der gewichteten Datensätze wurde mit gemischten linearen Modellen überprüft (Proc Mixed in SAS®, Code: Kap. IV 3.3.2), ob und welche Einflussgrößen neben dem Alter (Modell 2, p-Wert < 0,001) auf die Skelettmasse einwirken (Tab. 64). Der Interkorrelationskoeffizient (IKK, Kap. IV 3.3.2 Formel 15) in den Modellen 1 und 2 betrug 0 %, was bedeutet, dass die Individuen innerhalb eines Geschlechts sehr heterogen sind. Durch die Hinzunahme der drei Faktoren Geschlecht, Rasse, Literatur-Quelle und der Wechselwirkung von Alter und Geschlecht in Modell 3 wird die Anpassungsgüte zwar erhöht (AIC fällt von 2420,3 im Modell 1 auf 1885,9 in Modell 3) und auch die Variabilität zwischen den Individuen geht weiter zurück, jedoch zeigte keiner der drei

Faktoren einen Effekt auf die Skelettmasse$_{netto}$. Nur die Wechselwirkung wird mit einem p-Wert von < 0,001 signifikant.

Tabelle 64: Auswahl von Einflussgrößen auf die Skelettmasse$_{netto}$ mit Hilfe von gemischten linearen Modellen (SAS®-Code Kap. IV 3.3.2).

Modell			p-Werte für Einflussgrößen*	AIC*	Variabilität zwischen den Individuen*
	Alle 141 Datensätze (gewichtet):				
1:	keine Einflussgrößen		-	2420,3	374122
2:	stetig:	Alter	<0,001	2045,7	26846
3:	stetig:	Alter	<0,001	1885,9	21899
	klassiert:	Geschlecht, Rasse, Literatur	>0,529		
	Wechselwirkung:	Alter x Geschlecht	<0,001		
	Datensätze getrennt nach Geschlecht (gewichtet):				
4:	Männer: stetig:	Alter	<0,001	1075,0	31485
4:	Frauen: stetig:	Alter	<0,001	908,9	10899

* je kleiner, desto besser
AIC Akaike-Maß

Die Ergebnisse dieser Auswertung ergeben Sinn. Die hohe und in Abhängigkeit vom Alter auch zunehmende interindividuelle Variabilität überdeckt jeden weiteren Einfluss, sowohl den von Geschlecht und Rasse, als auch den der Methode (Literatur-Quelle). In der Wechselwirkung zwischen Alter und Geschlecht findet dagegen die unterschiedliche Altersstruktur in den beiden Geschlechtern Ausdruck, wie diese bereits in Kapitel IV 2.2.1 beschrieben wurde, und es werden ggf. auch die unterschiedlichen Entwicklungstempi in beiden Geschlechtern erfasst (Kap. II 5.4.2). Werden einfache Co-Varianz-Modelle getrennt für beide Geschlechter wie mit dem Modell 4 berechnet, erhöht sich die Güte der Modell-Anpassung im Vergleich zu den vorangegangenen Modellen weiter (AIC wird erneut kleiner). Gleichzeitig wird die verbleibende Variabilität zwischen den Individuen bei den Frauen geringer, steigt jedoch bei den Männern an. Und somit unterstreichen auch diese Ergebnisse den Unterschied zwischen beiden Geschlechtern und lassen es sinnvoll erscheinen, nachfolgend die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ getrennt für beide Geschlechter und in Abhängigkeit vom Alter in Form von Polynomen zu beschreiben.

VI 2.3.3 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Männer im Alter von 0 bis 22,5 Jahre

Zu beachten ist, dass sich bei den Männern das Altersintervall von 0 bis 22,5 Jahren mit dem Altersintervall von 20,5 bis 83,5 Jahre überschneidet. Insgesamt 9 Individuen im Alter von 20,5 bis 22,5 Jahre (laufende Nummern 168, 169, 170, 173 bis 177, 180; Anhang 25 bzw. 30 und 33) gehen in die Berechnungen zu beiden Altersintervallen ein. Diese Überlappung ist notwendig, um in einem nachfolgenden Schritt ein geeignetes Gesamtmodell für Männer im Alter von 0 bis 83,5 Jahre zusammenstellen zu können.

Für die Beschreibung der Abhängigkeit der Skelettmasse vom Lebensalter zwischen 0 und 22,5 Jahren standen für die Männer insgesamt 73 Datensätze mit 133 Individuen zur Verfügung. Zur Beurteilung dieses Zusammenhanges wurden vier Regressionsmodelle als Polynome des 1. bis 4. Grades formuliert. In Tabelle 65 werden für diese Modelle das Bestimmtheitsmaß R^2_{adj}, der p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität und die p-Werte für die einzelnen Einflussgrößen angeführt. In Abbildung 33a sind diese vier Funktionen und im Vergleich zu den einzelnen Werten dargestellt.

Jede dieser vier Polynome beschreibt anhand der vorliegenden Daten eine durchschnittliche Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$. Doch können diese nicht als Normkurven für Männer im Alter von 0 bis 22,5 Jahren angesehen werden. Dazu reicht weder die Anzahl der erhobenen Daten noch erlaubt es die immer noch beachtliche und mit zunehmender Skelettmasse auch deutlich zunehmende Streuung der Residuen um „0“. Dieser Zusammenhang lässt sich in Abbildung 33b für die Polynome des 2. bis 4. Grades darstellen.

Ein aus der Sicht der Anthropologie ungeeignetes Modell zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ in Abhängigkeit vom Alter stellt die einfache lineare Regression dar (hier als Polynom 1. Grades bezeichnet), obwohl auch durch dieses Modell etwa 94 % der beobachteten Variabilität bei der Skelettmasse auf den Einfluss des Alters zurückgeführt werden. Die Polynome des 2. bis 4. Grades unterscheiden sich nur wenig (Anhang 25), die Graphen für das Polynom des 2. bzw. des 3. Grades lassen sich in Abbildung 33a bei der bestehenden Zeichengenauigkeit nicht unterscheiden. Diese drei Modelle führen jeweils etwa 96 % der beobachteten Variabilität der Skelettmasse auf den Einfluss des Alters zurück und unterscheiden sich nur unwesentlich: Das Alter selbst zeigt in allen Modellen einen deutlichen Einfluss (p-Werte < 0,001), die Potenzen für das Alter dagegen nur im Polynom des 2. Grades.

Tabelle 65: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse$_{netto}$ für Männer von 0 bis 22,5 Jahre (SAS®-Code Kap. IV 3.3.3; Anhang 25).

Modell	R^2_{adj}*	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*	p-Wert für die Einflussgrößen**
Polynom 1. Grades	0,9381	0,1922	Alter: <0,001
Polynom 2. Grades	0,9602	0,1295	Alter: <0,001 Alter²: <0,001
Polynom 3. Grades	0,9597	0,2552	Alter: 0,004 Alter²: 0,241 Alter³: 0,921
Polynom 4. Grades	0,9596	0,5244	Alter: 0,008 Alter²: 0,690 Alter³: 0,355 Alter$^{4:}$ 0,356

* je größer, desto besser
** je kleiner, desto besser
Polynom 1. Grades: Skelettmasse = 76,81900 + 201,69780 x Alter
Polynom 2. Grades: Skelettmasse = 92,37562 + 91,50506 x Alter + 6,43944 x Alter²
Polynom 3. Grades: Skelettmasse = 92,15003 + 94,07193 x Alter + 5,94830 x Alter² + 0,01860 x Alter³
Polynom 4. Grades: Skelettmasse = 90,20765 + 124,61570 x Alter – 5,23447 x Alter² + 1,02716 x Alter³ – 0,02622 x Alter^4

Anhand Abbildung 33b wird deutlich, dass die Fehlervarianz (Residuen) mit dem Alter deutlich zunimmt – trotz der Berücksichtigung des Gewichtungfaktors in den einzelnen Modellen. Die Residuen streuen jedoch symmetrisch um „0“ und der Test auf Heteroskedastizität wird für keines der 4 Modelle auffällig (p-Werte >> 0,1), so dass die Voraussetzungen zur Berechnung linearer Regressionsmodelle nicht verletzt sind.

Eine Möglichkeit, der Zunahme der Fehlervarianz zu begegnen, wäre z. B. die Berechnung von Regressions-Modellen innerhalb weiterer, nach dem Alter unterteilter Intervalle. Betrachtet man unter diesem Blickwinkel Abbildung 33b, deutet sich jeweils eine Zunahme der Fehlervarianz bei einer berechneten Skelettmasse von 500 und 2500 g an, was einem Alter von 3,5 bzw. 13,5 Jahren entsprechen würde (Anhang 35). Diese Alter markieren (sinnvoll) biologische Entwicklungseinschnitte: Den Beginn der ersten Streckung mit etwa 3 Jahren und den durchschnittlichen Beginn des (prä)puberalen Wachstumsschubes mit 14 Jahren bei den Jungen. Jedoch darf – und vor allem für den „Spline“ bei 2500 g – die bestehende Datensituation mit dem Fehlen von Jungen im Alter von 13, 13,5, 14 sowie 15, 15,5 und 16 Jahren nicht vernachlässigt werden. Weiterhin fallen drei Individuen durch auffällige Werte auf (Anhang 22): Die Individuen 136 (17,5 Jahre, 1525 g) und 149 (18,5 Jahre, 5587,5 g) liegen in allen vier Regressions-Modellen außerhalb des 95 %-Prädiktionsgrenzen für Einzelwerte (hier nicht dargestellt) und Individuum 70 weist im Alter von 6,5 Jahren mit 350 g eine sehr niedrige Skelettmasse auf.

Somit wird hier unter Berücksichtigung der vorliegenden Datensituation mit ihren „Lücken“ sowie den auffälligen Werten für die drei Individuen (lfd. Nr. 70, 136 und 149) dieser Ansatz zur Berechnung der Skelettmasse innerhalb weiterer Altersintervalle im Sinne von „Spline“-Modellen nicht weiter verfolgt.

Das Ziel, ein an die vorliegenden Daten möglichst einfaches mathematisches Modell zur Berechnung der (durchschnittlichen) jährlichen relativen Änderung der $Skelettmasse_{netto}$ anzupassen, wird auf Grundlage des Polynoms 2. Grades erreicht. Es beschreibt von den vier gerechneten Regressions-Modellen unter Beachtung aller Ergebnisse die $Skelettmasse\text{-}Entwicklung_{netto}$ am besten und vorallem einfacher als das kaum davon zu unterscheidende Polynom 3. Grades.

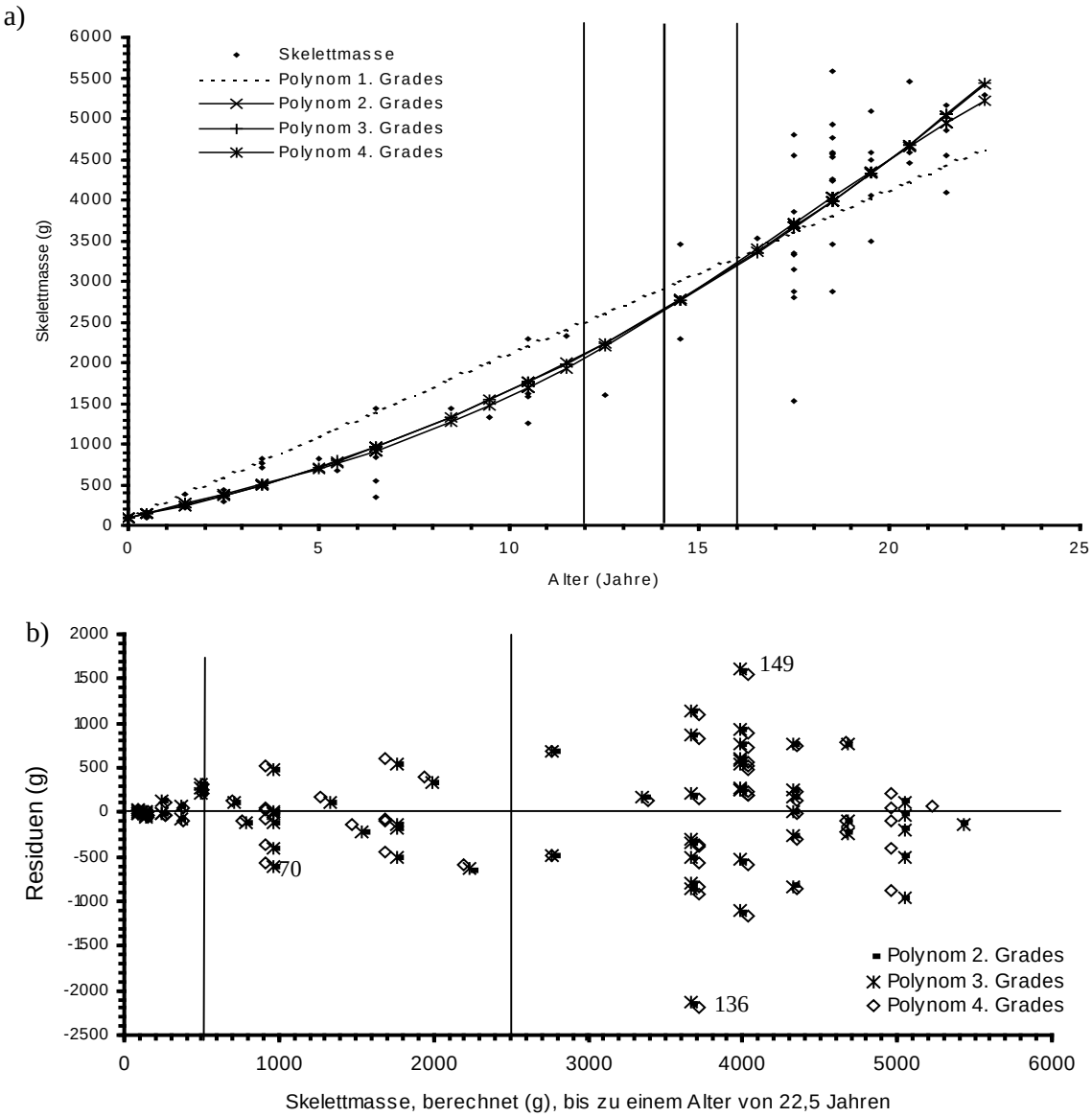


Abbildung 33: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für <u>Männer</u> im Alter von 0 bis 22,5 Jahre (vgl. Anhang 25)

a) Darstellung des Zusammenhanges für die Polynome des 1. bis 4. Grades.
Die Senkrechten markieren den durchschnittlichen Beginn des (prä)puberalen Wachstumsschubes bei den Jungen mit 14 ± 2 Jahren.

b) Darstellung der Residuen (Differenz aus beobachteter und berechneter Skelettmasse) für die Polynome des 2. bis 4. Grades.
Die Zahlen identifizieren Datensätze mit auffälligen Werten (siehe Anhang 22)
Die Senkrechten markieren Intervalle mit einer ähnlicheren Fehlervarianz
bei 500 g (3,5 Jahre, Anhang 35) und bei 2500 g (< 13,5 Jahre, Anhang 35)

Polynom 1. Grades: SM = 76,81900 + 201,69780 x Alter
Polynom 2. Grades: SM = 92,37562 + 91,50506 x Alter + 6,43944 x Alter^2
Polynom 3. Grades: SM = 92,15003 + 94,07193 x Alter + 5,94830 x Alter^2 + 0,01860 x Alter^3
Polynom 4. Grades: SM = 90,20765 + 124,61570 x Alter – 5,23447 x Alter^2 + 1,02716 x Alter^3 – 0,02622 x Alter^4

VI 2.3.4 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Frauen im Alter von 0 bis 22,5 Jahre

Zu beachten ist, dass sich bei den Frauen das Altersintervall von 0 bis 22,5 Jahren mit dem Altersintervall von 20,5 bis 84,5 Jahre überschneidet. Insgesamt 5 Individuen im Alter von 20,5 bis 22,5 Jahre (laufende Nummern 171, 172, 178, 179 und 181; Anhang 26 bzw. 31 und 34) gehen in die Berechnungen zu beiden Altersintervallen ein. Diese Überlappung ist notwendig, um in einem nachfolgenden Schritt ein geeignetes Gesamtmodell für Frauen im Alter von 0 bis 84,5 Jahre zusammenstellen zu können.

Für die Modellierung der Skelettmasse in Abhängigkeit vom Alter bei Frauen zwischen 0 und 22,5 Jahren standen insgesamt 68 Datensätze mit 144 Individuen zur Verfügung. Zur Beurteilung dieses Zusammenhanges wurden vier Regressionsmodelle als Polynome des 1. bis 4. Grades formuliert. In Tabelle 66 werden für diese Modelle das Bestimmtheitsmaß R^2_{adj}, der p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität und die p-Werte für die einzelnen Einflussgrößen angeführt. In Abbildung 34a sind diese vier Funktionen im Vergleich zu den einzelnen Werten dargestellt.

Jede dieser vier Polynome beschreibt anhand der vorliegenden Daten die durchschnittliche Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ im Alter von 0 bis 22,5 Jahren, ohne dass diese als Normkurven für Frauen interpretiert werden können. Dazu reicht weder die Anzahl der erhobenen Daten, noch erlaubt es die immer noch beachtliche und mit zunehmender Skelettmasse auch deutlich zunehmende Streuung der Residuen um „0“, die für die Polynome des 1. und 2. Grades im Test auf Heteroskedastizität einen p-Wert <10 % liefert. Der Zusammenhang zwischen Fehlervarianz und Skelettmasse wird in Abbildung 34b für die Polynome des 2. bis 4. Grades dargestellt.

Aus der Sicht der Anthropologie stellt die einfache lineare Regression, hier als Polynom 1. Grades bezeichnet, ein ungeeignetes Modell zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ in Abhängigkeit vom Alter dar, obwohl etwa 95 % der beobachteten Variabilität bei der Skelettmasse auf den Einfluss des Alters zurückgeführt werden. Die Unterschiede für die Polynome des 2. bis 4. Grades sind gering (Abb. 34a) und es werden jeweils 96 % der beobachteten Variabilität der Skelettmasse auf die Einflussgrößen zurückgeführt. Im Polynom 2. Grades zeigen beide Altersvariablen und in den Polynomen des 3. und 4. Grades zeigt dagegen nur noch das Alter selbst einen deutlichen Einfluss auf die Skelettmasse (Tab. 66, p-Werte < 0,001).

Tabelle 66: Zusammenhang zwischen Alter und $Skelettmasse_{netto}$ für Frauen von 0 bis 22,5 Jahre (SAS®-Code Kap. IV 3.3.3; Anhang 26).

Modell	R^2_{adj}*	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*	p-Wert für die Einflussgrößen**
Polynom 1. Grades	0,9533	0,0994	Alter: <0,001
Polynom 2. Grades	0,9611	0,0963	Alter: <0,001 $Alter^2$: <0,001
Polynom 3. Grades	0,9608	0,1834	Alter: <0,001 $Alter^2$: 0,154 $Alter^3$: 0,492
Polynom 4. Grades	0,9603	0,2974	Alter: <0,001 $Alter^2$: 0,948 $Alter^3$: 0,705 $Alter^{4:}$ 0,621

* je größer, desto besser
** je kleiner, desto besser
Polynom 1. Grades: Skelettmasse = 83,65774 + 155,32532 x Alter
Polynom 2. Grades: Skelettmasse = 87,79401 + 116,73614 x Alter + 2,53409 x $Alter^2$
Polynom 3. Grades: Skelettmasse = 88,44097 + 105,71691 x Alter + 4,76951 x $Alter^2$ - 0,08763 x $Alter^3$
Polynom 4. Grades: Skelettmasse = 88,00312 + 116,94054 x Alter + 0,59208 x $Alter^2$ + 0,30088 x $Alter^3$ - 0,01036 x $Alter^4$

In Abbildung 34b sind die Residuen für die Polynome des 2. bis 4. Grades dargestellt. Bei einer Skelettmasse von etwa 600 g (ca. 4 Jahre, Anhang 36) lassen sich zwei Bereiche mit ähnlicheren Fehlervarianzen unterscheiden. Unter Berücksichtigung von 3 auffälligen Werten wird auch für die Frauen innerhalb dieser beiden so entstandenen Intervalle die $Skelettmasse_{netto}$ nicht im Sinne von „Spline"-Modellen berechnet: Im Alter von 4,5 Jahren weist Individuum 56 mit 1250 g eine sehr hohe und im Alter von jeweils 13,5 Jahren weisen Individuum 110 mit 1400 g eine sehr niedrige und Individuum 111 dagegen mit 2962,5 g eine sehr hohe Skelettmasse auf (Anhang 22).

Berücksichtigt man die vorliegende Datensituation sowie die Ergebnisse aus den vier gerechneten Regressions-Modellen, können sowohl das Polynom des 2. als auch des 3. Grades als fast gleichwertige Modelle zur Beschreibung der $Skelettmasse\text{-}Entwicklung_{netto}$ angesehen werden, wobei dem Polynom 2. Grades der Vorzug gegeben wird (Anhang 26). Als einfachstes und gleichzeitig ausreichend gut an die Daten angepasstes mathematisches Modell wird es nachfolgend zur Berechnung der (durchschnittlichen) jährlichen relativen Änderung der $Skelettmasse_{netto}$ herangezogen.

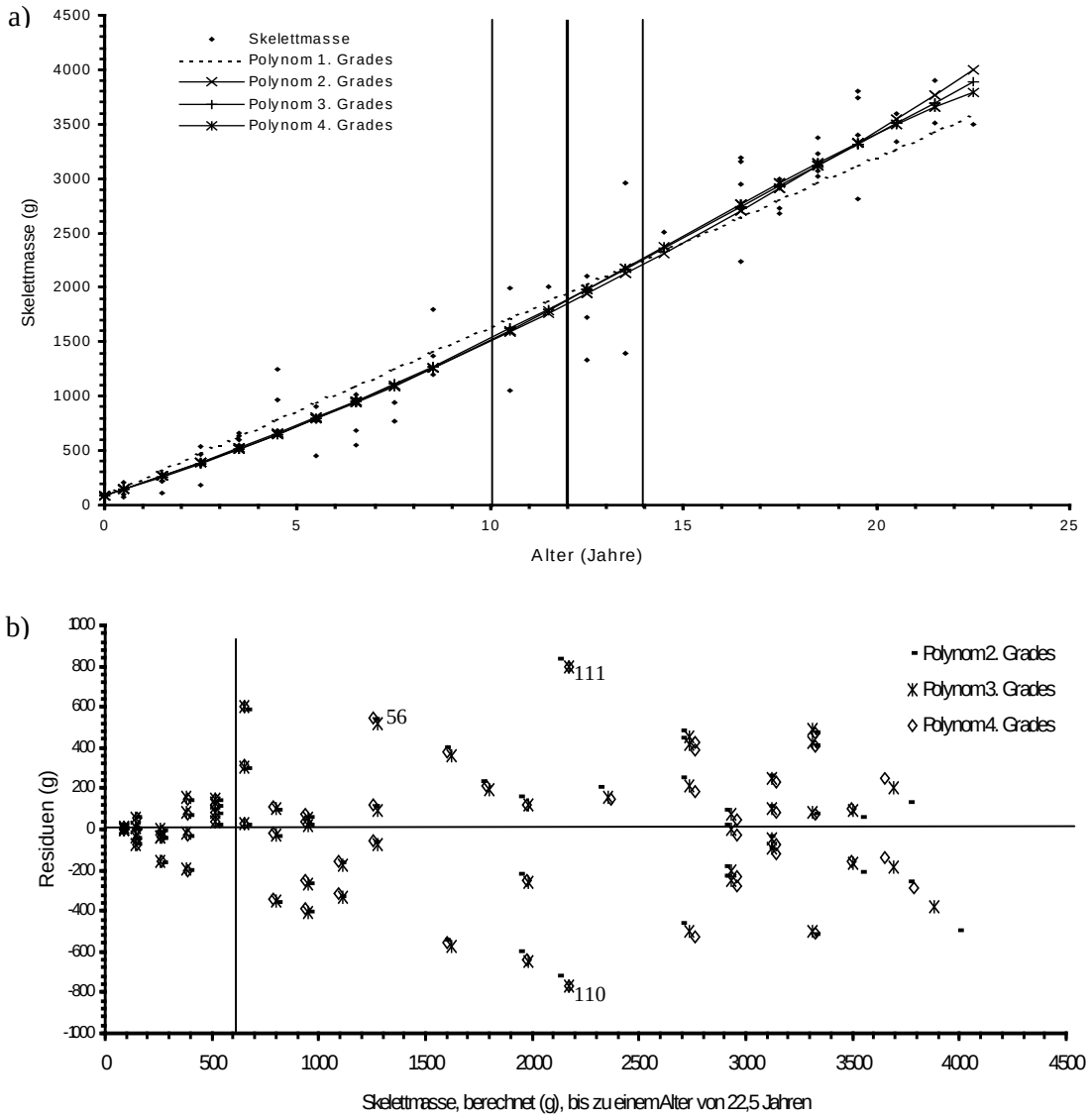


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für <u>Frauen</u> im Alter von 0 bis 22,5 Jahre (vgl. Anhang 26)

a) Darstellung des funktionalen Zusammenhanges für die Polynome des 1. bis 4. Grades.
Die Senkrechten markieren den durchschnittlichen Beginn des (prä)puberalen Wachstumsschubes bei Mädchen mit 12 ± 2 Jahren.

b) Darstellung der Residuen (Differenz aus beobachteter und berechneter Skelettmasse) im Alter von 0 bis 22,5 Jahren für die Polynome des 2. bis 4. Grades
Die Zahlen identifizieren Datensätze mit auffälligen Werten (Anhang 22).
Die Senkrechte (in etwa) bei 600 g (> 4,5 Jahre, Anhang 36) teilt in zwei Intervalle mit ähnlicheren Fehlervarianzen .

Polynom 1. Grades: SM = 83,65774 + 155,32532 x Alter
Polynom 2. Grades: SM = 87,79401 + 116,73614 x Alter + 2,53409 x Alter²
Polynom 3. Grades: SM = 88,44097 + 105,71691 x Alter + 4,76951 x Alter² – 0,08763 x Alter³
Polynom 4. Grades: SM = 88,00312 + 116,94054 x Alter + 0,59208 x Alter² + 0,30088 x Alter³ – 0,01036 x Alter⁴

VI 2.4 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ ab dem 3. Ljz. (20,5 bis 84,5 Jahre)

VI 2.4.1 Die Beurteilung der Homoskedastizität

Nach Ausschluss ungeeigneter Datensätze (Anhang 27) verblieben zur Modellierung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ 93 Datensätze bzw. 1276 Individuen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahren, die 95,5 % der zusammengetragenen Datenbasis darstellen. Im Anhang 28 findet sich für die zwischen 20,5 und 84,5 Jahre alten und in 33 Altersklassen zusammengefassten Individuen die Deskription für die Skelettmasse unter Berücksichtigung der je Datensatz enthaltenen Individuen, getrennt und zusammen für beide Geschlechter. Alle diese Individuen befinden sich in Entwicklungsstadien, in denen die Skelettmasse als quasi-stabil angesehen werden kann bzw. schrumpft. Die hohe Variabilität zwischen den Individuen, wie diese zum Ende der Wachstums- und Reifungsphase erreicht wurde, ist hier ebenfalls zu beobachten (Kap. VI 2.3). Es lässt sich daher auch kein deutlicher Zusammenhang zwischen mittlerer Skelettmasse je Altersklasse und der Streuung der einzelnen Werte um den jeweiligen Mittelwert erkennen. Die Streuung erscheint vielmehr davon abhängig zu sein, wieviele Datensätze und Individuen je Datensatz innerhalb einer Altersklasse vorlagen.

Dennoch wurde überprüft, ob der vorhandenen Streuung der einzelnen Werte um die mittlere Skelettmasse je Altersklasse zwischen 20,5 und 84,5 Jahre durch die Gewichtung der Datensätze besser begegnet werden kann (Kap. IV 3.3.1 Formel 14, Anhang 29). Dazu wurden einfache lineare Regressionsmodelle gerechnet. Tabelle 67 enthält die relevanten Ergebnisse. Insgesamt konnte kein Zusammenhang zwischen Streuung und mittlerer Skelettmasse$_{netto}$ für die mindestens zwei Datensätze enthaltenen Altersklassen nachgewiesen werden (p-Werte für die mittlere Skelettmasse: > 0,13; R^2_{adj}: < 0,07). Es konnte keine Verletzung der Homoskedastizität nachgewiesen werden (p-Werte für Test auf Heteroskedastizität: > 0,10).

Wegen einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse in beiden Altersintervallen und für beide Geschlechter werden die Datensätze in den nachfolgenden Modellen ebenfalls gewichtet. Damit gehen die einzelnen Datensätze für Individuen zwischen 20,5 und 84,5 Jahre untereinander gleichwertiger in die nachfolgenden Modellierungen ein. Beispielsweise reduziert sich der maximale Unterschied in der Bewertung zweier Datensätze von 95 auf 19,5 (Datensatz 193 mit 95 Individuen und dem Gewichtungsfaktor von 0,39 und beispielsweise Datensatz 213 mit 1 Individuum und dem Gewichtungsfaktor von 0,02; Anhang 27).

Tabelle 67: Beurteilung der Streuung der Einzelwerte um die mittlere Skelettmasse je Altersklasse für Männer und Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahre (SAS®-Code Kap. IV 3.3.1)

a) Unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Datensatz (Anhang 28)

b) Unter Berücksichtigung von gewichteten Datensätzen (Kap. IV 3.3.1 Formel 14, Anhang 29).

a)

Modell	Anzahl der Datensätze[x]	p-Wert für die mittlere Skelettmasse*	R^2_{adj}**	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*
gesamt	21	0,341	-0,002	0,104
Männer	13	0,542	-0,053	0,213
Frauen	12	0,626	-0,073	0,290

b)

Modell	Anzahl der Datensätze[x]	p-Wert für die mittlere Skelettmasse*	R^2_{adj}**	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*
gesamt	21	0,135	0,067	0,626
Männer	13	0,510	-0,047	0,234
Frauen	12	0,930	-0,099	0,491

[x] In die Modelle gehen nur Altersklassen ein, die durch mindestens zwei Datensätze repräsentiert werden.

* Je größer, desto besser
** Je kleiner, desto besser
} da möglichst kein Zusammenhang nachgewiesen werden soll

VI 2.4.2 Die Selektion von Einflussgrößen auf die Skelettmasse

Für alle 93 Datensätze mit 1276 Individuen ist neben Alter und Geschlecht, die Rasse und die Literatur-Quelle bekannt (Anhang 29). In der Literatur-Quelle wird die Methode der Skelettmasse-Bestimmung klassiert. Bei 300 (23,5 %) Individuen bzw. für 12 Datensätze wurde die Skelettmasse indirekt bestimmt (GARN 1970).

Es wurde mit 5 gemischten linearen Modellen anhand gewichteter Datensätze überprüft (Proc Mixed in SAS®), ob und welche Einflussgrößen neben dem Alter auf die Skelettmasse einwirken. Dabei zeigen alle drei Faktoren (Geschlecht, Rasse, Literatur-Quelle) einen deutlichen Effekt auf die Skelettmasse. Gleichzeitig – und im Gegensatz zu den Nicht-Erwachsenen – wurde die Wechselwirkung zwischen Alter und Geschlecht nicht signifikant (Tab. 68). Durch die Hinzunahme der drei Faktoren und der Wechselwirkung (Modell 3) wird die Güte der Anpassung im Vergleich zu den Modellen 1 und 2 erhöht (AIC von 1439,4 auf 1316,3) und die Reststreuung geht schrittweise zurück. Der Einfluss der Methode

(Literatur) kann nach den Ausführungen in Kapitel II 5.3 und VI 2.2.3 nicht überraschen. Nach Ausschluss der Daten von GARN (1970, Anhang 32). verbesserten sich die Eigenschaften des Modells erneut (Modell 4: AIC 1167,8).

Tabelle 68: Selektion von Einflussgrößen auf die $Skelettmasse_{netto}$ mit Hilfe von gemischten linearen Modellen (SAS®-Code Kap. IV 3.3.2).

Modell			p-Werte für Einflussgrößen	AIC*	Streuung zwischen den Individuen*
Alle 93 Datensätze (gewichtet, Anhang 29):					
1:	keine Einflussgrößen**		-	1439,4	19606
2:	stetig:	Alter***	<0,001	1418,3	16399
3:	stetig:	Alter	<0,001	1316,3	10381
	klassiert:	Geschlecht,	<0,001		
		Rasse,	<0,001		
		Literatur	<0,001		
	Wechselwirkung:	Alter x Geschlecht	0,365		
Nach Ausschluss der 12 Datensätze bzw. 300 Individuen von GARN (1970), (gewichtet, Anhang 32):					
4:	stetig:	Alter	<0,001	1167,8	11265
	klassiert:	Geschlecht,	<0,001		
		Rasse,	<0,001		
		Literatur	<0,001		
Datensätze getrennt nach Geschlecht (gewichtet, Anhang 32):					
5: Männer:	stetig:	Alter	0,009	679,9	16146
	klassiert:	Rasse	0,006		
		Literatur	0,009		
5: Frauen:	stetig:	Alter	<0,001	446,4	4718,67
	klassiert:	Rasse	<0,001		
		Literatur	<0,001		

* je kleiner, desto besser
** Interkorrelations-Koeffizient =97,99 %; Streuung zwischen den Geschlechtern: 956389
*** Interkorrelations-Koeffizient =98,17 %; Streuung zwischen den Geschlechtern: 882519
AIC Akaike-Maß

Die Ergebnisse dieser Auswertungen ergeben Sinn. Der während der Wachstums- und Reifephase entstandene Unterschied zwischen den Geschlechtern wird nachfolgend beibehalten. Diese hohe interindividuelle Variabilität überdeckt jede Wechselwirkung zwischen Alter und Geschlecht, wie diese z. B. mit dem unterschiedlichen Zeitpunkt für den Eintritt in die post-reproduktive Phase gegeben ist. Werden einfache Co-Varianz-Modelle getrennt für beide Geschlechter berechnet (Modell 5), erhöht sich die Güte der Modell-Anpassung im Vergleich zu dem Gesamtmodell (AIC wird erneut kleiner: Männer 679,9; Frauen 446,4). Gleichzeitig wird die verbleibende Reststreuung bei den Frauen geringer, steigt jedoch bei den Männern an und unterstreicht damit indirekt noch einmal den Unterschied zwischen beiden Geschlechtern.

Anhand der p-Werte für die Einflussgrößen lässt sich ein deutlicher Einfluss der Rasse auf die Skelettmasse erkennen (p-Werte < 0,001). Dennoch wird dieser Faktor in den nachfolgenden Berechnungen nicht mehr berücksichtigt und beeinflusst somit die interindividuelle Variabilität – die neben biologischen eben auch methodische Aspekte hat. Diese Entscheidung wird hier in Übereinkunft mit den Schlussfolgerungen aus Kapitel II 5.4.6 getroffen und ermöglicht zudem eine bessere Vergleichbarkeit der Modelle für beide Altersintervalle.

VI 2.4.3 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahre

Zu beachten ist, dass sich das Altersintervall von 20,5 bis 83,5 Jahren mit dem Altersintervall von 0 bis 22,5 Jahre überschneidet. Insgesamt 9 Individuen im Alter von 20,5 bis 22,5 Jahre (laufende Nummern 168, 169, 170, 173 bis 177, 180; Anhang 25 bzw. 30 und 33) gehen in die Berechnungen zu beiden Intervallen ein. Diese Überlappung ist notwendig, um in einem nachfolgenden Schritt ein geeignetes Gesamtmodell für Männer im Alter von 0 bis 83,5 Jahre zusammenstellen zu können.

Für die Modellierung der Skelettmasse bei den Männern in Abhängigkeit vom Alter zwischen 20,5 und 83,5 Jahren standen insgesamt 53 Datensätze mit 763 Individuen zur Verfügung. Zur Beurteilung des Zusammenhanges wurden vier Regressionsmodelle als Polynome des 1. bis 4. Grades formuliert. In Tabelle 69a werden für diese Modelle das Bestimmtheitsmaß R^2_{adj}, der p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität und die p-Werte für die Einflussgrößen angeführt.

In einem nachfolgenden Schritt wurden 6 Datensätze von GARN (1970, vgl. Anhang 27) ausgeschlossen. Für diese 150 Individuen ergaben sich methodisch bedingt (indirekte Bestimmung der Skelettmasse) und im Vergleich zu entsprechenden Datensätzen annähernd gleichaltriger Individuen zu niedrige Skelettmassen (Kap. VI 2.2.3). Der Ausschluss wirkt sich auf den Kurvenverlauf aus und führt vor allem in den, für die Zusammenführung der Modelle für beide Altersintervalle wichtigen Altersklassen von 20,5 bis 22,5 Jahre zu einer Anhebung der geschätzten Skelettmassen (Abb. 35a; Anhang 29 und 30 sowie Anhang 32 und 33 für Männer im Alter von 20,5 bis 22,5 Jahre für alle 4 Polynome). Die Ergebnisse aus diesen Berechnungen sind in Tabelle 69b zusammengefasst.

Tabelle 69: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse$_{netto}$ für Männer von 20,5 bis 83,5 Jahre (vgl. SAS®-Code Kap. IV 3.3.3).

a) Vor Ausschluss der 6 Datensätze bzw. 150 Individuen von GARN (1970, Anhang 32)

b) Nach Ausschluss der Daten von GARN (1970, Anhang 33).

a)

Modell	R^2_{adj}*	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*	p-Wert für die Einflussgrößen**
Polynom 1. Grades	0,1056	0,175	Alter: 0,010
Polynom 2. Grades	0,1172	0,198	Alter: 0,419 Alter²: 0,202
Polynom 3. Grades	0,1011	0,372	Alter: 0,631 Alter²: 0,652 Alter³: 0,750
Polynom 4. Grades	0,0829	0,606	Alter: 0,962 Alter²: 0,923 Alter³: 0,884 Alter$^{4:}$ 0,865

* je größer, desto besser
** je kleiner, desto besser

b)

Modell	R^2_{adj}*	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*	p-Wert für die Einflussgrößen**
Polynom 1. Grades	0,1186	0,071	Alter: 0,010
Polynom 2. Grades	0,1356	0,080	Alter: 0,380 Alter²: 0,176
Polynom 3. Grades	0,1254	0,217	Alter: 0,392 Alter²: 0,408 Alter³: 0,490
Polynom 4. Grades	0,1047	0,236	Alter: 0,886 Alter²: 0,953 Alter³: 0,983 Alter$^{4:}$ 0,942

* je größer, desto besser
** je kleiner, desto besser

Polynom 1. Grades: Skelettmasse = 5013,33334 – 11,23734 x Alter
Polynom 2. Grades: Skelettmasse = 4386,82018 + 21,36010 x Alter – 0,35373 x Alter²
Polynom 3. Grades: Skelettmasse = 3310,33348 + 100,65104 x Alter – 2,06817 x Alter² + 0,01127 x Alter³
Polynom 4. Grades: Skelettmasse = 3652,60174 + 67,13628 x Alter – 0,93158 x Alter² – 0,00468 x Alter³ + 0,00007887 x Alter^4

Der Zusammenhang zwischen Skelettmasse und Alter ist für alle Modelle gering ($R^2_{adj} < 0,14$), die Potenzen des Alters lassen – außer für das Polynom 1. Grades – mit p-Werten > 0,17 keinen Einfluss auf die Skelettmasse erkennen.

Das Fehlen von Individuen zwischen 26,0 und 33,5, 35,5 und 43,5, 45,0 und 52,5, 54,5 und 59,5 sowie 69,0 und 74,5 bzw. 74,5 und 82,0 Jahren erlaubt keine Berechnung innerhalb von weiter unterteilen Altersintervallen, die biologisch sinnvollen Entwicklungsabschnitten entsprechen würden. Weiterhin kann der Datensatz mit der laufenden Nummer 255 (MERZ ET AL. 1956) als auffällig bewertet werden: Für diese acht, im Durchschnitt 74,5 Jahre alten Individuen wird die Skelettmasse von 5340 g in allen Modellen um mindestens 1100 g unterschätzt (Anhang 30 und 33).

Jedes der vier Polynome beschreibt somit nur einen Trend für die Skelettmassereduktion ab einem Alter von 20,5 Jahren. Die Polynome des 3. und 4. Grades unterscheiden sich dabei praktisch nicht voneinander. Sie lassen sich – auch bei Berücksichtigung der Zeichengenauigkeit – in Abbildung 35a nicht unterscheiden und ihre Residuen sind annähernd deckungsgleich (Abb. 35b). Somit bleibt zu entscheiden, welches der drei verbleibenden Polynome bei allen Einschränkungen durch die vorliegende Datensituation die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ im Erwachsenenalter am besten erfasst. Diese Entscheidung wird jedoch erst in Kapitel VI 2.6 getroffen, nachdem für die Männer in Kapitel VI 2.5 und VI 2.5.1 die Berechnungen für beide Altersintervalle zusammengeführt und unter Beachtung relevanter Literatur diskutiert wurden.

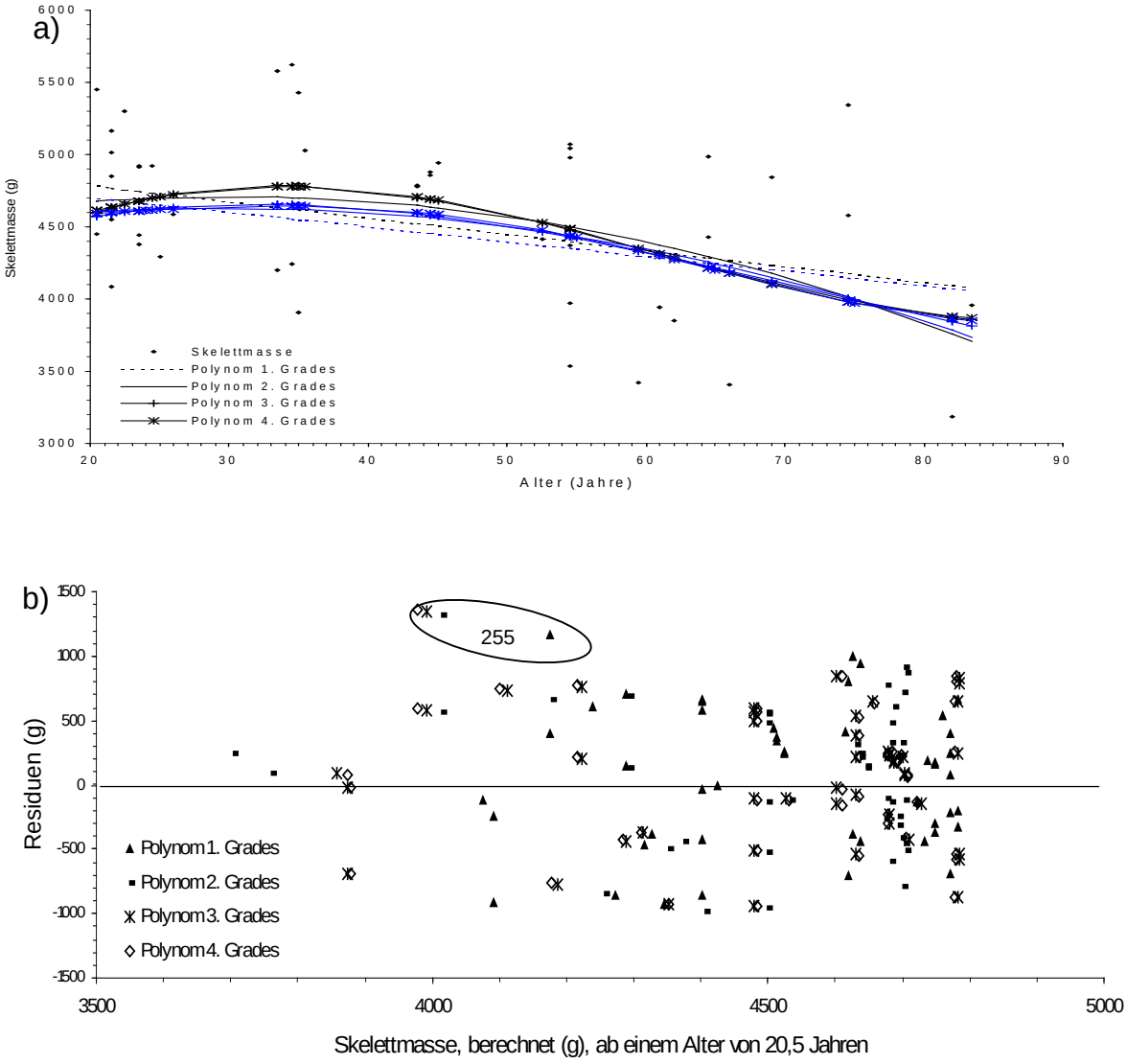


Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für <u>Männer</u> im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahre (vgl. Anhang 30 und 33)

a) Darstellung des funktionalen Zusammenhanges für Polynome des 1. bis 4. Grades

Blau: Vor Ausschluss der 6 Datensätze/150 Individuen von GARN (1970, Anhang 30)

Schwarz: Nach Ausschluss der 6 Datensätze/150 Individuen von GARN (1970, Anhang 33)

b) Darstellung der Residuen (Differenz aus beobachteter und berechneter Skelettmasse) für die Polynome des 1. bis 4. Grades nach Ausschluss der Daten von GARN (1970).
Mit 255 ist ein auffälliger Wert markiert (siehe Anhang 33)

Polynom 1. Grades: SM = 5013,33334 – 11,23734 x Alter
Polynom 2. Grades: SM = 4386,82018 + 21,36010 x Alter – 0,35373 x Alter²
Polynom 3. Grades: SM = 3310,33348 + 100,65104 x Alter – 2,06817 x Alter² + 0,01127 x Alter³
Polynom 4. Grades: SM = 3652,60174 + 67,13628 x Alter – 0,93158 x Alter² – 0,00468 x Alter³ + 0,00007887 x Alter⁴

VI 2.4.4 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahre

Zu beachten ist, dass sich das Altersintervall von 20,5 bis 84,5 Jahren mit dem Altersintervall von 0 bis 22,5 Jahre überschneidet. Insgesamt 5 Individuen im Alter von 20,5 bis 22,5 Jahre (laufende Nummern 171, 172, 178, 1979 und 181; Anhang 26 bzw. 31 und 34) gehen in die Berechnungen zu beiden Intervallen ein. Diese Überlappung ist notwendig, um in einem nachfolgenden Schritt ein geeignetes Gesamtmodell für Frauen im Alter von 0 bis 84,5 Jahre zusammenstellen zu können.

Bei den Frauen standen für die Modellierung der Skelettmasse in Abhängigkeit vom Alter zwischen 20,5 und 84,5 Jahren insgesamt 40 Datensätze mit 513 Individuen zur Verfügung. Zur Beurteilung des Zusammenhanges wurden vier Regressionsmodelle als Polynome des 1. bis 4. Grades formuliert. In Tabelle 70a werden für diese Modelle das Bestimmtheitsmaß R^2_{adj}, der p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität und die p-Werte für die Einflussgrößen angeführt.

In einem nachfolgenden Schritt wurden 6 Datensätze von GARN (1970, Anhang 27) ausgeschlossen. Für diese 150 Individuen ergaben sich methodisch bedingt (indirekte Bestimmung der Skelettmasse) und im Vergleich zu entsprechenden Datensätzen annähernd gleichaltriger Individuen zu niedrige Skelettmassen (Kap. VI 2.2.3). Der Ausschluss wirkt sich auf den Verlauf der Kurven – und besonders deutlich auf den des Polynoms 4. Grades – aus. Gleichzeitig führt dieser Ausschluss bis zu einem Alter von ca. 50 Jahren zu einer Anhebung der mit Hilfe der Modelle berechneten Skelettmassen. Dies hat vor allem Bedeutung in den für die Zusammenführung der Modelle für beide Altersintervalle wichtigen Altersklassen von 20,5 bis 22,5 Jahre (Abb. 36a; vgl. Anhang 29 und 31 sowie Anhang 32 und 34 für Frauen im Alter von 20,5 bis 22,5 Jahre für alle vier Polynome). Die Ergebnisse aus diesen Berechnungen sind in Tabelle 70b zusammengefasst.

Tabelle 70: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse$_{netto}$ für Frauen von 20,5 bis 84,5 Jahre (vgl. SAS®-Code Kap. IV 3.3.3).

a) Vor Ausschluss der 6 Datensätze bzw. 150 Individuen von GARN (1970, Anhang 33)

b) Nach Ausschluss der Daten von GARN (1970, Anhang 34)

a)

Modell	R^2_{adj}*	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*	p-Wert für die Einflussgrößen**
Polynom 1. Grades	0,2509	0,309	Alter: <0,001
Polynom 2. Grades	0,2454	0,329	Alter: 0,865 Alter²: 0,400
Polynom 3. Grades	0,2256	0,606	Alter: 0,852 Alter²: 0,890 Alter³: 0,820
Polynom 4. Grades	0,2135	0,768	Alter: 0,494 Alter²: 0,501 Alter³: 0,500 Alter$^{4:}$ 0,510

* je größer, desto besser
** je kleiner, desto besser

b)

Modell	R^2_{adj}*	p-Wert für den Test auf Heteroskedastizität*	p-Wert für die Einflussgrößen**
Polynom 1. Grades	0,3954	0,261	Alter: <0,001
Polynom 2. Grades	0,3872	0,070	Alter: 0,897 Alter²: 0,455
Polynom 3. Grades	0,3692	0,156	Alter: 0,763 Alter²: 0,682 Alter³: 0,737
Polynom 4. Grades	0,3474	0,251	Alter: 0,947 Alter²: 0,955 Alter³: 0,986 Alter$^{4:}$ 0,995

* je größer, desto besser
** je kleiner, desto besser

Polynom 1. Grades: Skelettmasse = 4071,03945 – 18,50233 x Alter
Polynom 2. Grades: Skelettmasse = 3751,66896 – 2,75787 x Alter – 0,16502 x Alter²
Polynom 3. Grades: Skelettmasse = 3288,96897 + 31,10570 x Alter – 0,88755 x Alter² + 0,00468 x Alter³
Polynom 4. Grades: Skelettmasse = 3314,66208 + 28,57971 x Alter – 0,80222 x Alter² + 0,00349 x Alter³ + 0,00000583 x Alter^4

Mindestens 35 % der beobachteten Variabilität bei der Skelettmasse wird durch jedes der 4 Polynome nach Ausschluss der Daten von GARN (1970) erfasst ($R^2_{adj} \geq 0{,}347$). Außer für das Polynom 1. Grades kann dieser Zusammenhang nicht unmittelbar auf die jeweils im Modell berücksichtigten Einflussgrößen zurückgeführt werden (p-Werte > 0,45). Das Fehlen von Individuen zwischen 23,5 und 28,0, 28,0 und 33,5, 35,0 und 43,5, 44,5 und 53,0, 54,5 und 61,0 sowie 66,0 und 74,5 bzw. 74,5 und 82,0 Jahren erlaubt keine Berechnung der

Skelettmasse innerhalb von weiter unterteilten Altersintervallen, die biologisch sinnvollen Entwicklungsphasen (z. B. prä- und postmenopausal) entsprechen würden.

Jedes der vier Polynome beschreibt somit nur einen Trend für die Skelettmassereduktion ab einem Alter von 20,5 Jahren. Die Polynome des 3. und 4. Grades unterscheiden sich dabei praktisch nicht voneinander. Sie lassen sich – auch bei Berücksichtigung der Zeichengenauigkeit – in Abbildung 36a nicht unterscheiden und ihre Residuen sind annähernd deckungsgleich (Abb. 36b). Somit bleibt zu entscheiden, welches der drei verbleibenden Polynome bei allen Einschränkungen durch die bestehende Datensituation die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ im Erwachsenenalter am besten erfasst. Diese Entscheidung wird jedoch erst in Kapitel VI 2.6 getroffen, nachdem für die Frauen in Kapitel VI 2.5 und VI 2.5.2 die Berechnungen für beide Altersintervalle zusammengeführt und unter Beachtung relevanter Literatur diskutiert wurden.

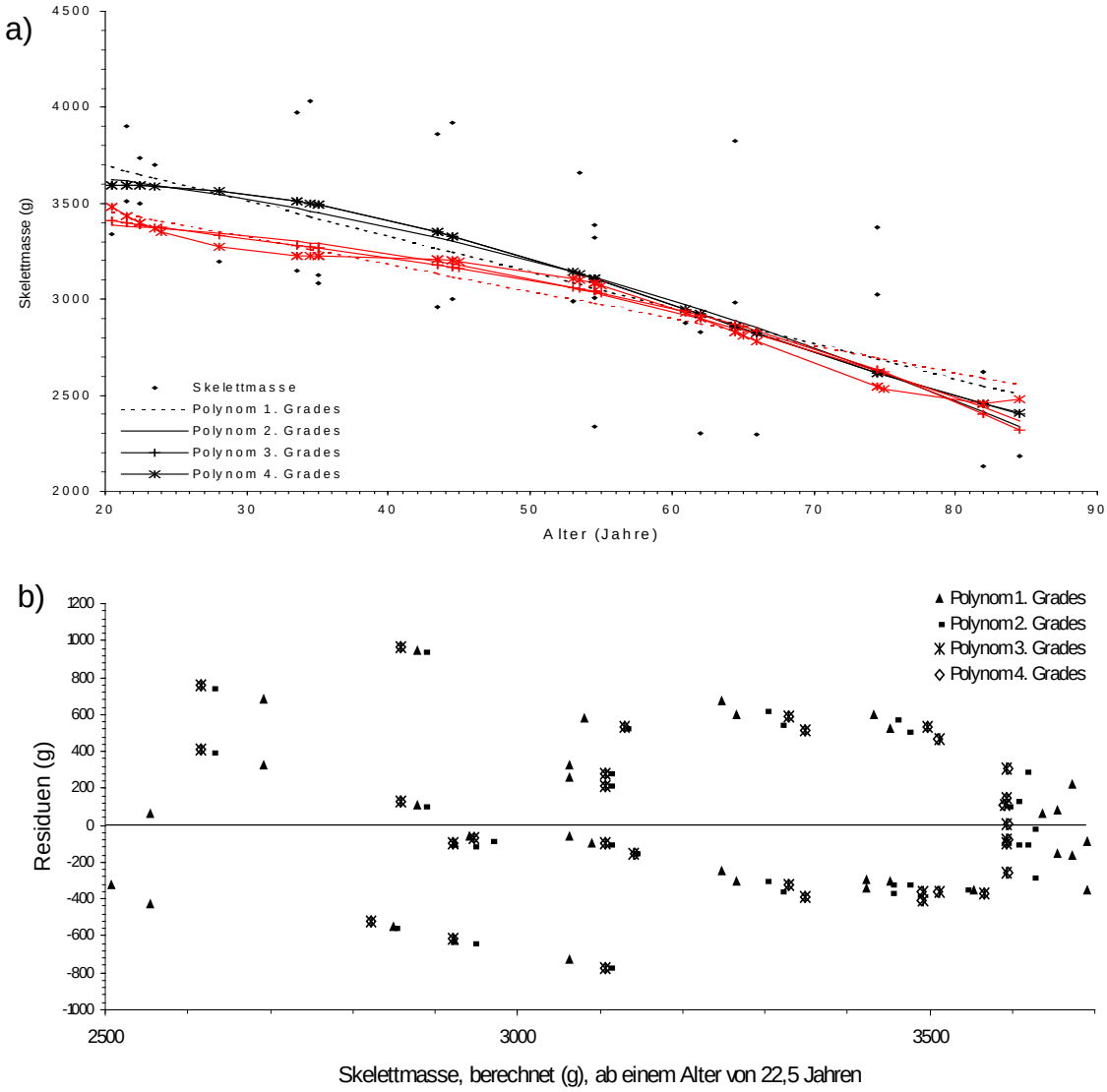


Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahre (vgl. Anhang 31 und 34)

a) Darstellung des funktionalen Zusammenhanges für die Polynome des 1. bis 4. Grades
   Rot: Vor Ausschluss der 6 Datensätze/150 Individuen von GARN (1970, Anhang 31)
   Schwarz: Nach Ausschluss der 6 Datensätze/150 Individuen von GARN (1970, Anhang 34)

b) Darstellung der Residuen (Differenz aus beobachteter und berechneter Skelettmasse für die Polynome des 1. bis 4. Grades nach Ausschluss der Daten von GARN (1970)

Polynom 1. Grades: SM = 4071,03945 – 18,50233 x Alter
Polynom 2. Grades: SM = 3751,66896 – 2,75787 x Alter – 0,16502 x Alter²
Polynom 3. Grades: SM = 3288,96897 + 31,10570 x Alter – 0,88755 x Alter² + 0,00468 x Alter³
Polynom 4. Grades: SM = 3314,66208 + 28,57971 x Alter – 0,80222 x Alter² + 0,00349 x Alter³ + 0,00000583 x Alter⁴

VI 2.5 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ von 0 bis 99 Jahre

Zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ standen nach Ausschluss nicht geeigneter Datensätze für die beiden Altersintervalle von 0 bis 22,5 (Kap. VI 2.3) Jahre bzw. 20,5 bis 83,5/84,5 Jahre (Kap. VI 2.4) 222 Datensätze mit 1253 Individuen zur Verfügung. Davon gehörten 120 (54,1 %) Datensätze mit 746 (59,5 %) Individuen dem männlichen und 102 (45,9 %) mit 507 (40,5 %) Individuen dem weiblichen Geschlecht an. Bei den Männern waren 9 und bei den Frauen 5 Individuen zwischen 20,5 und 22,5 Jahre alt und gingen somit in die Berechnung zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für beide Intervalle ein, die jeweils mit gewichteten Datensätzen durchgeführt wurde (Kap. IV 3.3.1 Formel 14). In den Abbildungen 37 (Männer) und 38 (Frauen) ist die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ mit den dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervallen für drei der vier Regressionen dargestellt. Diese ergeben sich aus den berechneten Polynomen, die in den vorangegangenen Kapiteln VI 2.3 und VI 2.4 berechnet wurden (Anhang 25 und 33 für die Männer und Anhang 26 und 34 für die Frauen). Anhand dieser Abbildungen lassen sich erste Ergebnisse formulieren:

Bis zu einem Alter von 22,5 Jahren nimmt die Skelettmasse jährlich deutlich zu ($R^2_{adj} \approx 96$ %). Die Regressionsgerade für das Polynom 1. Grades (ohne 95 %-Konfidenzintervall) beschreibt die Wachstumsvorgänge unzureichend, was für die Männer deutlicher als für die Frauen wird. Die Polynome des 2. bis 4. Grades lassen sich dagegen kaum unterscheiden und werden von relativ eng anliegenden 95 %-Konfidenzintervallen begleitet. In Kapitel VI 2.3 konnte bereits für jedes Geschlecht das Polynom 2. Grades als das einfachste und gleichzeitig ausreichend gut an die Daten angepasste Modell zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Individuen bis zu 22,5 Jahren erarbeitet werden. Dabei fällt auf, dass sich sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen eine Beschleunigung der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ um die Pubertät nicht feststellen lässt, wie es schon von GARN UND SHAW (1976) in Zusammenfassung vorangegangener Arbeiten beschrieben wurde. Denn die Skelettmasse Entwicklung$_{netto}$ ergibt sich aus dem Zusammenspiel des Längen- und Dickenwachstums der einzelnen Knochen und damit aus zwei Prozessen, die mit ontogenetisch nacheinander ablaufenden Phasen der „Streckung“ und „Fülle“ erkennbar werden, wobei in den Phasen der Fülle das Dickenwachstum und damit der Skelettmasse-Zuwachs dominiert.

Der Übergang zwischen den beiden Altersintervallen zwischen 20,5 und 22,5 Jahren gestaltet sich abrupt, was bei der Zusammenführung von zwei Modellen (in Anlehnung an Spline-Modelle) ein kaum zu vermeidendes Problem darstellt: Vor allem die hohen Skelettmassen spätjuveniler Individuen bewirken, dass – bei den Männern deutlicher als bei den Frauen – die Skelettmasse scheinbar „ungebremst“ über ein Alter von 22,5 Jahre hinaus aufgebaut wird. Dass dem nicht so ist, wird durch die Anpassung der Regressions-Modelle ab einem Alter von 20,5 Jahre deutlich.

Ab dem Alter von 20,5 Jahre werden die 95 %-Konfidenzintervalle für die Regressions-Kurven wesentlich breiter, was an der geringeren Anzahl der Beobachtungen und einer hohen interindividuellen Variabilität liegt, die nur noch einen schwachen Zusammenhang mit dem Alter erkennen lässt (Männer $R^2_{adj} \approx 10$ %; Frauen $R^2_{adj} \approx 37$ %). Kann bis zu einem Alter von 22,5 Jahren die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ mit Hilfe der Regressions-Modelle relativ gut beschrieben werden, wird ab einem Alter von 20,5 Jahren eher ein Trend erfasst. Die Polynome des 3. und 4. Grades lassen sich bei der gewählten Darstellungsgenauigkeit nicht mehr voneinander unterscheiden. Dagegen zeigt sich ein Unterschied zu den Polynomen des 1. und 2. Grades. Da die Regressions-Gerade für das Polynom 1. Grades innerhalb der 95 %-Konfidenzintervalle der anderen Polynome liegt, könnte die Massereduktion im Erwachsenenalter damit – bei den Frauen deutlicher als bei den Männern – ebenfalls ausreichend mit diesem Modell beschrieben werden. Dies gilt es nachfolgend zu diskutieren.

Für das Alter von 20,5 Jahren, zu dem die Polynome für beide Altersintervalle zusammengeführt werden, wird eine relativ gute Übereinstimmungen bei den berechneten Skelettmassen der verschiedenen Modellen zu beiden Altersintervallen erzielt (Tab. 71). Bis zu einem Alter von 20,0 Jahren wird nachfolgend die Skelettmasse$_{netto}$ für beide Geschlechter mit dem für das Intervall von 0 bis 22,5 Jahre hergeleiteten Polynom 2. Grades und ab einem Alter von 21 Jahren mit den für das Intervall von 20,5 bis 83,5/84,5 Jahre hergeleiteten Polynomen des 1. bis 3. Grades berechnet. Im Anhang 35 sind die Werte für Männer und im Anhang 36 für Frauen im Alter von 0 bis 99 Jahre zusammengestellt. Die Berechnungen ab einem Alter von 84 (Männer) bzw. 85 (Frauen) Jahren stellen *Extrapolationen* dar. Diese sind problematisch, da sie eine Entwicklung aus vorangegangenen Lebensjahren fortschreiben, ohne dass Daten vorliegen. Gleichzeitig werden gerade für extrapolierten Altersbereiche die Unterschiede zwischen den Polynomen gravierend – z. B. kommt es nach den Polynomen des 3. (und 4.) Grades im Senium sogar zu einem Massezuwachs (Anhang 35 und 36, Kap. V.2 Abb. 25).

Tabelle 71: Zusammenstellung berechneter Skelettmassen im Alter von 20,5 Jahren, wie sich diese für beide Geschlechter anhand der hergeleiteten Regressions-Modelle für die Altersintervalle von 0 bis 22,5 und von 20,5 bis 83,5/84,5 Jahre ergeben. (vgl. Anhang 25 und 33 für die Männer bzw. Anhang 26 und 34 für die Frauen).

		berechnete, mittlere Skelettmasse (g)		
Geschlecht	Altersintervall	Polynom 1. Grades	Polynom 2. Grades	Polynom 3. Grades
Männer, 20,5 Jahre	0 bis 20,5 Jahre	/	4674,40	/
	20,5 bis 83,5 Jahre	4782,97	4676,05	4601,65
Frauen, 20,5 Jahre	0 bis 20,5 Jahre	/	3545,84	/
	20,5 bis 84,5 Jahre	3691,74	3625,78	3593,98

Mit Hilfe der Polynome wird eine *durchschnittliche* Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ beschrieben. Jedoch gibt es kein Individuum, welches dieser Kurve über seine gesamte ontogenetische Entwicklung hinweg folgt bzw. folgen kann. Dies betrifft nicht nur die Quantität der zu einem Alter vorhandenen Skelettmasse, sondern vor allem das Eintreten in und die Dauer einzelne(r) Entwicklungsabschnitte und damit deren relativen Zueinanders. Somit dürfen diese Kurven auch nicht mit *Normkurven* gleichgesetzt werden (COHN UND ELLIS 1975).

In der vorliegenden Arbeit wird der Ansatz weiter verfolgt, ein möglichst einfaches mathematisches Modell für die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ zu formulieren:

- Das mit wenigen Annahmen auskommt
- Die Daten ausreichend gut beschreibt und
- In keinem Gegensatz zu bisherigen Erkenntnissen steht.

Denn aus diesen Durchschnittskurven soll in einem nächsten Schritt die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM) hergeleitet werden. Diese entspricht der Entwicklungsgeschwindigkeit, wie sie in der Auxologie definiert ist. Denn in Abhängigkeit von der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ gelangt unabhängig vom Gewebeumbau (der Austauschrate) ^{14}C aus der Atmosphäre in das wachsende bzw. quasi-stabile Knochengewebe und -kollagen, also solange, wie eine Zunahme zu verzeichnen ist ($\Delta SM > 0$). Die sich daraus ergebenden veränderlichen ^{14}C-Konzentrationen sollen in Abhängigkeit von der Lebensspanne eines Individuums (begrenzt durch Geburts- und Sterbejahr; Kap. V 1, VI 1) zur Bestimmung der Liegezeit von Knochen verwendet werden.

Nachfolgend werden, getrennt für beide Geschlechter (Männer: Kap. VI 2.5.1; Frauen: Kap. VI 2.5.2), die mit den Polynomen berechneten Skelettmassen$_{netto}$ mit Angaben aus der Literatur verglichen, um bestehende Widersprüche zwischen den eigenen Modellen und bereits vorliegenden Erkenntnissen zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ aufzudecken.

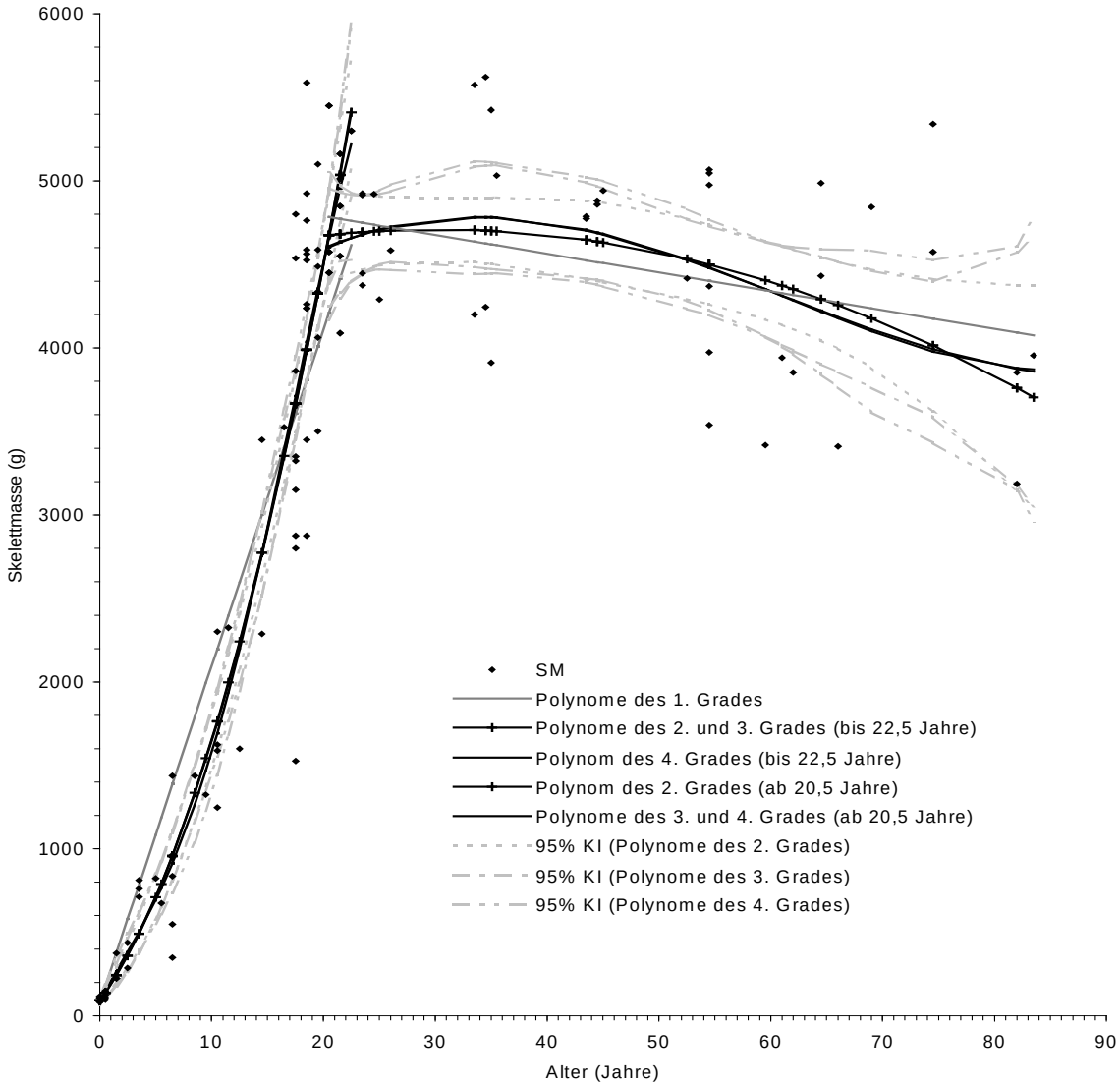


Abbildung 37: Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ (SM) für <u>Männer</u> im Alter von 0 bis 83,5 Jahre mit den dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervallen (KI) für die Polynome des 2. bis 4. Grades.

Berechnung der Skelettmasse bis zu einem Alter von 22,5 Jahre (Anhang 25):
Polynom 1. Grades = 76,81900 + 201,69780 x Alter
Polynom 2. Grades = 92,37562 + 91,50506 x Alter + 6,43944 x Alter^2
Polynom 3. Grades = 92,15003 + 94,07193 x Alter + 5,94830 x Alter^2 + 0,01860 x Alter^3
Polynom 4. Grades = 90,20765 + 124,61570 x Alter - 5,23447 x Alter^2 + 1,02716 x Alter^3 - 0,02622 x Alter^4

Berechnung der Skelettmasse ab einem Alter von 20,5 Jahre (Anhang 33):
Polynom 1. Grades = 5013,33334 – 11,23734 x Alter
Polynom 2. Grades = 4386,82018 + 21,36010 x Alter – 0,35373 x Alter^2
Polynom 3. Grades = 3310,33348 + 100,65104 x Alter – 2,06817 x Alter^2 + 0,01127 x Alter^3
Polynom 4. Grades = 3652,60174 + 67,13628 x Alter – 0,93158 x Alter^2 – 0,00468 x Alter^3+ 0,00007887 x Alter^4

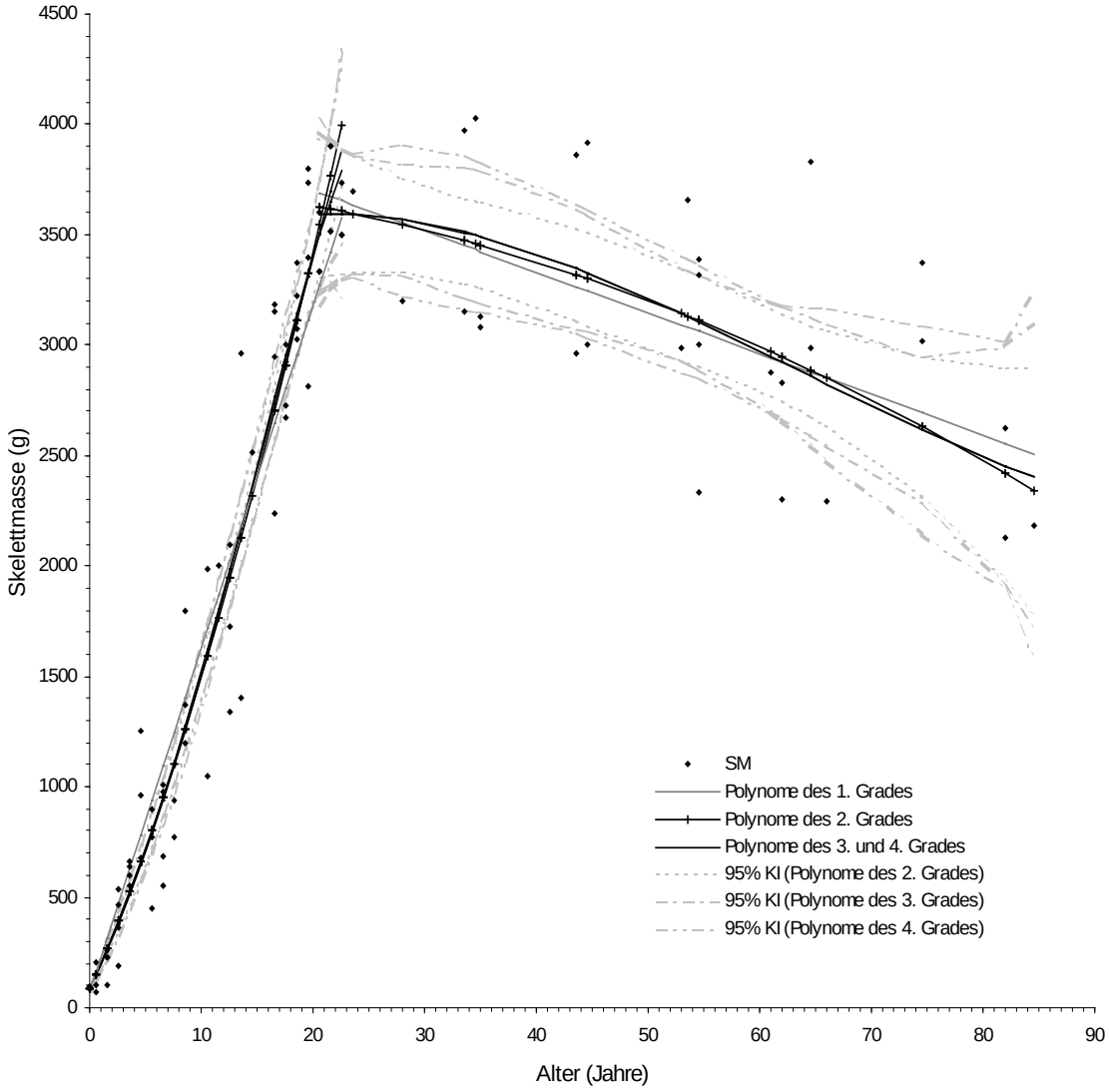


Abbildung 38: Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ (SM) für Frauen im Alter von 0 bis 84,5 Jahre mit den dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervallen (KI) für die Polynome des 2. bis 4. Grades

Berechnung der Skelettmasse bis zu einem Alter von 22,5 Jahre:
Polynom 1. Grades = 83,65774 + 155,32532 x Alter
Polynom 2. Grades = 87,79401 + 116,73614 x Alter + 2,53409 x Alter²
Polynom 3. Grades = 88,44097 + 105,71691 x Alter + 4,76951 x Alter² - 0,08763 x Alter³
Polynom 4. Grades = 88,00312 + 116,94054 x Alter + 0,59208 x Alter² + 0,30088 x Alter³ - 0,01036 x Alter^4

Berechnung der Skelettmasse ab einem Alter von 20,5 Jahre:
Polynom 1. Grades = 4071,03945 – 18,50233 x Alter
Polynom 2. Grades = 3751,66896 – 2,75787 x Alter – 0,16502 x Alter²
Polynom 3. Grades = 3288,96897 + 31,10570 x Alter – 0,88755 x Alter² + 0,00468 x Alter³
Polynom 4. Grades = 3314,66208 + 28,57971 x Alter – 0,80222 x Alter² + 0,00349 x Alter³ + 0,00000583 x Alter^4

VI 2.5.1 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Männer im Alter von 0 bis 83 (99) Jahre

Die nachfolgend diskutierten Werte sind in Tabelle 72 zusammenfassend dargestellt. Bei der Geburt liegt somit nach den eigenen Berechnungen mit ca. 2 % etwas weniger von der maximalen Skelettmasse vor, als diese in der Literatur mit 3 % häufig angegeben wird. Damit entspricht die hier berechnete Skelettmasse$_{netto}$ bei der Geburt aber gut den Werten von TROTTER UND HIXON (1974), die diese ebenfalls mit 2 % für Neugeborene der 37. bis 44. Schwangerschaftswoche angeben (Anhang 2). Die Übereinstimmung ergibt sich jedoch vorrangig aus der Dominanz von Datensätzen aus der Arbeitsgruppe um M. TROTTER in der Stichprobe für Individuen bis 22,5 Jahre.

Das erste Mal erreicht nach den eigenen Berechnungen die Skelettmasse der Jungen die der Mädchen im Alter von etwa 7 Jahren, also später, als es durch GARN UND WAGNER (1969) bzw. GARN (1970) für das 2. Lj. angenommen wird. Mit einem Unterschied von 1048 g (Jungen) zu 1029 g (Mädchen) wird ein Trend eingeleitet, der erst mit dem durchschnittlichen Beginn des puberalen Wachstumsschubes im Alter von 14 Jahren (Jungen) bzw. 12 Jahren (Mädchen) greifbarer wird und zu dem im Erwachsenenalter deutlichen Sexualdimorphismus führt (Kap. II 5.2.2).

Nach den eigenen Berechnungen ergibt sich im Durchschnitt eine maximale Skelettmasse$_{netto}$ von 4709 bis 4785 g, die deutlich über dem von GARN (1970) errechneten maximalen Wert von 3809 g im Alter von 17 Jahren bzw. 4275 g im 4. Ljz. liegen und auf den sich z. B. auch ROCHE (1978) in seiner Arbeit bezieht. Die eigenen Werte erreichen damit aber nur 94 % bis 96 % des Referenzwertes für Männer, der mit 5000 g angegeben wird (Kap. II 5.3). Letzterem entspricht wiederum der Wert von INGALLS (1931) mit 4957 g sehr gut.

Zu einem Alter von 10 Jahren liegen etwa 35 % der maximalen Skelettmasse$_{netto}$ vor, was zu den Ergebnissen von TROTTER UND HIXON (1974) passt (Kap. II 5.4.5), aber deutlich den von GARN angenommenen Anteil von 50 % unterschreitet. Zu den Angaben von GARN passen andererseits Angaben von COHN UND ELLIS (1975). Sie konnten in ihrer umfangreichen Studie (n = 848, 6 bis 89 Jahre, Maximum im Alter zwischen 30 und 39 Jahren) für Jungen im Alter zwischen dem 6. und 10. Lj. einen Anteil von ca. 44 % am maximalen Gesamtkörperkalzium nachweisen, wobei über 99 % des Ca im Knochengewebe (Apatit) vorliegen.

Durch die eigenen Berechnungen wird der im Vergleich zur maximalen Skelettmasse neugebildete Anteil im Alter von 14 bis 17 Jahren mit ca. 18 % im Vergleich zu den 26 % aus der Längsschnittstudie von BAILY ET AL. (2000) unterschätzt. Allerdings passt dieser Wert gut zu den von BAILY ET AL. zitierten Daten aus Querschnittsstudien.

Anhand der eigenen Berechnungen werden zum Ende des puberalen Wachstumsschubes im Alter von 16 Jahren zwischen 67 und 68 % der $Skelettmasse_{netto}$ erreicht. Nach Abschluss des Längenwachstums, bei GARN methodisch bedingt spätestens mit 17 Jahren (Verschluss der Epiphysenfuge am MC II abgeschlossen), werden 73 bis 75 % erreicht. Somit müssen mit 25 bis 27 % noch deutlich mehr als die von GARN UND WAGNER (1969) angenommenen 5 bis 10 % der maximalen Skelettmasse in nachfolgenden Lj. aufgebaut werden. Nach Angaben von GARN (1970) liegen im Alter von 17 Jahren bereits 3809 g oder 89 % der im 4. Ljz. erreichten maximalen Skelettmasse mit 4288 g vor. ROCHE (1978) überschätzt dagegen den Anteil ab einem Alter von 18 Jahren neuzubildender Skelettmasse mit ca. 45 % im Vergleich zu den eigenen Berechnungen.

Erst mit 20 Jahren liegen nach den eigenen Berechnungen zwischen 94 und 96 % der maximalen Skelettmasse vor. Allerdings wird diese nicht zwischen dem 25. und 30. Lj. erreicht (z. B. nach PARFITT 1991), sondern bereits im Alter von 21 Jahren (Polynom 1. Grades) oder aber erst im Alter von 30 bzw. 34 Jahren (Polynome 2. bzw. 3. Grades). Dieses späte Erreichen der maximalen Skelettmasse passt sowohl zu den Ergebnissen von INGALLS (1931, 35. Lj.) und findet sich beispielsweise auch bei COHN UND ELLIS (1975, Gesamtkörperkalzium, n = 848) bzw. RINGE ET AL. (1977, Mineralgehalt Knochen, n = 349) für das 4. Ljz..

Wenn man die Phase des geringen Masse-Zuwachses im Alter von 20 bis 30 bzw. 34 Jahre, wie sich diese mit den Polynomen des 2. und 3. Grades berechnen lässt, nicht als quasi-stabile Entwicklungsphase betrachten möchte, lässt sich dieser Entwicklungsabschnitt mit den vorliegenden Modellen nicht nachweisen. Denn eine weitere Unterteilung des Altersintervalls von 20,5 bis 83,5 Jahre in Teilintervalle im Sinne von „Spline“-Modellen ist wegen fehlender Daten nicht möglich, so dass die Entwicklung nur über das gesamte Intervall beschrieben werden kann (Kap. VI 2.4.3). Die Breite der 95 %-Konfidenzintervalle um die Regressions-Kurven, die sich auf Grund des schwachen Zusammenhanges von Alter und Skelettmasse im Erwachsenenalter und der geringen Datenbasis ergeben, lässt aber auch die Annahme eines erst nach dem 50. Lj. einsetzenden Masseabbaus zu, wie dieser durch INGALLS (1931,

Skelette, n = 100) bzw. durch RIGGS ET AL. (1981, scheinbare Knochendichte, n = 82) oder COHN ET AL. (1976b, Gesamtkörperkalzium, n = 39) angegeben wird.

Tabelle 72: Skelettmasse, relativer Anteil der Skelettmasse$_{netto}$ und (durchschnittliche) jährliche relative Skelettmasse-Änderung im Vergleich zur maximalen Skelettmasse für Männer im Alter von 0, 7, 10, 12, 14, 16, 17, 20, 21/30/34, 83, 90 und 99 Jahren, wie sich diese anhand der Polynome des 1. bis 3. Grades berechnen lassen (Anhang 35, auf Gramm gerundet).

		Polynom 1. Grades			Polynom 2. Grades			Polynom 3. Grades		
Alter (a)	Angaben nach GARN	SM	%SM$_{max}$	dSM	SM	%SM$_{max}$	dSM	SM	%SM$_{max}$	dSM
0	Geburt		1,93	4,67	92	1,95	3,27		1,92	2,88
7	SM$_{Jungen}$ > SM$_{Mädchen}$		21,94	5,58	1048	22,26	3,38		21,90	2,89
10	50 % SM$_{max}$		34,56	5,95	1651	35,06	3,25		34,50	2,73
12*	Wachstumsschub		44,34	6,18	2118	44,98	3,06		44,26	2,53
14*			55,18	6,40	2636	55,98	2,75		55,09	2,25
16*			67,09	6,58	3205	68,06	2,28		66,98	1,83
17	95 % SM$_{max}$		73,46	6,64	3509	74,52	1,96		73,33	1,57
20			94,16	5,84	4498	95,52	0,45		94,00	0,43
21/30/34**	SM$_{max}$	4777	100,00	0,00	4709	100,00	0,00	4785	100,00	0,00
83		4080	85,41	-0,23	3723	79,06	-0,40	3861	80,69	-0,39
90***								3833	80,10	-0,36
99		3901	81,66	-0,23	3035	64,45	-0,52	3941	82,36	-0,27

SM	Skelettmasse: bis zu einem Alter von 20 Jahren mit dem für das Altersintervall von 0 bis 22,5 Jahre hergeleiteten Polynom 2. Grades berechnet ab einem Alter von 21 Jahren mit den für das Altersintervall von 20,5 bis 83,5 hergeleiteten Polynomen des 1. bis 3. Grades berechnet
SM$_{max}$	maximale Skelettmasse
%SM$_{max}$	zum jeweiligen Alter erreichter relativer Anteil an der maximalen Skelettmasse
dSM	durchschnittliche, jährliche relative Änderung der Skelettmasse, gemittelt über die Anzahl der Jahre zwischen dem betrachteten Alter und dem Alter von SM$_{max}$
SM$_{Jungen}$>SM$_{Mädchen}$	Alter, indem die Skelettmasse der Jungen im Durchschnitt über der der Mädchen ist
50% SM$_{max}$	Alter, indem nach GARN 50 % der maximalen Skelettmasse erreicht werden (GARN UND WAGNER 1969, GARN 1970)
95% SM$_{max}$	Alter, indem nach GARN 95 % der maximalen Skelettmasse erreicht werden (GARN UND WAGNER 1969, GARN 1970)
12*, 14*, 16*	durchschnittlicher Beginn des (prä)puberalen Wachstumsschubes bei den Jungen mit 14 ± 2 Jahre
21/39/34**	maximale Skelettmasse: Polynom 1. Grades: mit 21 Jahren Polynom 2. Grades: mit 30 Jahren Polynom 3. Grades: mit 34 Jahren
90***	erstmalig wieder Zuwachs an Skelettmasse im Alter von 90 JahrenVergleich zum Vorjahr
(grau hinterlegt)	extrapoliert

Insgesamt liegen zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ erwachsener Männer nicht viele Arbeiten vor und diese verwenden fast ausschließlich nicht-invasive, indirekte Methoden wie die Knochendichte- bzw. der Mineralgehalt-Bestimmung (vgl. Kap. II 5.3.1). Ein Grund dafür mag sein, dass die Involution der Skelettmasse in den letzten Jahrzehnten fast ausschließlich in ihren pathologischen Formen interessierte (Osteopenie bzw. Osteoporose).

Es finden sich in der Literatur für Männer nach Erreichen der maximalen Skelettmasse ausschließlich Angaben zu einem sehr geringen Knochenmasseverlust. Dieser beträgt nach RIGGS ET AL. (1981) vom 20. bis 89. Lj. 14 %, nach KLEIN UND WOLFE (2001, Einzelknochen, n > 70) vom 20. bis 90. Lj. zwischen 13 und 15,6 %. Im Vergleich zu diesen Arbeiten fällt der hier berechnete Masseverlust mit ca. 15 bis 21 % zum 83. Lj. nur geringfügig höher aus. Durch die genannten Arbeiten wird ein Erreichen der maximalen Knochenmasse nach dem 20. Lj. aber nicht erkannt oder berücksichtigt und damit ergeben sich unterschiedlich lange Zeitintervalle für den Knochenmasse-Abbau sowie unterschiedlich hohe Anteile daran. Beim Vergleich der (durchschnittlichen) jährlichen relativen Änderung der Skelettmassen ergeben sich gleichwohl recht ähnliche Angaben: PARFITT (1991) 0,3 % pro Jahr vom Zeitpunkt der maximalen Knochenmasse zwischen dem 25. und 30. Lj., COHN ET AL. (1976b) 0,7 % pro Jahr ab dem 50. Lj., KLEIN UND WOLFE (2001) 0,2 bis 0,3 % pro Jahr nach dem 30. Lj., CHRISTIANSEN UND RÖDBRO (1975) 0,5 % pro Jahr ab dem 20. Lj. und RINGE ET AL. (1977) zwischen 0,25 bis 0,33 % pro Jahr ab dem 40. Lj., die sich alle gut mit den hier berechneten eigenen Raten von 0,4 % pro Jahr vergleichen lassen.

Ab dem 60. Lj. könnte nach den eigenen Berechnungen aufgrund der 95 %-Konfidenzintervalle (Abb. 37) sogar mit einem erneuten Zuwachs an Skelettmasse gerechnet werden. Diesen konnten BIRKENHÄGER-FRENKEL ET AL. (1993, Spongiosa Darmbeinkamm, n = 21) ab dem 50. Lj. auch nachweisen, nachdem die Skelettmasse vom 20. bis 50. Lj. abgenommen hatte. Und es finden sich auch ganz allgemein in der Literatur Hinweise zu einer Zunahme von Skelettmasse ab dem (hohen) Senium, oder z. B. auch bei MILNE (1985) anhand des Kompaktadurchmessers des MC II. Mit Hilfe des Polynoms 3. Grades lässt sich dieser Zuwachs „berechnen"– allerdings erst ab einem Alter von 90 Jahren und somit nach *Extrapolation* über den beobachteten Altersbereich hinaus.

Die eigenen Ergebnisse lassen sich demnach relativ gut mit den Angaben aus der Literatur vergleichen. Bis zu einem Alter von 20 Jahren kann dies nicht wirklich überraschen, da es sich bei den hier zusammengetragenen Arbeiten auch um die Studien handelt, über die Erkenntnisse zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ von Nicht-Erwachsenen Eingang in die Literatur gefunden haben. Gleichzeitig gewinnt man dabei den Eindruck, dass durch die Verwendung der von GARN berechneten Werte auf Grundlage des Metacarpus II (MC II) die Skelettmasse unterschätzt und damit die Entwicklungsgeschwindigkeit überschätzt wird.

Im Gegesatz dazu wurde die Entwicklung der Skelettmasse$_{netto}$ für Erwachsene hauptsächlich mittels nicht-invasiver Studien erarbeitet. Zu diesen Arbeiten stehen die eigenen

Ergebnisse in keinem Widerspruch. Allerdings kann aus diesem Vergleich dennoch keine Entscheidung für eines der drei Modelle (Polynome des 1. bis 3. Grades für Männer im Alter ab 21 Jahren) abgeleitet werden. Sowohl ein linearer (Polynom 1. Grades) als auch ein mit dem Alter zunehmender Skelettmasse-Abbau (Polynom 2. Grades) und wie bereits erwähnt sogar eine Zunahme der Skelettmasse im Senium (Polynom 3. Grades) lässt sich durch entspechende Zitate belegen. Dieses heterogene Bild entsteht durch Studien an kleinen Kollektiven und der Wahl indirekter Methoden, bei dem oft von einem kleinen Teil des Skelettes auf dieses als Ganzes geschlossen wird sowie dem unkritischen Vergleich von Ergebnissen aus Längs- und Querschnittstudien. Insgesamt gewinnt man jedoch den Eindruck, dass ein bereits im 3. Ljz. einsetzender linearer Skelettmasse-Verlust bei den Männern eher nicht die Realität beschreibt.

VI 2.5.2 Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ für Frauen im Alter von 0 bis 84 (99) Jahre

Die nachfolgend diskutierten Werte sind in Tabelle 73 zusammenfassend dargestellt. Bei der Geburt liegt nach den eigenen Modellen mit etwa 2,5 % etwas weniger von der maximalen Skelettmasse vor, als diese in der Literatur mit 3,0 % häufig angegeben wird. Damit entsprechen die hier berechneten Skelettmassen bei der Geburt eher den Werten von TROTTER UND HIXON (1974), die diese mit 2,7 und 2,8 % für Neugeborene der 37. bis 44. Schwangerschaftswoche angeben (Anhang 2). Die Übereinstimmung ergibt sich jedoch vorrangig aus der Dominanz von Datensätzen aus der Arbeitsgruppe um M. TROTTER in der Stichprobe für Individuen bis 22,5 Jahre.

Das erste Mal wird die durchschnittliche Skelettmasse der Mädchen im Alter 7 Jahren von der der Jungen übertroffen, also später als durch GARN UND WAGNER (1969) bzw. GARN (1970) mit dem 2. Lj. angenommen wird. Mit einem Unterschied von 1029 g (Mädchen) zu 1048 g (Jungen) wird ein Trend eingeleitet, der erst mit dem durchschnittlichen Beginn des puberalen Wachstumsschubes im Alter von 12 (Mädchen) bzw. 14 Jahren (Jungen) greifbarer wird und zu den im Erwachsenenalter deutlichen Sexualdimorphismus führt (Kap. II 5.2.2).

Nach den eigenen Berechnungen ergibt sich im Durchschnitt eine maximale Skelettmasse$_{netto}$ von 3594 bis 3682 g, die deutlich über dem von GARN (1970) errechneten maximalen Wert von 2799 g im Alter von 16 Jahren bzw. 3004 g im 5. Ljz. liegt. Damit

werden etwa 96 % bis 112 % des Referenzwertes für Frauen erreicht, der mit 66 % (3300 g) bis 75 % (3750 g) des Wertes für Männer von 5000 g angegeben wird (Kap. II 5.3).

Zu einem Alter von 10 Jahren liegen nach den eigenen Modellen etwa 41 bis 42 % der maximalen Skelettmasse$_{netto}$ vor, was etwas besser zu den Ergebnissen von TROTTER UND HIXON (1974) (Kap. II 5.4.5) als zu denen von GARN UND WAGNER (1969) mit 50 % passt. Zwischen dem 6. bis 10. Lj. konnten COHN UND ELLIS (1975, n = 922, 6 bis 99 Jahre, Maximum im Alter zwischen 30 und 39 Jahre) ebenfalls einen Anteil von ca. 50 % am maximalen Gesamtkörperkalzium in ihrer umfangreichen Studie nachweisen, wobei über 99 % des Ca im Knochengewebe (Apatit) vorliegen.

Durch die eigenen Berechnungen wird der im Vergleich zur maximalen Skelettmasse neugebildete Anteil im Alter von 12 bis 15 Jahren mit ca. 15 % im Vergleich zu den 26 % aus der Längsschnittstudie von BAILY ET AL. (2000) unterschätzt und liegt auch unter den von BAILY ET AL. aus Querschnittsstudien zitierten Angaben zwischen 17 und 19 %.

Anhand der eigenen Berechnungen werden zum Ende des puberalen Wachstumsschubes im Alter von 14 Jahren zwischen 60 und 62 % der Skelettmasse$_{netto}$ erreicht. Nach Abschluss des Längenwachstums, bei GARN methodisch bedingt spätestens mit 15 Jahren (Verschluss der Epiphysenfuge am MC II abgeschlossen), werden 65 bis 67 % erreicht. Somit müssen mit 33 bis 35 % noch deutlich mehr als die von GARN UND WAGNER (1969) angenommenen 5 bis 10 % der maximalen Skelettmasse in nachfolgenden Lj. aufgebaut werden. Nach Angaben von GARN (1970) liegen im Alter von 16 Jahren bereits 2799 g oder 93 % der im 5. Ljz. erreichten maximalen Skelettmasse mit 3004 g vor.

Nach den eigenen Berechnungen liegen mit 20 Jahren zwischen 93 bis 96 % der maximalen Skelettmasse vor, die bereits im Alter von 21 Jahren erreicht wird. Ein Maximum schon zu Beginn des 3. Ljz. wird z. B. durch BIRKENHÄGER-FRENKEL ET AL. (1993, Spongiosa des Darmbeinkammes, n = 23) und RIGGS ET AL. (1981, Mineraldichte des Knochens, n = 105) angenommen und damit etwas früher als z. B. durch PARFITT (1991, 25. bis 30. Lj.), KLEIN UND WOLFE (2001, n > 70, Einzelknochen, im 3. Ljz.) und CHRISTIANSEN UND RÖDBRO (1975, n = 73, Mineralgehalt des Knochens, Konstanz vom 20. bis 50. Lj.). Dagegen gehen von einem späteren Erreichen des Maximums aus: z. B. RINGE ET AL. (1977, Mineralgehalt Knochen, n = 424, Mitte des 4. Ljz.), COHN UND ELLIS (1975, Gesamtkörperkalzium, n = 922, 4. Ljz.) oder ALOIA ET AL. (2000, Gesamtkörperkalzium, n = 233, Beginn 4. Ljz.).

Tabelle 73: Skelettmasse, relativer Anteil der Skelettmasse$_{netto}$ und (durchschnittliche) jährliche relative Skelettmasse-Änderung im Vergleich zur maximalen Skelettmasse für Frauen im Alter von 0, 7, 10, 12, 14, 15, 20, 21, 84 und 99 Jahren, wie sich diese anhand der Polynome des 1. bis 3. Grades berechnen lassen (Anhang 36, auf Gramm gerundet).

Alter		Polynom 1. Grades			Polynom 2. Grades			Polynom 3. Grades		
(a)	Angaben nach GARN	SM	%SM$_{max}$	dSM	SM	%SM$_{max}$	dSM	SM	%SM$_{max}$	dSM
0	Geburt		2,39	4,65	88	2,43	4,65		2,45	4,65
7	SM$_{Jungen}$>SM$_{Mädchen}$:		27,95	3,43	1029	28,42	5,11		28,63	3,40
10*	50% SM$_{max}$:		40,98	2,81	1509	41,67	5,30		41,99	2,76
12*	Wachstumsschub		50,35	2,36	1854	51,20	5,42		51,59	2,31
14*			60,27	1,89	2219	61,28	5,53		61,74	1,82
15	95% SM$_{max}$		65,43	1,65	2409	66,53	5,58		67,03	1,57
20			93,32	0,32	3436	94,89	5,11		95,60	0,21
21**	SM$_{max}$	3682	100,00	0,00	3621	100,00	0,00	3594	100,00	0,00
84		2517	68,01	-0,51	2356	65,06	-0,55	2413	67,14	-0,52
99		2239	60,50	-0,51	1861	51,39	-0,62	2211	61,52	-0,49

SM	Skelettmasse: bis zu einem Alter von 20 Jahren mit dem für das Altersintervall von 0 bis 22,5 Jahre hergeleiteten Polynom 2. Grades berechnet ab einem Alter von 21 Jahren mit den für das Altersintervall von 20,5 bis 84,5 hergeleiteten Polynomen des 1. bis 3. Grades berechnet
SM$_{max}$	maximale Skelettmasse
%SM$_{max}$	zum jeweiligen Alter erreichter relativer Anteil an der maximalen Skelettmasse
dSM	durchschnittliche, jährliche relative Änderung der Skelettmasse, gemittelt über die Anzahl der Jahre zwischen dem betrachteten Alter und dem Alter von SM$_{max}$
SM$_{Jungen}$>SM$_{Mädchen}$	Alter, indem die Skelettmasse der Jungen im Durchschnitt über der der Mädchen ist
50% SM$_{max}$	Alter, indem nach GARN 50 % der maximalen Skelettmasse erreicht werden (GARN UND WAGNER 1969, GARN 1970)
95% SM$_{max}$	Alter, indem nach GARN 95 % der maximalen Skelettmasse erreicht werden (GARN UND WAGNER 1969, GARN 1970)
10*, 12*, 14*	durchschnittlicher Beginn des (prä)puberalen Wachstumsschubes bei den Mädchen mit 12 ± 2 Jahre
21**	maximale Skelettmasse nach allen 3 Polynomen des 1. bis 3. Grades
(grau hinterlegt)	extrapoliert

Insgesamt liegt zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ erwachsener Frauen eine kaum überschaubare Anzahl von Arbeiten auf der Grundlage von nicht-invasiven, indirekten Methoden wie z. B. der Knochendichte- bzw. der Mineralgehalt-Bestimmung vor (allgemein dazu hier Kap. II 5.3.1) und befassen sich fast ausschließlich mit den pathologischen Formen der Knocheninvolution (Osteopenie bzw. Osteoporose). Es ist an dieser Stelle nicht möglich, aber auch nicht notwendig, diese Arbeiten zu sichten, da hier die Entwicklung gesunder Individuen interessiert. Und auch dafür sollen nur einige Beispiele genügen, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Der Verlust an Knochenmasse ist für Frauen wesentlich deutlicher als für Männer. Dieser beträgt nach RIGGS ET AL. (1981) vom 20. bis 89. Lj. bis zu 35 % für Kompakta und bis zu 50 % für Spongiosa, nach KLEIN UND WOLFE (2001, Einzelknochen, n > 70) vom 20. bis 90. Lj. zwischen 34,8 und 42,6 %. In dieser Größenordnung liegt auch der hier berechnete

Masseverlust mit ca. 32 bis 35 % zum 84. Lj. und damit nur etwas höher als die 28 % Verlust des Gesamtkörperkalziums vom 30. bis zum 80. Lj., die von COHN ET AL. (1976b) angegeben werden.

Allerdings lassen sich bei Frauen wohl mindestens zwei Phasen unterscheiden: Ein geringer Verlust bis zur Menopause zwischen 45 und 55 Jahren und ein deutlicher Verlust danach (z. B. ALOIA ET AL. 2000), was gegen die Beschreibung des Masseverlustes durch ein Polynom 1. Grades sprechen würde (z. B. so bei KLEIN UND WOLFE 2001) und Modell-anpassungen durch Spline-Modelle (z. B. ALOIA ET AL. 2000, CHRISTIANSEN UND RÖDBRO 1975) oder z. B. bis hin zu Polynomen des 4. Grades (ALOIA ET AL. 2000, RINGE ET AL. 1977) nahelegt. Da eine Unterteilung des Altersintervalls von 20,5 bis 84,5 Jahre in Teil-intervalle im Sinne von „Spline"-Modellen wegen fehlender Daten – z. B. auch um den wichtigen Zeitpunkt der Menopause (45. bis 50. Lj.) – hier nicht möglich ist (Kap. VI 2.4.4), können diese alternativen Interpretationsmodelle durch eigene Berechnungen nicht nachvollzogen werden, sind aber biologische Realität.

Nach KLEIN UND WOLFE (2001) ergibt sich ein im 3. Ljz. einsetzender Masseverlust von durchschnittlich 1,1 bis 1,2 % pro Jahr, was der Annahme von PARFITT (1991) mit ca. 1,0 % pro Jahr entspricht, wobei nach PARFITT postmenopausal ein kurzzeitiger Anstieg auf das 3 bis 5fache zu beobachten sei. Nach COHN ET AL. (1976a, b) ergibt sich ein jährlicher Verlust für das Gesamtkörperkalzium von durchschnittlich 0,38 % zwischen dem 30. und 55. Lj. und 1,08 % zwischen dem 55. und 79. Lebensjahr. CHRISTIANSEN UND RÖDBRO (1975) konnten dagegen überhaupt erst nach dem 50. Lj. eine Reduktion des Gesamtkörperkalziums um jährlich 2,5 % bis zum 70. Lj. nachweisen. Darüberhinaus konnten HANSEN ET AL. (1991, n = 54, Knochenmineralgehalt) in einer der wenigen Längsschnittstudien über einen Zeitraum von 12 Jahren für postmenopausale Frauen einen durchschnittlichen Masseverlust von 20 % und somit einer jährlichen Reduktion um 1,7 % nachweisen, wobei Frauen mit einem „schnellen" Abbau von fast 27 % (2,25 % / Jahr) von denen mit einem „langsamen" Abbau von 17 % (1,4 % / Jahr) zu unterscheiden waren. Damit liegen diese Durchschnittswerte deutlich höher als die hier berechneten Abbauraten von jährlich 0,5 bis 0,6 %.

Die eigenen Ergebnisse lassen sich mit den Angaben aus der Literatur mäßig gut vergleichen. Bis zu einem Alter von 20 Jahren kann dies nicht wirklich überraschen, da es sich bei den hier zusammengetragenen Arbeiten auch um die Studien handelt, über die Erkenntnisse zur Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ Eingang in die Literatur gefunden haben. Gleichzeitig gewinnt man dabei den Eindruck, dass durch die Verwendung der von GARN

berechneten Werte auf Grundlage des Metacarpus II (MC II) die Skelettmasse unterschätzt und damit die Entwicklungsgeschwindigkeit überschätzt wird.

Im Gegesatz dazu finden sich in der Literatur zur Entwicklung der Skelettmasse$_{netto}$ im Erwachsenenalter hauptsächlich Studien unter Anwendung nicht-invasiver Methoden. Zu diesen Arbeiten stehen die eigenen Ergebnisse zwar in keinem Widerspruch, aber es kann aus diesem Vergleich kaum eine Entscheidung für eines der drei Regressions-Modelle abgeleitet werden, auch wenn man den Eindruck gewinnt, dass bei den Frauen ein im 3. Ljz. einsetzender linearer Masseverlust eher nicht die Realität beschreibt. Jedoch ist bei der Breite der für die eigenen Regressions-Kurven berechneten 95 %-Konfidenzintervalle (Abb. 38) dieser genauso möglich wie ein bis zur Menopause langsamer Masseabbau – bis hin zu einer Konstanz – und einem erst danach beschleunigten Abbau. Sogar ein Zuwachs an Knochenmasse im hohen Senium erscheint nach diesen möglich.

VI 2.6 Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ (ΔSM)

Die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ ΔSM (Kap. V 2.2), die in der Auxologie mit der Entwicklungsgeschwindigkeit beispielsweise für das Körperlängenwachstum eine Entsprechung hat, erfasst den *Anteil* an Skelettmasse, der jährlich aufgebaut wird und zwar in Bezug auf die zum Ende eines Lebensjahres vorhandene Masse. Die Berechnung dieses Parameters ergibt sich unmittelbar aus der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$, wie diese in den vorangegangenen Kapiteln VI 2.3 bis VI 2.5 diskutiert wurde. Dabei konnte für Männer und Frauen bis zu einem Alter von 20 Jahren zur Beschreibung dieser Vorgänge jeweils ein Polynom 2. Grades berechnet werden, welches die vorliegenden Daten ausreichend gut beschreibt (Kap. VI 2.3).

Für Männer und Frauen ab einem Alter von 21 Jahren stehen dagegen jeweils drei Modelle mit Polynomen des 1. bis 3. Grades zur Verfügung, die in mehr oder weniger geeigneter Weise die vorliegenden Daten beschreiben (Kap. VI 2.4 und VI 2.5). Um eine Entscheidung für jeweils eines der drei Modelle herbeizuführen, werden für die 3 Polynome nachfolgend je Lebensalter paarweise Differenzen sowohl für die Skelettmasse$_{netto}$ als auch für die relative

Skelettmasse-Änderung berechnet und mit dem verbundenen Wilcoxon-Test für Wertepaare explorativ überprüft.

Betrachtet man die Differenzen aus den je Lebensjahr berechneten Skelettmassen, so ergeben sich zwischen den Polynomen des 1. und 2. Grades und zwischen den Polynomen des 2. und 3. Grades keine Unterschiede, die durch die Regressions-Modelle erklärt werden könnten (p-Werte > 5 %), auch wenn im Median für beide Geschlechter das Polynom 2. Grades höhere Werte als das Polynom 1. Grades sowie das Polynom 3. Grades höhere Werte als das Polynom 2. Grades liefert (daher sind die medianen Differenzen < 0 für SM_{P1} - SM_{P2} bzw. SM_{P2} - SM_{P3}). Weiterhin sind sich die Polynome des 2. und 3. Grades ähnlicher als die Polynome des 1. und 2. Grades, was sich in der kleineren Spannweite (Minimum bis Maximum) und an kleineren %Variationskoeffizienten (%cv) für die Differenzen erkennen lässt.

Tabelle 74: Deskription und Test für die Differenzen, die sich aus der Berechnung der $Skelettmassen_{netto}$ bzw. jährlichen relativen Skelettmasse-Änderungen für Männer und Frauen ab einem Alter von 21 Jahren mit Hilfe der Polynome des 1. bis 3. Grades ergeben.

a) Männer im Alter von 20 bis 83 Jahren (64 Wertepaare; je Differenz von ΔSM siehe Anhang 35)

b) Frauen im Alter von 20 bis 84 Jahren (65 Wertepaare; je Differenz von ΔSM siehe Anhang 36).

a)

	MW	s	%cv	Min	Q1	Median	Q3	Max	p-Wert*
SM_{P1} - SM_{P2} [g]	4,899	130,435	2662,5	-124,48	-102,27	-34,790	77,969	357,772	0,452
SM_{P2} - SM_{P3} [g]	-10,105	57,440	568,4	-138,41	-64,556	-10,399	45,841	71,000	0,154
ΔSM_{P1} - ΔSM_{P2}	0,0013	0,0032	246,2	-0,0037	-0,0015	0,0009	0,0038	0,0075	0,008
ΔSM_{P2} - ΔSM_{P3}	-0,0009	0,0025	277,8	-0,0079	-0,0026	-0,0001	0,0012	0,0017	0,061

b)

	MW	s	%cv	Min	Q1	Median	Q3	Max	p-Wert*
SM_{P1} - SM_{P2} (g)	3,936	58,682	1490,9	-56,158	-45,986	-13,912	40,064	161,217	0,746
SM_{P2} - SM_{P3} (g)	-5,847	25,071	428,8	-57,523	-29,499	-5,641	18,420	29,707	0,054
ΔSM_{P1} - ΔSM_{P2}	0,0009	0,0023	255,6	-0,0023	-0,0011	0,0005	0,0026	0,0058	0,018
ΔSM_{P2} - ΔSM_{P3}	-0,0006	0,0016	266,7	-0,0054	-0,0015	-0,0001	0,0008	0,0011	0,064

* Verbundener Wilcoxon-Test für Wertepaare
SM Skelettmasse
ΔSM jährliche relative Änderung der Skelettmasse
P1, P2, P3 Polynom 1. Grades, Polynom 2. Grades, Polynom 3. Grades
%cv = 100 % x s/ MW

Betrachtet man die Differenzen für die jährliche relative Änderung der Skelettmasse (Tab. 74) zeigt sich ein Unterschied zwischen den Polynomen des 1. und 2. Grades (p-Werte < 0,02). Obwohl sich für die Differenzen der Skelettmassen kein Unterschied zwischen diesen Polynomen feststellen lässt, gewinnt bei der Berechnung der jährlichen relativen Änderung der Skelettmasse eine mit den Lebensjahren zunehmende Reduktion der Knochenmasse an Einfluss, auch wenn sich in den Regressions-Modellen selbst p-Werte > 17 % bei den Männern und p-Werte > 45 % bei den Frauen für das Alter und Alter² ergaben (Kap. VI 2.4.3 und VI 2.4.4). Demgegenüber lässt sich zwischen den Polynomen des 2. und 3. Grades kein Unterschied feststellen (Wilcoxon-Test p-Werte > 0,06).

Da sich anhand der in Kapitel VI 2.5 geführten Diskussion eine lineare Skelettmasse-Reduktion am ehesten nicht bestätigen lässt, werden somit auch für Männer und Frauen ab einem Alter von 20 Jahren die Polynome 2. Grades als die bestgeeigneten Regressions-Modelle angesehen. Sie beschreiben die Daten ausreichend gut und gleichzeitig mit den wenigsten Modellannahmen. Die mit diesen Modellen erzeugten Werte stehen in keinem Widerspruch zu der in Kapitel VI 2.5 geführten Diskussion.

Die mit den Polynomen 2. Grades berechneten Werte werden in dem Modell FoRCaDa jedoch nur solange berücksichtigt, solange für die jährliche relative Änderung der Skelettmasse positive Werte berechnet werden, also für wachsende bzw. quasi-stabile Gewebe. Für Männer ist die bis zum 30. Lj. der Fall. Für Frauen ist dies nur bis zum 21. Lj. zu beobachten – bei ihnen ist eine quasi-stabile Phase nicht festzustellen. Unter diesem Gesichtspunkt hat die Entscheidung gegen die Polynome des 3. und 4. Grades eine Bedeutung – der mit diesen Funktionen berechnete und möglicherweise tatsächlich vorliegende Massezuwachs im Senium bleibt im Modell FoRCaDa unberücksichtigt.

VI 3 Entwicklung, Überprüfung und Beurteilung des Modells FoRCaDa

VI 3.1 Einführung

Mit dem Modell FoRCaDa soll die im Knochenkollagen gemessene ^{14}C-Konzentration interpretiert und diese somit für nicht-identifizierte Individuen zur Bestimmung der Liegezeit herangezogen werden. Der ^{14}C-Wert ergibt sich als „Mischung“ aus dem jährlichen ^{14}C-Angebot in der Atmosphäre, auf das ein Individuum während seiner Lebensspanne trifft und welches über Auf- und Umbauprozesse in das Knochengewebe gelangt. In Zusammenfassung von Kapitel II können zwei Parameter benannt werden, die diese Prozesse ausreichend erfassen. Dabei handelt es sich um die jährliche relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ ΔSM und um die jährliche Austauschrate für Kohlenstoff im Knochengewebe $1/t_C$.

Die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ und die sich daraus ableitende jährliche relative Skelettmasse-Änderung ΔSM erfassen durchschnittliche Entwicklungsprozesse. Der Unterschied zwischen durchschnittlicher und individueller Entwicklung wurde wiederholt z. B. in der Auxologie thematisiert (TANNER ET AL 1981, EVELETH UND TANNER 1990) und zeigt deutlich, dass kein Individuum z. B. beim Körperlängenwachstum während der eigenen ontogenetischen Entwicklung beständig einer bestimmten Perzentilkurve, z. B. dem Durchschnitt, folgt. Gleichwohl stellen Normwerttabellen und -graphen ein übliches und wichtiges Instrument zur Beurteilung der körperlichen Entwicklung eines Kindes dar. Übertragen auf das hier gewählte Vorgehen bedeutet dies, dass nicht erwartet wird, dass die Masseentwicklung eines Skelettelementes durch die in Kapitel V 2 für das Gesamtskelett erarbeitete durchschnittliche Entwicklung vollständig erfasst wird. Am ehesten stimmen bei den langen Gliedmaßenknochen Femur und Tibia diese Entwicklungen überein und daher sollten sie das bevorzugte Probenmaterial darstellen (Kap. II 5.4.5, VI 2.2.3). Aber auch diese erscheinen wie jedes beliebige Skelettelement im Vergleich zu dem erarbeiteten Durchschnitt entweder entwicklungsbeschleunigt oder -gehemmt (vgl. Kap. II 5.4.3 bis 5.4.5, II 5.6). Werden hier also Duchschnittswerte zu den Berechnungen herangezogen, muss dies zu einer Unter- bzw. Überschätzung der gemessenen ^{14}C-Konzentration durch die berechneten Werte führen. Es wird jedoch erwartet, dass die Abweichungen einen interpretierbaren Umfang nicht überschreiten.

Unabhängig von der Masseentwicklung und diese überlagernd kommt es jährlich noch zu einem Kohlenstoffaustausch. Dieser ist abhängig von dem im Gewebe erfolgenden Umbau (Kap. II 5.5.2), dem durch Abbauprozesse überlagerten Zuwachs an Gewebe (Korrekturwert, Kap. II 5.5.1) und dem Anteil intraindividuellen bzw. vorrangig intraossealen Kohlenstoffaustausches im Vergleich zum extraindiviudellen Austausch. Für die jährliche Austauschrate $1/t_C$ konnte im Gegensatz zur jährlichen relativen Skelettmasse-Entwicklung bisher keine Einschränkung getroffen werden. In der Literatur finden sich Angaben zwischen 1 und 630 % (Kap. II 3.2). Daher werden mit Hilfe des in Kapitel IV 3.4.1 formulierten Algorithmus für das Modell FoRCaDa für insgesamt 74 Probenen von 66 Individuen jeweils 24 verschiedene ^{14}C-Werte für Austauschraten zwischen 1 und 66 % berechnet und nachfolgend im Vergleich zu den gemessenen ^{14}C-Werten in Kapitel VI 3.2 diskutiert. Im Anschluss an diese Diskussion wird das Modell FoRCaDa endgültig formuliert. Der Grad der Übereinstimmung von berechneten ^{14}C-Werten als unabhängigem Merkmal und gemessenen ^{14}C-Werten als abhängigem Merkmal wird mit Hilfe linearer Regressionsmodelle beurteilt. Für die Bestimmung der Liegezeit muss jedoch im Sinne einer Umkehrregression von dem gemessenen auf den berechneten ^{14}C-Wert geschlossen werden, wie dies in Kapitel V 3.5 in Form einer Kasuistik für insgesamt 22 Fälle dargestellt wird. Die auf Grundlage dieser Ergebnisse abschließende Diskussion zum Modell FoRCaDa findet sich in Kapitel VI 3.3.

VI 3.2 Der Vergleich von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten

Insgesamt liegen 74 gemessene ^{14}C-Werte von ingesamt 66 Individuen vor (Kap. IV 1.2, IV 3.4.2 und V 3.3). Für Austauschraten von ^{14}C im Knochengewebe $\geq$ 100 % , wie diese in der Literatur diskutiert werden, ergeben sich HWZ_{bio} von $\leq$ 0,69 Jahren im Gewebe. Somit sollten sich die gemessenen ^{14}C-Werte im Kollagen als eine Mischung aus dem ^{14}C in der Atmosphäre des Sterbejahres (größerer Anteil bzw. bis zu 100 %) und der vorangegangenen Kalenderjahre (kleinerer Anteil bzw. bis 0 %) darstellen (Kap. II 5.5.3). Dieser Zusammenhang sollte sich einfach zu erkennen geben. Er liegt hier eindeutig nicht vor. Es können also nur jährliche Austauschraten unter 100 % angenommen werden. Daher werden für jede vorliegende Probe in Abhängigkeit von:

- Geschlecht und
- Lebensdaten (Geburtsjahr und Lebensjahre) des Donors und
- Unter Verwendung der berechneten relativen Änderung der Skelettmasse ΔSM sowie
- Für insgesamt 24 Austauschraten von Kohlenstoff $1/t_C$ zwischen 1 und 66 % der ^{14}C-Wert berechnet und nachfolgend diskutiert (Kap. II 5.5.3).

In Tabelle 75 sind alle 74 Proben nach zunehmenden Lebensjahren der Donoren gelistet. Es sind die Zellen grau hervorgehoben, bei denen sich der berechnete ^{14}C-Wert in dem Intervall von $^{14}C_{gemessen}$ plus/minus der 4fachen Standardabweichung befindet ($^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s). In diesem Intervall wird mit 99,9%iger Wahrscheinlichkeit die wirkliche ^{14}C-Konzentration erwartet (Kap. IV 3.2). Die sich je Austauschrate zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert ergebende Differenz ist Anhang 61 zu entnehmen.

Tabelle 75: Beurteilung der Übereinstimmung von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten für 74 Proben (sortiert nach erreichten Lj, vgl. Kap. IV 1.2, IV 3.4.2 und V 3.3) unter Verwendung von Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1 und 66 % (Anhang 61).
Graue Markierung: $^{14}C_{berechnet}$ liegt im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4s$
▭: $^{14}C_{berechnet}$ liegt im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 2s$ (ID 94-96 und 39-42)

								Austauschrate $1/t_C$																							
ID	G	Gj	Sj	^{14}C	s	± 4s	Lj	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%	7,5%	8,0%	9,0%	10,0%	12,5%	15,0%	20,0%	25,0%	40,0%	50,0%	66,0%
99	f	1975	1985	126,7	1,5	6,0	10	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
97	m	1972	1990	118,6	1,1	4,4	18						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
98	m	1973	1991	120,7	0,8	3,2	19	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
79	m	1948	1967	131,6	0,9	3,6	20	■																							
87	m	1960	1980	143,4	1,0	4,0	20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■							
94	m	1971	1990	120,7	0,9	3,6	20			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
95	m	1971	1990	123,1	1,0	4,0	20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
96	m	1971	1990	125,0	0,9	3,6	20	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■												
100	f	1947	1967	129,3	0,4	1,7	21	■	■																						
93	m	1969	1989	124,0	0,8	3,2	21		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
92	m	1967	1990	124,2	0,9	3,6	24						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
65	m	1937	1961	105,5	0,8	3,2	25								■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
78	m	1948	1972	134,3	1,3	5,2	25	■	■	■																					
80	m	1951	1976	140,0	2,4	9,6	25	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
90	f	1966	1990	125,5	1,0	4,0	25							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
91	m	1966	1990	122,7	1,0	4,0	25									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
88	m	1963	1990	131,5	0,9	3,6	27					■	■	■	■	■	■	■	■	■											
89	m	1963	1992	128,4	0,8	3,2	30						■	■	■	■	■	■	■	■											
27	f	1937	1967	117,3	0,6	2,4	31							■	■																
49	m	1965	1995	141,1	1,2	4,8	31																								
63	m	1935	1966	114,2	0,7	2,8	32						■	■	■																
85	m	1958	1991	143,6	1,2	4,8	34	■	■	■																					
86	m	1958	1991	142,4	0,8	3,2	34	■	■	■																					
76	m	1947	1981	142,8	1,2	4,8	35						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
84	m	1956	1991	136,0	0,9	3,6	36				■	■	■	■	■	■															

ID: Identifikationsnummer; G: Geschlecht; Gj: Geburtsjahr; Sj: Sterbejahr
$^{14}C_{gemessen}$: gemessener ^{14}C-Wert im Kollagen; s: Standardabweichung; Lj: Lebensjahr
(Fortsetzung)

Tabelle 75: (Fortsetzung).

Graue Markierung: $^{14}C_{berechnet}$ liegt im Intervall von $^{14}C_{gemessen}$ ± 4 s

▭: $^{14}C_{berechnet}$ liegt im Intervall von $^{14}C_{gemessen}$ ± 2 s (ID 94-96 und 39-42)

								Austauschrate																								
ID	G	Gj	Sj	^{14}C	s	± 4s	Lj	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%	7,5%	8,0%	9,0%	10,0%	12,5%	15,0%	20,0%	25,0%	40,0%	50,0%	66,0%
82	m	1954	1990	138,1	0,8	3,2	37																								
83	m	1955	1991	151,0	1,0	4,0	37																								
50	f	1932	1969	125,7	0,7	2,8	38																								
81	m	1952	1992	143,8	0,9	3,6	41																								
72	m	1939	1981	120,8	0,8	3,2	42																								
77	m	1947	1988	147,9	1,1	4,4	42																								
62	m	1934	1977	136,5	1,4	5,6	43																								
74	f	1944	1989	125,1	1,0	4,0	46																								
59	m	1928	1974	112,7	1,2	4,8	47																								
67	m	1938	1985	118,9	1,2	4,8	47																								
73	m	1940	1986	114,6	0,8	3,2	47																								
75	f	1945	1991	122,3	0,7	2,8	47																								
60	f	1930	1978	110,9	1,2	4,8	49																								
66	m	1937	1985	111,4	1,2	4,8	49																								
68	m	1938	1987	113,6	0,7	2,8	50																								
64	m	1935	1985	126,3	0,9	3,6	51																								
71	m	1939	1989	115,2	1,1	4,4	51																								
69	m	1938	1991	109,0	0,8	3,2	54																								
58	m	1924	1979	111,2	1,2	4,8	55																								
70	m	1938	1992	125,9	0,9	3,6	55																								
37	m	1912	1968	107,5	0,7	2,8	57																								
38	m	1912	1968	119,1	1,0	4,0	57																								
39	m	1912	1968	111,7	1,3	5,2	57																								
40	m	1912	1968	114,5	0,9	3,6	57																								
41	f	1911	1968	116,6	0,8	3,2	58																								
42	f	1911	1968	114,1	0,8	3,2	58																								
1	f	1869	1928	99,2	1,3	5,2	60																								
61	m	1932	1991	113,0	0,7	2,8	60																								
28	m	1906	1967	111,8	0,5	2,0	62																								
29	m	1902	1967	106,6	0,4	1,6	66																								
30	f	1902	1967	115,3	0,6	2,4	66																								
31	f	1902	1967	118,4	0,6	2,4	66																								
32	m	1898	1967	110,7	0,4	1,6	70																								
33	f	1897	1967	114,2	0,6	2,4	71																								
51	m	1899	1971	110,4	2,7	10,8	73																								
54	m	1902	1974	116,3	0,7	2,8	73																								
56	m	1912	1985	115,3	0,7	2,8	74																								
34	f	1892	1967	123,6	0,4	1,6	76																								
57	m	1913	1989	113,5	0,9	3,6	77																								
55	m	1903	1982	113,7	1,2	4,8	79																								
35	m	1888	1967	108,0	0,6	2,4	80																								
52	f	1902	1983	132,8	1,6	6,4	81																								
53	f	1910	1991	122,9	0,9	3,6	82																								
43	f	1883	1968	107,6	1,1	4,4	86																								
44	f	1883	1968	125,7	0,8	3,2	86																								
45	f	1883	1968	102,1	0,8	3,2	86																								
46	f	1883	1968	114,9	0,8	3,2	86																								
47	m	1880	1968	110,3	0,5	2,0	89																								
48	m	1880	1968	118,2	0,6	2,4	89																								

ID: Identifikationsnummer; G: Geschlecht; Gj: Geburtsjahr; Sj: Sterbejahr

$^{14}C_{gemessen}$: gemessener ^{14}C-Wert im Kollagen; s: Standardabweichung; Lj: Lebensjahr

Ein erster Schritt besteht darin, die Anzahl der vorgewählten 24 Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1 und 66 % einzuschränken. Die Breite des Übereinstimmungsbereiches wird zwar von der vorliegenden Standardabweichung s für den gemessenen ^{14}C-Wert (Min: 0,4 pMC, Max: 2,7 pMC; vgl. Tab. 38 in Kap. V 3.3.2, Anhang 61) und von der Zuordnung eines Individuums zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre durch seine Lebensdaten beeinflusst, dennoch ergeben sich aus der Zusammenstellung in Tabelle 75 einige Hinweise. So wird mit zunehmenden Lebensjahren der Bereich zur Auswahl stehender Austauschraten schmaler, für den sich eine ausreichende Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten ergibt. Es können einige Untergruppen benannt werden, für die in unterschiedlicher Weise eine Übereinstimmung zwischen beiden Werten erzielt wird und die nachfolgend besprochen werden.

VI 3.2.1 Individuen ohne Übereinstimmung zwischen den ^{14}C-Werten: ID 49, 83, 77

Nur für 3 Individuen der gesamten Stichprobe (ID 49, 83, 77; 4 % der 74 Proben, 5 % der 66 Individuen) konnte keine ausreichende Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessem ^{14}C-Wert erreicht werden. Dass dies nur drei Proben von Männern betrifft, mag an der Zusammensetzung des Materials liegen, in dem nur 21 Proben von 18 Frauen vorliegen. Auffälliger ist jedoch, dass es sich dabei um relativ jung verstorbene Männer handelt (im 31. bis 42. Lj. zwischen 1988 und 1995), für die relativ hohe ^{14}C-Werte zwischen 141,1 ± 1,2 und 151,0 ± 1,0 pMC gemessen wurden. Die beste Übereinstimmung lässt sich für diese drei Individuen für niedrige Austauschraten (bis zu 6 %) beobachten, jedoch liegen diese außerhalb des Intervalls, welches durch $^{14}C_{gemessen}$ ± 4 s definiert wird.

Der Messwert von ID 49 wurde bereits kritisch beurteilt (Kap. VI 1.3.1, Kap. V 1.3.1). Es wurden Reservoireffekte (Gewebealter, AMS-Technik, Aufbereitungsmethode) und ein erhöhter Stoffwechsel für diesen und vor allem in Kombination zum ^{14}C-Wert der Fettfraktion auffälligen Wert diskutiert. Ein erhöhter Stoffwechsel spricht für eine Abweichung in der Ontognese vom hier hinterlegten Durchschnitt für ΔSM. Eine Abweichung bei der Skelettmasse-Entwicklung könnte auch bei ID 77 vorliegen, bei dem ein Fragment des kranialen Skelettes beprobt wurde. Für das Cranium wurde eine vom gesamten bzw. postkranialen Skelett abweichende Masseentwicklung bereits diskutiert (Kap. II 5.4.5). Für ID 83

liegen dagegen keine Informationen vor, auf die die fehlende Übereinstimmung zwischen beiden ^{14}C-Werten zurückgeführt werden könnte.

Deutliche Abweichungen vom Durchschnitt während der Ontogenese und besonders während der Jahre mit deutlich erhöhtem ^{14}C in der Atmosphäre könnten in allen drei Fällen die Ursache für die fehlende Übereinstimmung darstellen. Bemerkenswert ist vielmehr, dass dies nur bei drei Individuen beobachtet wird. Dies kann als indirekter Hinweis für die Eignung des Modells FoRCaDa zur Modellierung des ^{14}C-Stoffwechsels im Knochenkollagen verstanden werden.

VI 3.2.2 ^{14}C-Konzentrationen unter 100 pMC – kein sicherer Hinweis auf ein Sterbejahr vor 1950: ID 1

Bei ID 1 handelt es sich um die Probe einer im Jahr 1928 verstorbenen 60jährigen Frau, die bei einer Grabauflassung auf einem Friedhof entnommen wurde. Während ihres Lebens von 1869 bis 1928 traf diese Frau in der Atmosphäre auf annähernd konstante ^{14}C-Konzentrationen zwischen mindestens 98,2 pMC im Jahr 1926 bzw. maximal 99,9 pMC in den Jahren 1882 und 1901 (Anhang 1). Damit lassen sich ganz unabhängig von der Skelettmasse-Entwicklung und von den vorgewählten Austauschraten gute Übereinstimmungen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten erzielen. Diese Beobachtung unterstreicht erneut den Unterschied zwischen der klassischen Radiocarbon-Datierung mit konstanten ^{14}C-Werten in allen Reservoiren und dem Modell FoRCaDa, das in seinen Möglichkeiten von den veränderlichen ^{14}C-Konzentrationen in der Atmosphäre abhängt (Kap. II; Anhang 61).

Jedoch könnte dieser Skelettfund in keiner Weise eindeutig als prämodern eingeordnet werden, wenn der Befund dies nicht zwingend erfordern würde. Denn unter Anwendung des Modells FoRCaDa lassen sich in Abhängigkeit von Geburtsjahr und den erreichten Lebensjahren ^{14}C-Werte unter 100 pMC bis in die 1960er Jahre hinein berechnen (ID 3, 4, 5, 12: Kap. V 3.5.1). Beispielsweise wurde für die Probe ID 12 durch das ^{14}C-Labor ein Sterbezeitintervall von 1954 bis 1956 mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 0,7 % angegeben. Mit dem Modell FoRCaDa ergibt sich dagegen mit einer Übereinstimmungsgenauigkeit von 3,9 s im Vergleich zum Messwert für einen 60jährig verstorbenen Mann das Sterbejahr 1964.

Aber auch bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen ergeben sich nach 1950 ^{14}C-Werte < 100 pMC. Und so muss an dieser Stelle denn auch DH UBELAKER (2001) widersprochen werden, der 1992 aufgefundene Skelettreste eines zwischen dem 16. und 21 Lj. verstorbenen Mannes anhand des ^{14}C-Wertes von 98,4 ± 0,4 pMC als prämodern einordnete. Diese Zuordnung stützt er mit dem auffälligen pathologischen Befund (Tuberkulose) und einem am δ^{13}C-Wert festgestellten auffälligen Nahrungsverhalten mit einem hohen Anteil von C4-Pflanzen (z. B. Mais) und/ oder Meeresfrüchten (VGL. VAN DER MERWE 1982). Ist diese Argumentation in sich durchaus schlüssig, sind es dennoch nur Hinweise die mit Hilfe des Modells FoRCaDa neu zu bewerten sind: Danach wird für Männer zwischen dem 16. und 32. Lj. ein ^{14}C-Wert von ≤ 98,4 pMC bis zum Jahr 1959 berechnet. Unter Beachtung eines Übereinstimmungsbereiches von ± 4 s erweitert sich das Sterbeintervall im vorliegenden Fall bis zum Jahr 1963 (Anhang 60).

Somit bieten sich die Jahre 1963 bis 1965 als klare Unterscheidungsgrenze zwischen prämodernen und modernen Funden erwachsener Individuen an. In diesen drei Jahren lagen in der Atmosphäre deutlich über 170 pMC ^{14}C vor (Anhang 1a). Selbst wenn ein Mensch jährlich nur 1 % dieses Kohlenstoffs aufnimmt, wird damit der Übereinstimmungsbereich von + 4 s deutlich überschritten, wobei in der vorliegenden Stichprobe die beobachteten Standaradabweichungen im Durchschnitt bei 0,94 pMC und insgesamt zwischen 0,40 und 2,70 pMC lagen (Anhang 37).

Bei Kindern sollte sich dagegen der ^{14}C-Anstieg in der Atmosphäre ab 1955 durch die Prozesse der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ ausreichend deutlich zu erkennen geben. Aus den Beobachtungen zu Knochenfett (ID 49, 59, 66, 15 und 16, Kap. V 3.5.3, V 3.5.4) wird erwartet, dass für diese Gewebefraktion, und dann auch für Erwachsene, eine deutlichere Abgrenzung mit einem kleineren Überlappungsbereich nach 1950 möglich wird.

VI 3.2.3 Kind: ID 99

Bei ID 99 handelt es sich um die Probe von einem kurz vor Erreichen des 11. Geburtstages im Jahr 1985 ermordeten Mädchens. Bis zu diesem Alter überlagern Prozesse der Skelettmasse-Entwicklung die Prozesse des Knochenumbaus. Der Massezuwachs liegt, jährlich abnehmend, zwischen 57,6 % im 1. Lj. und 10,9 % im 10. Lj. (Anhang 36, Kap. V 2). Folgt man den Annahmen von FROST (1985, Kap. II 5.5.2), nachdem etwa 90 % der Stoffwechselaktivität bei Kindern auf Wachstumsprozesse zurückzuführen sind, so kann für die vorliegende Probe die erzielte Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten für alle Austauschraten zwischen 1 und 66 % nicht überraschen.

In Kapitel II 5.5.2 wurden anhand von Literaturdaten deutlich höhere Umbildungsprozesse im Kindes- und Jugendalter als im Erwachsenenalter diskutiert. In Anlehnung daran könnte man auch mit höheren Austauschraten vor allem während der frühkindlichen Entwicklung rechnen, da der intraindividuelle oder gar intraosseale Stoffaustausch erst mit zunehmendem Alter an Bedeutung gewinnen kann. So ergibt sich z. B. für ID 99 ebenfalls ein ^{14}C-Wert von 127,7 pMC (entspricht dem ^{14}C-Wert, der sich bei einer über alle 10 Lj. konstanten Austauschrate von 4 % ergibt), wenn eine Austauschrate von 80 % im 1. Lj., von 40 % im 2. Lj., von 20 % im 3. Lj., von 10 % im 4. Lj. und dann konstant von 5 % bis zum 10./11. Lj. angenommen wird.

Da es sich bei ID 99 um die einzige Probe eines Kindes handelt, lässt sich anhand der vorliegenden Materialsammlung nicht unterscheiden, ob es während der (früh)kindlichen Entwicklung zu einem (exponentiellen) Abfall der Austauschrate von Werten von bis zu 100 % im 1. Lj. auf die im Erwachsenenalter vorliegenden Werte kommt (vgl. Kap. VI 3.2.7) oder lebenslang konstante Austauchraten vorliegen. Damit zeigt sich ein Problem, wie es bereits in der Diskussion zum Apatit-Stoffwechsel unter Verwendung von ^{90}Sr aufgekommen ist und auch dort zur Formulierung alternativer Modelle geführt hat (Kap. II 3.3 Tab. 2). Auch wenn diese Unterscheidung für die vorliegende Stichprobe mit Individuen ab dem 18. Lj. keine Bedeutung mehr zu haben scheint, wird damit die Anwendung der Methode eingeschränkt: Zur Liegezeitbestimmung von Kindern zwischen dem 2. und 9. Lj. kann das Modell FoRCaDa nur unter größerem Vorbehalt angewendet werden.

VI 3.2.4 Individuen zwischen dem 18. und 25. Lebensjahr

Es liegen 13 Proben von 11 Männern und 2 Proben (ID 100, 90) von 2 Frauen für dieses Altersintervall vor. Vier Proben (ID 92, 78, 90, 91; Anhang 13) wurden dem kranialen Skelett entnommen.

Drei Proben (ID 79, 100, 78) zeigen nur bei geringen Austauschraten bis maximal 2 % eine ausreichende Übereinstimmung der berechneten ^{14}C-Werte mit dem gemessenen ^{14}C-Wert. Bei 10 von den 15 Proben zeigt sich eine Übereinstimmung zwischen beiden ^{14}C-Werten für Austauschraten zwischen 5,0 und 12,5 %. Und für 5 Individuen lassen sich auch Übereinstimmungen für Austauschraten ab 15,0 % feststellen (Tab. 75, Anhang 61).

Bis zum 18. Lj. dominiert bei Frauen und Männern die Zunahme an Skelettmasse über Prozesse des Umbaus (Kap. V 2). Erst mit zunehmendem Alter – und da bei den Frauen eher als bei den Männern – gewinnen Umbildungsprozesse an Bedeutung. Daher können unter Beachtung der genannten Ausnahmen ID 79, 100 und 78 die breiten Übereinstimmungsbereiche bei den Austauschraten nicht überraschen. Selbst die unterschiedliche Herkunft der Proben vom kranialen bzw. postkranialen Skelett mit den dort vorliegenden unterschiedlichen Entwicklungstempi (Kap. II 5.4.5) lässt keinen eindeutigen Zusammenhang mit der beobachteten Übereinstimmung beider ^{14}C-Werte erkennen. Auffällig ist vielmehr, dass Übereinstimmungen zwischen den berechneten mit dem gemessenen ^{14}C-Wert bei Austauschraten ab 40 % selten vorliegen (ID 97, 94, 80).

Für ID 80, der Probe eines 25jährig im Jahr 1976 ermordeten Mannes, ergibt sich eine Übereinstimmung beider Werte für alle Austauschraten von 1 bis 66 %, wobei dies durch die hohe Standardabweichung (s = 2,4 pMC) mitbedingt ist. Außer ID 80 zeigt nur noch ID 97 eine Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenem ^{14}C-Wert bei Austauschraten über 40 % bzw. mit ID 94 (vgl. Kap. VI 3.2.6; Gewebealter) über 15 %. (Bei einer Rate von 15 % stammen 87,5 % des gemessenen ^{14}C aus den letzten 13,9 Lj. und bei 40 % sogar nur aus den letzten 5,2 Jahren, vgl. Kap. II 5.5.3 Tab. 11.)

Als Hinweis gegen hohe Austauschraten wird angesehen, dass sich selbst für die stoffwechselaktiven bis zu 25jährigen Individuen eine rechnerische Übereinstimmung zwischen den beiden ^{14}C-Werten nur bei einem Drittel für Raten über 12,5 % ergibt.

VI 3.2.5 Individuen nach dem 25. Lebensjahr

Mit Ausnahme der drei bereits besprochenen Individuen ID 49, 83 und 77 (Kap. 3.2.1) lassen sich für alle anderen 54 Proben von 48 Individuen mit einem Sterbejahr nach 1950 und nach dem 25. Lj. die gemessenen ^{14}C-Werte mit Austauschraten bis zu 7 % ausreichend genau berechnen. Für jeweils 10 bis 22 von den 54 Proben lässt sich dabei für jede beliebige Rate bis zu 7 % eine ausreichende Übereinstimmung feststellen (Tab. 75, Anhang 37, Anhang 61). Für jeweils 3 bis 8 von den 54 Proben ergibt sich darüberhinaus eine ausreichende Übereinstimmung auch für jeweils eine Austauschrate über 7 % und betrifft insgesamt 12 Proben.

Für 4 der 12 Proben (ID 76, 70, 52, 53) zeigt sich eine Übereinstimmung für Austauschraten mindestens zwischen 4,5 und 10,0 %. Bei ID 52 und 53 konnten pathologische Veränderungen sicher nachgewiesen werden. Beide Frauen litten an Osteoporose, was mit einem gesteigerten Stoffwechsel assoziiert sein kann (Anhang 13). Dagegen zeigt ID 50 mit einer gesicherten Erkrankung der Herzkranzgefäße keine Übereinstimmung zwischen beiden ^{14}C-Werten für Austauschraten über 7 %. Das kann dahingehend interpretiert werden, dass diese Erkrankung keinen deutlichen Einfluss auf das Skelettsystem genommen hat.

Für sechs weitere von den 12 Proben (ID 67, 75, 64, 71, 61, 57) zeigt sich eine Übereinstimmung innerhalb von zwei deutlich voneinander getrennten Bereichen. Diese ergibt sich für ID 67, 71, 61 und 57 in dem höheren der beiden Bereiche für Austauschraten ab 25 %. Damit stammen 99,6 % des gemessenen ^{14}C längstens aus den letzten 22,2 Lj. des jeweiligen Donors (Kap. II 5.5.3 Tab. 12). Weniger deutlich stellt sich dieser Zusammenhang auch für ID 75 und 64 dar, für die sich Übereinstimmungen für Austauschraten schon ab 10 % ergeben. Damit stammen für diese beiden mindestens 47jährigen Individuen 87,5 % des gemessenen ^{14}C längstens aus den letzten 21 Lj.. In Tabelle 76 sind die benannten Zusammenhänge dargestellt.

Alle 6 Individuen sind deutlich nach dem ^{14}C-Gipfel in der Atmosphäre im Jahr 1964 verstorben (Anhang 1a), d. h., mindestens während der letzten 20 Lj. dieser Individuen lagen kontinuierlich abnehmende ^{14}C-Konzentrationen in der Atmosphäre vor. Die Berechnung eines ^{14}C-Wertes allein auf Grundlage der ^{14}C-Konzentrationen, die während der Lebensjahre in der Atmosphäre vorlagen, aus denen 99,6 bzw. 87,5 % des gemessenen ^{14}C stammen, wird der gemessene ^{14}C-Wert bei allen Individuen überschätzt. Für ID 75, 61 und

57 ist der berechnete Wert größer als $^{14}C_{gemessen}$ + 4 s. Der gemessene ^{14}C-Wert wird somit nur ermöglicht, wenn auf Reservoire mit deutlich niedrigeren ^{14}C-Werten zurückgegriffen werden kann. Diese müssen aus Jahren vor 1964 stammen und sich im Knochenkollagen erhalten haben.

Die Übereinstimmungen für die hohen Austauschraten ab 40 % und evtl. auch schon ab 10 % sind am ehesten als „rechnerische Artefakte“ zu werten. Anderweitig müssten sich in der vorliegenden Stichprobe für deutlich mehr als nur für 6 Individuen Übereinstimmungen zwischen dem berechneten und dem gemessenen ^{14}C-Wert für diese hohen Austauschraten ergeben.

Für zwei weitere der 12 Proben (ID 62, 74) ergeben sich ebenfalls zwei Bereiche, in denen eine ausreichende Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten vorliegt. Diese sind jedoch nicht so deutlich voneinander getrennt wie bei den vorgenannten 6 Fällen. Für ID 62 ist die Erblindung auf einem Auge und ein vollständiger prämortaler Zahnverlust bekannt. Ob dies auf systemische Ursachen zurückzuführen ist, die zu der hier erkennbaren Erhöhung des Stoffwechsels geführt haben, konnte nicht geklärt werden. Für ID 74 ist keine Pathologie bekannt. Diese beiden Individuen nehmen eine Mittelstellung zwischen den beiden vorgenannten Gruppen ein, mit einem tendenziell höheren Stoffwechsel und zwei Übereinstimmungsbereichen.

Insgesamt liegen somit 4 Individuen (ID 76, 62, 74, 70; 7 % der Proben und 8 % der Individuen) mit höheren Austauschraten vor, für die sich keine ausreichende Erklärung ergibt. In Zusammenfassung dieser Beobachtungen können jedoch Austauschraten bis zu 7 % als ausreichend zur Berechnung der gemessenen ^{14}C-Werte angesehen werden. Ausreichende Übereinstimmungen zwischen berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten für Austauschraten ab 15 % werden bei 8 Individuen mit einem Sterbealter nach dem 25. Lj. (15 % der Proben, 16 % der Individuen) beobachtet und können für Austauschraten ab 40 % am ehesten als „rechnerische Artefakte“ angesehen werden.

Tabelle 76: Berechnung des ^{14}C-Wertes über ein Zeitintervall, aus dem bei vorgegebener kleinster Austauschrate im oberen Übereinstimmungsbereich 87,5 % des gemessenen ^{14}C stammen.

Kalenderjahr	$^{14}C_{Atmosphäre}$	ID	67	75	64	71	61	57
		gestorben im Jahr	1985	1991	1985	1989	1991	1989
		Lebensjahr	47	47	51	51	60	77
		$^{14}C_{gemessen}$ (pMC)	118,9	122,3	126,3	115,2	113,0	113,5
		s (pMC)	1,2	0,7	0,9	1,1	0,7	0,9
		kleinste Austauschrate	40%	10%	15%	25%	40%	50%
		87,5% ^{14}C-Austausch nach x Jahren		20,8	13,9			
		99,6 % ^{14}C-Austausch nach x Jahren	13,9			22,2	13,9	11,1
1967	162,4					162,4		
1968	156,4					160,9		
1969	154,4					159,3		
1970	153,0			153,0		157,7		
1971	149,9		149,9	152,7	149,9	155,8		
1972	146,5		148,5	152,1	149,4	153,4		
1973	141,9		145,9	151,1	148,3	150,6		
1974	140,1		143,6	150,0	147,0	147,9		
1975	136,8		140,9	148,6	145,5	145,2		
1976	135,2		138,6	147,3	144,0	142,7		
1977	133,5		136,6	145,9	142,4	140,4	133,5	
1978	133,5		135,3	144,7	141,1	138,7	133,5	133,5
1979	129,4		133,0	143,1	139,3	136,3	132,5	131,9
1980	127,1		130,6	141,5	137,5	134,0	131,1	130,0
1981	126,0		128,8	140,0	135,8	132,0	129,8	128,4
1982	124,1		126,9	138,4	134,0	130,0	128,4	126,7
1983	122,4		125,1	136,8	132,3	128,1	126,9	125,0
1984	120,9		123,4	135,2	130,6	126,3	125,4	123,3
1985	120,0		122,1	133,7	129,0	124,7	124,1	122,0
1986	118,6			132,2		123,2	122,7	120,6
1987	118,3			130,8		122,0	121,6	119,7
1988	116,9			129,4		120,7	120,4	118,6
1989	115,9			128,1		119,5	119,3	117,5
1990	114,9			126,7			118,2	
1991	113,8			125,4			117,1	

Umrandet sind der ^{14}C-Wert aus der Atmosphäre im Ausgangsjahr für die Berechnungen und der schrittweise über das Zeitintervall errechnete ^{14}C-Wert unter Verwendung der vorgegebenen Austauschrate. Letzterer ist zusätzlich grau markiert, wenn er im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s liegt.

VI 3.2.6 Gewebeart und Gewebealter

In den Kapiteln VI 1.3.2 und V 1.3.2 wurde der ^{14}C-Wert aus Kompakta bzw. Spongiosa für sechs Individuen bereits verglichen (ID 37/38 bis 47/48, Anhang 16). Es zeigt sich in vier Fällen (ID 37/38, 43/44, 45/46, 47/48) eine für Spongiosa deutlich höhere Stoffwechselaktivität ohne Überlappung und in einem Fall (ID 39/40) eine tendenziell höhere Aktivität mit Überlappung der Übereinstimmungsbereiche zwischen gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten für Kompakta (ungerade IDs) bzw. Spongiosa (gerade IDs). Damit unterstreichen die hier vorliegenden Beobachtungen, dass bei der Probengewinnung die Gewebeart zu berücksichtigen ist, auch wenn sich alle 12 vorliegenden ^{14}C-Werte mit Austauschraten bis zu 7 % ausreichend genau berechnen lassen. Damit wiederholen sich für Kollagen die Ergebnisse, wie diese für Apatit unter Verwendung von ^{90}Sr hergeleitet wurden und deutlich höhere Stoffwechselraten für spongiosareiche Skelettelement erbrachten (Tab. 1 Kap. II 3.3).

In Kapitel II 5.4.4 wurde bereits allgemein und in den Kapiteln VI 1.3.3 und V 1.3.3 für die drei Proben ID 94, 95, 96 der Einfluss des Gewebealters auf den im Kollagen gemessenen ^{14}C-Wert diskutiert und dargestellt. Alle drei Proben entstammen der linken Tibia eines 19jährig im Jahr 1990 verunglückten jungen Mannes. In Tabelle 75 ergibt sich für ID 94 – der Probe mit einem Gewebealter von nur ca. 7 Jahren – eine etwas höhere Stoffwechselaktivität vor allem im Vergleich zu ID 96 – der Probe mit einem den Lebensjahren entsprechenden Gewebealter. Damit wird der Eindruck unterstützt, dass das Gewebealter einen Einfluss auf den Vergleich von berechneten und gemessenen ^{14}C-Werten hat. Jedoch stellt sich dieser Einfluss bei der vorgewählten Übereinstimmungsgenauigkeit (± 4s) und bei der Plazierung des Donors mit seinen Lebensdaten im Vergleich zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre nach dem Gipfel im Jahr 1964 nur als Tendenz dar. Es lassen sich alle drei Proben mit Austauschraten bis zu 7 % ausreichend genau mit dem Modell FoRCaDa berechnen.

VI 3.2.7 Einfluss der Berechnung der Lebensjahre auf den berechneten ^{14}C-Wert

Wie im Methodenteil in Kapitel IV 3.1 ausgeführt, wird durch den gewählten Modus zur Berechung der Lebensjahre bei 11 Individuen das Lebensjahr um 1 Jahr überschätzt. Nachfolgend wird überprüft, ob sich daraus nicht vertretbare Abweichungen bei den berechneten ^{14}C-Werten ergeben. In Tabelle 77 sind für diese 11 Individuen die entsprechenden Überein-

stimmungsbereiche dargestellt. Die Differenzen zwischen berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert sowie die Abweichungen zwischen den berechneten ^{14}C-Werten je Austauschrate sind Anhang 62 zu entnehmen.

Tabelle 77: Vergleich der Übereinstimmungsbereiche für 11 Individuen, bei denen die Lebensjahre durch den Rechenmodus überschätzt werden (Kap. IV 3.1, Anhang 62).

								Austauschrate																										
ID	G	Gj	Sj	^{14}C	s	±4s	Lj	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%	7,5%	8,0%	9,0%	10,0%	12,5%	15,0%	20,0%	25,0%	40,0%	50,0%	66,0%
99	f	1975	1985	126,7	1,5	6,0	10															X									
							11							X																	
97	m	1972	1990	118,6	1,1	4,4	18																				X				
							19																			X					
87	m	1960	1980	143,4	1,0	4,0	20					X																			
							21		X																						
80	m	1951	1976	140,0	2,4	9,6	25																							X	
							26																						X		
88	m	1963	1990	131,5	0,9	3,6	27								X																
							28							X																	
72	m	1939	1981	120,8	0,8	3,2	42				X																				
							43				X																				
62	m	1934	1977	136,5	1,4	5,6	43													X											
							44													X											
67	m	1938	1985	118,9	1,2	4,8	47				X																				
							48				X																				
58	m	1924	1979	111,2	1,2	4,8	55		X																						
							56		X																						
55	m	1903	1982	113,7	1,2	4,8	79		X																						
							80		X																						
52	f	1902	1983	132,8	1,6	6,4	81													X											
							82															X									

Graue Markierung: $^{14}C_{berechnet}$ liegt im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4s$

□ : Kleinste Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert, wenn Austauschraten bis 7 % berücksichtigt werden

X : Kleinste Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert, wenn Austauschraten bis 66 % berücksichtigt werden

Vergleicht man die Differenzen zwischen berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert für alle 24 Austauschraten, werden Unterschiede nur bei 6 Individuen deutlich. Dabei handelt es sich bei:

- ID 99 um das einzige Kind in dieser Stichprobe (Kap. VI 3.2.3)
- ID 97, 87, 80 und 88 um Jungerwachsene unter 30 Jahren (Kap. VI 3.2.4) und
- ID 52 um eine deutlich an Osteoporose erkrankte Frau.

Gleichzeitig lassen sich für alle Individuen die gemessenen ^{14}C-Werte unabhängig vom Berechnungsmodus für die Lebensjahre durch Austauschraten bis zu 7 % ausreichend genau berechnen. Nur bei drei Individuen unter 30 Jahren wird ein Unterschied erkennbar, wenn die kleinste Differenz zwischen berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert für Raten bis zu 7 % beurteilt wird:

- Für ID 99 ergibt sich für eine 10jährige eine durchschnittliche jährliche Austauschrate von 7 % und für eine 11jährige von nur noch 4,0 %
- Für ID 87 ergibt sich für einen 20jährigen eine Austauschrate von 3,0 % und für einen 21jährigen von 1,5 %
- Für ID 88 ergibt sich für einen 27jährigen eine Austauschrate von 4,5 % und für einen 28jährigen von 4,0 %.

Die Austauschrate als jährlicher Durchschnittswert über die Lebensspanne eines Donors übernimmt bei Heranwachsenden eine z. T. andere Funktion als bei Erwachsenen, wie in Kapitel II 5.5.3 bereits ausgeführt wurde. Neben dem Anteil an ^{14}C, der durch Umbauprozesse mit externen Reservoiren über die gesamte Lebensspanne hinweg jährlich ausgetauscht wird, werden durch die Austauschrate bei Kindern und Jugendlichen Abweichungen bei der Skelettmasse-Entwicklung im Vergleich zum Durchschnitt der entsprechenden Geschlechts- und Alterskohorte „aufgefangen“. Ob dies zu dem ansatzweise in den Kapiteln II 5.5.2 und VI 3.2.3 diskutierten (exponentiellen) Abfall der Austauschraten auf die im Erwachsenenalter vorliegenden Werte beiträgt, kann wegen fehlender Proben hier nicht geklärt werden. Die Beobachtung für ID 99 unterstreicht die bereits in Kapitel VI 3.2.3 gezogene Schlussfolgerung, das Modell FoRCaDa für Individuen zwischen dem 2. und 9. Lj. nur unter Vorbehalt zur Interpretation gemessener ^{14}C-Werte heranzuziehen.

Weiterhin lässt sich erkennen, dass durch die Einschränkung der Austauschraten auf 7 bzw. 6 % die Güte der Übereinstimmung bei 5 der 11 Individuen zwar verschlechtert wird, jedoch liegen mit Ausnahme von ID 97 die Differenzen noch immer deutlich im Übereinstimmungsbereich von ± 2 s und damit klar in dem für das Modell FoRCaDa definierten Bereich.

VI 3.3 Vergleich von gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten: Ein erster Schritt zur Validierung des Modells FoRCaDa

In Kapitel V 3.5 wurde für insgesamt 22 Proben eine „Bestimmung“ der Liegezeit mit dem Modell FoRCaDa versucht. Auch wenn dieses kasuistische Vorgehen nur den ersten Schritt auf dem Weg zur Validierung des Modells darstellt, können wichtige Punkte diskutiert und festgehalten werden. So deutet sich eine recht individuelle Berechnung von Sterbezeitintervallen an (vgl. ID 98 Kap. V 3.5.3 und ID 77 und Id 45 in Kap. V 3.5.4), die durch die Hinzunahme einer zweiten Gewebefraktion (Fett) noch präzisiert werden können.

Eine erfolgreiche Identifikation von humanen Skelettfunden gelingt am besten in interdisziplinärer Zusammenarbeit. Einen wichtigen Schritt stellt dabei die Bestimmung der Liegezeit oder des postmortalen Intervalls dar (Kap. I). Soll diese unter Ausnutzung des Kernwaffeneffektes und des damit verbundenen ^{14}C-Anstiegs in der Atmosphäre erfolgen (Kap. II 2, Kap. II 3.2), ist z. B. eine enge Zusammenarbeit zwischen Kriminaltechnik, Polizei, forensischer Osteologie sowie einem ^{14}C-Labor erforderlich. Das Modell FoRCaDa ist dabei als integrative Schnittstelle zwischen diesen Fachbereichen anzusehen. In der Verantwortung des Osteologen stehen die Geschlechts- und Altersbestimmung (in Lebensjahren) sowie die Auswahl eines geeigneten, für das Gesamtskelett repräsentativen Fragmentes (Kap. II 5.4.5, Kap. V 1.4) für die ^{14}C-Bestimmung im Knochenkollagen und / oder -fett. Bei dieser Probe sollte es sich vorzugsweise um ein Fragment des postkranialen Skeletts in einem physiologisch repräsentativen Anteil handeln (gesamter Knochen, dessen physilogische Hälfte bzw. Späne derselben, Kap. V 1.4). Im ^{14}C-Labor erfolgt anschließend die ^{14}C-Bestimmung für die Probe. Diese sollte vollständig aufbereitet werden, wobei die „harte“ Methode der Gelatine-Herstellung zu verwenden ist. Erst in einem abschließenden Schritt sollte die für die Beprobung mittels Zählrohr- oder AMS-Technik notwendige Teilmenge abgenommen werden. Diese Restriktionen sind unbedingt zu beachten und zielen auf die Vermeidung von Reservoir-Effekten. Der gemessene ^{14}C-Wert wird nachfolgend mit den durch das Modell FoRCaDa berechneten und tabelliert vorliegenen Werten verglichen. Dabei ist zu beachten, dass unter Verwendung einer durchschnittlichen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ getrennt für beide Geschlechter sowie für jede der als konstant angenommenen, jährlichen Austauschrate zwischen 1 und 6 % für Kollagen bzw. zwischen 20 und 66 % für Fett für alle in einem bestimmten Kalenderjahr geborenen und nach erreichen eines bestimmten Lebensjahres verstorbenen Individuen genau ein Wert für jede

Gewebefraktion berechnet wird. Die Variabilität zwischen den Individuen wird über den Vergleich des gemessenen mit den berechneten ^{14}C-Werten in einem vorgewählten Übereinstimmungsbereich berücksichtigt. In dieser Arbeit ist dieser Bereich mit $^{14}C_{gemessen} \pm 4s$ festgelegt (Kap. IV 3.4, Kap. V 3.4).

Die folgenden Ausführungen beziehen sich vorrangig auf Knochenkollagen. Wie die Ergebnisse in Kapitel V 1.3.1 und V 3.5.3 bzw. V 3.5.4 jedoch zeigen, können für Knochenfett die gleichen methodischen Grundlagen herangezogen werden. Beide Gewebefraktionen unterscheiden sich ganz offensichtlich nur in der Austauschrate für ^{14}C. So erfolgt der Vergleich zwischen gemessenem ^{14}C-Wert und den durch das Modell FoRCaDa berechneten ^{14}C-Werten bei Kollagen für 11 Austauschraten zwischen 1 und 6 % und bei Fett für 5 Raten zwischen 20 und 66 % unter Berücksichtigung individueller Daten, die auch bei einem Skelettfund regelmäßig erhoben werden können (Kap. IV 3.4.3, Kap. V 3.5):

- Das (anthropologisch bestimmte) Geschlecht
- Die erreichten (anthropologisch bestimmten) Lebensjahre
- Das Auffindungsjahr als Obergrenze für das Suchintervall und
- Das Kalenderjahr (minus der maximal erreichten Lebensjahre) als Untergrenze für das Suchintervall, in dem der gemessene ^{14}C-Wert in der Atmosphäre das erste Mal bei ^{14}C-Werten $\leq$ 100 pMC unter- bzw. bei ^{14}C-Werten > 100 pMC überschritten wurde.

Weiterhin wird je Kombination von möglichem Geburtsjahr und erreichten Lebensjahren nur derjenige von den berechneten ^{14}C-Werten beibehalten, für den sich die kleinste absolute Differenz zwischen beiden ^{14}C-Werten errechnet *und* deren Betrag höchstens das 4fache der Standardabweichung des gemessenen ^{14}C-Wertes ergibt. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse wird die absolute Differenz in die Anzahl von Standardabweichungen umgerechnet ($|^{14}C_{gemessen} - ^{14}C_{berechnet(Minimum)}| / s$). Somit wird in diesem Intervall auch nicht mehr zwischen einer tendenziellen Überschätzung (Differenz < 0) oder Unterschätzung (Differenz > 0) des Messwertes durch das Modell FoRCaDa unterschieden. Im Folgenden werden Probleme benannt, die sich für eine Liegezeitbestimmung unter Verwendung des Modells FoRCaDa z. T. in Wechselwirkung mit der physikalischen Methode der ^{14}C-Bestimmung und den Methoden der forensischen Osteologie ergeben.

Eine erste Annäherung an ein mögliches Sterbejahr ergibt sich aus dem Vergleich von gemessenem ^{14}C-Wert und dem Kalenderjahr, indem dieser Wert erstmalig erreicht wurde. Dies ist deshalb nur als eine Annäherung zu verstehen, da dieser Vergleich nur anhand des mittleren gemessenen ^{14}C-Wertes erfolgt (Kap. V 1.3.1).

Nach den Modellvorstellungen von LIBBY (Kap. II 2.2) wird eine Probe mit einem ^{14}C-Wert unter 100 pMC per Definition *mindestens* als *prämodern* eingeordnet, das heisst, es wird von einem Sterbejahr vor 1950 ausgegangen (Kap. I). So erfolgt durch die ^{14}C-Labore unter Anwendung verschiedener Programme (CalibETH: NICKLAUS ET AL. 1992, Calib3.0: STUIVER UND REIMER 1993, INTCAL98: PUCHEGGER ET AL. 2000) gelegentlich die Angabe von Wahrscheinlichkeiten für Zeitintervalle, in denen das Individuum verstorben sein könnte. Diese Angaben beruhen auf dem gesetzmäßigen Zerfall von ^{14}C mit einer HWZ von 5730 ± 40 Jahren und einer Parallelisierung mit kalibrierten ^{14}C-Werten (Kap. II 2.4), jedoch ohne ausreichende Berücksichtigung von Stoffwechselprozessen in den entsprechenden Geweben. Betrachtet man den Verlauf des atmosphärisch vorliegenden ^{14}C, so wird wegen der Auswirkungen von Industrialisierungs- und Kernwaffeneffekt in der Atmosphäre erst wieder im Jahr 1955 ein ^{14}C-Wert von 100 pMC erreicht (Kap. II 2.3). Auch ohne spezielle Annahmen zu den Stoffwechselprozessen im humanen Knochengewebe sind beim Vorliegen von Messwerten zwischen 97,2 und 100 pMC (97,2 pMC: 1949 gemessene niedrigste ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre seit 1865, Anhang 1a) schon allein deshalb Sterbejahre nach 1955 in die Betrachtung mit einzubeziehen.

Für Messwerte bis 97,2 pMC kann die Zuordnung als *modern* somit nur dann sicher ausgeschlossen werden kann, wenn die Fundumstände dies wie z. B. bei ID 1, 3 und 5 nahelegen. Mit dem Modell FoRCaDa lassen sich in Abhängigkeit von Geburtsjahr und erreichten Lebensjahren bis in die 1960er Jahre Werte unter 100 pMC berechnen. Wie in Kapitel VI 3.2.2 bereits diskutiert, bieten sich als Unterscheidung zwischen prämodernen und modernen Skelettfunden die Jahre 1963 bis 1965 an. In diesen drei Jahren lagen in der Atmosphäre deutlich über 170 pMC ^{14}C vor (Anhang 1a) und bereits bei einer Austauschrate von nur 1 % wird der Übereinstimmungsbereich von + 4 s deutlich überschritten. Somit rücken Skelettfunde mit gemessenen ^{14}C-Werten unter 100 pMC (bis 97,2 pMC) wieder in den Focus kriminalpolizeilicher Aufmerksamkeit. Die Angabe von Sterbewahrscheinlichkeiten, wie diese von ^{14}C-Laboren zum Teil vorgenommen wird, ist nicht verantwortbar. An dieser Stelle erfolgt daher keine Eingrenzung, sondern eine Ausdehnung des zu berücksichtigenden Intervalls durch das Modell FoRCaDa und schließt alle Funde, die als sicher prämodern (TAYLOR ET AL. 1989, UBELAKER 2001) gegolten haben, komplett wieder mit ein. Ein Ausschluss kann nur aus den Fundumständen oder durch die Hinzunahme einer gleichzeitig zu messenden Fettprobe erfolgen. Letztere spiegel durch den deutlich höheren ^{14}C-Austausch in dieser Fraktion den ^{14}C-Gipfel in der Atmosphäre früher und präziser wider (vgl. Kap. V 3.5.3, V 3.5.4).

Die gemessene ^{14}C-Konzentration im Knochen ist von den lebenslang im Skelett stattfindenden Stoffwechselprozessen und von der durch Geburtsjahr und Lebensjahre festgelegten Zuordnung eines Individuums zur ^{14}C-Kurve der Atmosphäre abhängig. Die Bestimmung der erreichten Lebensjahre stellt in der forensischen Routine regelhaft ein Problem dar und kann bei Skelettfunden nur mit relativ breiten Toleranzgrenzen erfolgen, die sich wiederum in der Bestimmung möglicher Sterbezeitintervalle widerspiegeln. Illustrativ dafür sind die simulierten Leigezeitbestimmmungen, die für identifizierte jüngere Individuen (Kap. V 3.5.3) schmalere und für ältere Individuen (Kap. V 3.5.4) breitere Intervalle erbrachten.

Mit dem Modell FoRCaDa wird nach Übereinstimmungen zwischen berechneten und gemessenem ^{14}C-Wert mit einer vorgewählten Genauigkeit gesucht. Konsequenter Weise muss daher mit einer Vorauswahl von mehreren möglichen Sterbejahren z. T. zusätzlich in Abhängigkeit von den erreichten Lebensjahren gerechnet werden. Gleichzeitig ist damit eine Eingrenzung auf ein oder zwei Sterbezeitintervalle – mit den oben angeführten Einschränkungen – nach 1950 möglich. Ob dies eine Hilfe für eine Identifikation oder beim Abgleich mit Vermissten-Dateien darstellt, ist von zusätzlichen Informationen aus dem Fundzusammenhang und ggf. persönlichen, auch am Skelett feststellbaren Merkmalen abhängig (ID 3, 4, 5, 12: Kap.V 3.5.1; ID 11, 14: Kap. V 3.5.3). Es wird somit deutlich, dass sich Erwartungen an eine jahrgenaue Datierung auch dann nicht erfüllen lassen, wenn eine Identifizierung vorliegt und nur das genaue Sterbejahr ermittelt werden soll (ID 15, 16, 17: Kap. V 3.5.4).

Für das Modell FoRCaDa wird nicht versucht, die Zusammensetzung einer Durchschnittsnahrung zu beschreiben, wie sich dies in der Literatur teilweise findet (Kap. II 3.2). Vielmehr wird die ^{14}C-Belastung der Nahrung in einem bestimmten Kalederjahr mit dem in der Atmosphäre vorliegenden Wert gleichgesetzt. Neben dem Durchschnittswert für die jährliche ^{14}C-Konzentration in der Atmosphäre ist im Modell FoRCaDa – ebenfalls als Durchschnittswert – die Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ als Parameter hinterlegt (Kap. II 2.4, Kap. V 2). Je deutlicher die tatsächlichen, aber unbekannten Gegebenheiten von diesen Parametern abweichen, um so schwieriger bzw. gar unmöglich wird eine Liegezeitbestimmung unter Verwendung des eigenen Modells. Abweichungen von der durchschnittlichen ^{14}C-Konzentration können als Reservoir-Effekte zusammengefasst werden und können sowohl lokale Abweichungen beim atmosphärischen ^{14}C, eine abweichende Zusammensetzung der Nahrung (Kap. II 2.2.4, II 3.2, Kap. VI 1.3.1), aber auch abweichende Verhältnisse zwischen sekundärem (intraindividuellem / intraossealem) und primärem

(extraindividuellem) ^{14}C-Austausch oder gar unerkannt gebliebene Pathologien mit abweichenden Stoffwechselraten beinhalten. Auch ist jedes Individuum im Vergleich zu einer durchschnittlichen Entwicklung mehr oder weniger deutlich entwicklungsverzögert (retardiert) bzw. -beschleunigt (akzeleriert; Kap. II 5.4.3). In Tabelle 78 sind die Auswirkungen auf die Differenz aus berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert zusammengestellt. Diese Abweichungen können kaum erkannt oder berücksichtigt werden, beeinflussen aber nachhaltig die Genauigkeit und Präzision der Methode. Diese werden aber immer nur dann greifbar, wenn das Individuum außerhalb von Zeiten mit quasi-stabilen ^{14}C-Konzentrationen gelebt hat – also besonders deutlich zwischen 1950 und 2010 (Anhang 1).

Tabelle 78: Zusammenhang zwischen individueller Entwicklung eines Individuums und durchschnittlicher Entwicklung der Skelettmasse$_{netto}$ mit Beurteilung der resultierenden Differenz zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert.

Entwicklung	verstorben	Geburtsjahr			
		≥ 1865 bis < 1950	≥ 1950 bis < 1965	≥ 1965 bis < 2010	≥ 2010
		^{14}C quasi-stabil/ abnehmend	^{14}C zunehmend	^{14}C abnehmend	^{14}C quasi-stabil/ abnehmend
retardiert	< Wachstumsspurt	≤ 0	< 0	> 0	≤ 0
	≥ Wachstumsspurt	≥ 0	> 0	< 0	≥ 0
akzeleriert	< Wachstumsspurt	≤ 0	> 0	< 0	≤ 0
	≥ Wachstumsspurt	≤ 0	< 0	> 0	≤ 0

< vor; ≥ mit und nach

Ein Beispiel: Ein nach 1950 und vor 1965 geborenes, entwicklungsverzögertes Individuum hat bei seinem Tod vor dem Beginn des Wachstumsschubes weniger von dem jährlich in der Atmosphäre vorliegenden ^{14}C aufgenommen, als im Modell angenommen wird. Da es in der Atmosphäre in diesem Zeitraum zu einem (rasanten) ^{14}C-Anstieg kommt, werden die aufgenommenen ^{14}C-Konzentrationen im Vergleich zu den individuellen Gegebenheiten überschätzt: Die Differenz wird negativ. Demgegenüber werden bei einem vergleichbaren Individuum mit einem Geburtsjahr ab 1965 und bei dem nun zu beobachtenden ^{14}C -Abfall in der Atmosphäre die aufgenommenen ^{14}C-Konzentrationen unterschätzt: Die Differenz wird positiv. Zwar gilt somit weiterhin: Negative Differenzen zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert bedeuten eine Überschätzung durch das Modell FoRCaDa. Bezogen auf das Individuum kann dies in weiterer Abhängigkeit von den Lebensdaten jedoch in einer Akzeleration (ID 98, Kap. V 3.5.3) oder in einer Retardation (ID 97, Kap. V 3.5.3) im Vergleich zum Durchschnitt begründet sein. Wenn die individuellen Abweichungen von den

hinterlegten Durchschnittswerten nicht zu groß werden, sollten diese im vorgewählten Übereinstimmungsbereich liegen. Teilweise werden die Abweichungen durch die im Modell berücksichtigte jährliche Austauschrate ausgeglichen.

Die Berechnung der Liegezeit von kindlichen Skelettfunden mit dem Modell FoRCaDa stellt ein Problem dar, da in der Referenzserie nur ein sicher identifzierter Skelettfund eines 10jährigen Mädchens (ID 99) sowie eines im 1. Lebensjahr verstorbenen Säuglings mit unbekanntem Sterbejahr (ID 18) vorliegen. Somit kann nicht unterschieden werden, ob es in der kindlichen und jugendlichen Entwicklung zu einem (exponentiellen) Abfall der jährlichen Austauschrate $1/t_C$ kommt, oder bereits eine (mehr oder weniger) konstante Rate wie im Erwachsenenalter vorliegt. Da davon ausgegangen werden kann, dass der im Knochenkollagen gemessene ^{14}C-Wert bei Kindern hauptsächlich auf Wachstums- und weniger auf Austauschprozesse zurückzuführen ist (Kap. II 5.5.2, vgl. Kap. II 3.3 zu ^{90}Sr), wird dieses Problem zwar abgeschwächt, jedoch nicht vollständig beseitigt. In der Konsequenz können mit dem Modell FoRCaDa nur erste Anhaltspunkte für die Liegezeitbestimmung von kindlichen Skelettfunden gewonnen werden. Im Abgleich mit den Fundumständen und der anthropologisch vorgenommenen Altersbestimmung sollte eine weitere Eingrenzung möglich sein. Die Versuche einer Liegezeitbestimmung für ID 18 und ID 99 (Kap. V 3.5.2) stimmen auf jeden Fall optimistisch.

Neben der Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ wird eine konstante jährliche Austausschrate 1/t als Parameter im Modell FoRCaDa berücksichtigt. Sie wird in ihrem Umfang durch Umbauprozesse (Kap. II 4.4.4, II 5.5.2) im Knochengewebe und einen von Knochenabbau überlagerten Knochenaufbau (Korrekturwert; Kap. II 5.5.1) nach oben begrenzt, ohne jedoch mit einem dieser beiden Prozesse oder deren Gesamteffekt identisch zu sein. Denn bei Kochenumbau und -aufbau kommt es regelhaft zu einem intraindividuellen bzw. intraossealen ^{14}C-Austausch (Kap. II 3.3). Da anhand von histologischen Gewebeproben für Femurkompakta ein Durchschnittsalter von 55 Jahren bzw. für Rippenkompakta von 30 Jahren ermittelt wurde (Kap. II 4.4.4), wird deutlich, dass der Anteil des sekundären ^{14}C-Austausches jedoch eher gering ausfällt.

Es soll festgehalten werden, dass die im Rahmen dieser Arbeit festgelegte Austauschrate einen Kompromissparameter für die nicht ausreichend quantifizierbare Umbaurate und den Korrekturwert darstellt (Kap. II 5.5.3), der nur den langfristig, kontinuierlichen Kohlenstoffaustausch mit extraindividuellen ^{14}C-Reservoiren erfasst. Gleichzeitig ist dieser nicht mit dem in der Literatur bereits definierten Parameter identisch (Kap. II 3.2), da die Masse-

entwicklung durch diesen nicht mehr berücksichtigt werden muss. Dennoch unterstützen die hier vorgelegten Ergebnissen den relativ geringen ^{14}C-Austausch, wie dieser in der Literatur bereits diskutiert wurde (Kap. II 3.2). Das bedeutet: Sobald ^{14}C im Knochenkollagen aufgenommen wurde, bleibt es dort auch für relativ lange Zeit. Eine HWZ_{bio} von 60 Tagen, wie sich diese z. B. im PSCHYREMBEL (2002) findet, ist klar falsch.

Ein Problem in dieser Arbeit stellt dar, dass die jährliche Austauschrate $1/t_C$ für Kohlenstoff im Knochenkollagen nur auf 11 Raten zwischen 1 und 6 % eingegrenzt werden konnte. In der Referenzserie deutet sich zwar eine Alters- und auch eine Geschlechtsabhängigkeit dieser Raten bei einer gleichzeitig zu beobachtenden hohen interindividuellen Variabilität an. Diese ersten Hinweise konnte jedoch nicht zu einer weiteren Eingrenzung der Raten herangezogen werden. Mit dem Modell FoRCaDa werden daher die Berechnungen für jede der 11 Austauschraten als gleichberechtigt nebeneinander gestellt, von denen erst in einem nachfolgenden Schritt der berechnete Wert mit der kleinsten absoluten Abweichung zum Messwert beibehalten wird. Dabei kann bei fast allen Individuen beobachtet werden, dass diese im vorgewählten Übereinstimmungsbereich und in Abhängigkeit vom Geburtsjahr sowie den erreichten Lebensjahren zwischen 1 und 6 % hin und her „driften“ (vgl. Anhang 38c bis 60c). An dieser Stelle besteht somit ein deutlicher Bedarf für eine Verbreiterung der Datenbasis, um nachfolgend die Vorauswahl an Austauschraten weiter eingrenzen zu können. Ansätze finden sich in der Literatur zur Osteoporoseforschung mit der Andeutung von Stoffwechseltypen bzw. einem insgesamt etwas geringeren Stoffwechsel bei den Männern im Vergleich zu dem bei den Frauen (Kap. V 3.4).

Damit entspricht der hier verwirklichte Ansatz dem Modell von KULP ET AL. (1957, 1959, 1960). Diese Autoren schätzten den ^{90}Sr-Anteil im Knochenapatit unter Berücksichtigung einer lebenslang als konstant angenommenen Austauschrate (Kap. II 3.3). Diese Übereinstimmung ist vor allem in der eingeschränkten Datenbasis der vorliegenden Studie zu sehen, für die sich dynamischere und damit den physiologischen Gegebenheiten ggf. besser entsprechende Ansätze nicht modellieren lassen (Kap. VI 3.2.3).

Wie bereits mehrfach erwähnt, ist für ein nicht-identifiziertes Individuum die Breite möglicher Sterbezeitintervalle auch von dem vorgewählten Übereinstimmungsbereich zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert abhängig. In der Referenzserie liegt:

- Bei einem vorgewählten Übereinstimmungsbereich von ± 4 s für 3 der 74 Proben (4 %; ID 49, 83, 77) das bekannte Sterbejahr nicht in den ermittelten Sterbezeitintervallen (Kap. VI 3.2.1). Für ID 83 und 77 ergibt sich eine derart große Diskrepanz zwischen den in Abhängigkeit von den Lebensjahren ermittelten Sterbejahren und der anthropologischen Altersbestimmung, dass diese Proben eindeutig als ungeeignet zur Liegezeitbestimmung identifiziert werden können (Kap. V 3.5.3 und V 3.5.4). ID 49 wird dagegen nur in Kombination mit dem ^{14}C-Wert einer Fett-Probe als problematisch erkannt (Kap. V 3.5.3, Kap. VI 3.2.1)
- Bei einem vorgewählten Übereinstimmungsbereich von ± 3 s für weitere 3 und somit für insgesamt 8 % der 74 Proben (ID 49, 83, 77, 97, 91, 81) das tatsächliche Sterbejahr nicht in den ermittelten Sterbezeitintervallen. Dabei handelt es sich ausschließlich um Proben von Männern, die zwischen dem 18. und 42. Lj. verstorben sind. Da im Modell FoRCaDa die Stoffwechselprozesse im Skelett durch die jährliche, relative Änderung der Skelettmasse$_{netto}$ ΔSM und die jährliche Austauschrate $1/t_C$ beschrieben werden, *könnten* Abweichungen vor allem im Vergleich zur durchschnittlichen Skelettmasse-Entwicklung$_{netto}$ des Gesamtskelettes für die auffälligen Werte verantwortlich sein: Bei ID 91 und 77 bedingt durch die Probenentnahme am Cranium (Kap. V 3.5.4), bei ID 49 durch die materialsparende AMS-Methode in Kombination mit einem vom chronologischen Alter abweichenden Gewebealter (Kap. V 1.3.1, V 3.5.3, VI 1.3.1) und bei ID 97 evtl. in einer allgemeinen Retardation (Kap. V 3.5.3). Ebenfalls können unerkannt gebliebene bzw. unterschätzte Pathologien nicht ausgeschlossen werden: Beispielsweise ist für ID 81 ein jahrelanger Alkoholabusus bekannt (Anhang 13).

In einem Übereinstimmungsbereich von ± 3 s um den Messwert darf zu 99,7 % der wahre Wert erwartet werden, wenn keine systematischen Fehler vorliegen. In der Referenzserie werden jedoch für 4 (5,4 %) der 74 Proben Sterbzeitintervalle errechnet, die das tatsächliche Sterbejahr nicht beinhalten und ohne dass sich diese Proben als problematisch zu erkennen geben (ID 49, 97, 91, 81). Anhand dieser Ergebnisse muss bei 1,4 bis 13,3 % (95%-KI) aller Proben mit entsprechenden Fehlbestimmungen gerechnet werden.

Bei einem Übereinstimmungsbereich von ± 4 s ist der tatsächliche Wert zu 99,9 % in dem Intervall zu erwarten. Daher muss bei etwa 0 bis 7,3 % (95%-KI) aller Proben mit entsprechenden Fehlinterpretationen bei der Liegezeitbestimmung gerechnet werden, wenn die Beobachtungen für ID 49 verallgemeinert werden. Da für den Literaturwert ID 49 mit großer Sicherheit die hier aufgestellten restriktiven Aufbereitungsschritte nicht eingehalten wurden (Kap. V 1.4), könnte man diese fehlende Übereinstimmung zwischen Rechen- und Messwert relativieren. Aber selbst wenn in der Referenzserie für alle Proben eine Übereinstimmung erzielt werden würde, muss bei dem eingeschränkten Umfang der Serie dennoch mit bis zu 5 % Fehlbestimmungen in der forensischen Routine gerechnet werden (95%-KI für 0 beobachtete Fehlbestimmungen bei 73 Proben).

In der Literatur finden sich dagegen häufig Übereinstimmungsbereiche von ± 2 s. In diesem Bereich kann zwar zu 95 % der tatsächliche ^{14}C-Wert erwartet werden. In der Referenzserie befindet sich jedoch bei 14 von 74 Proben (19 %, Kap. V 3.3.2 Modell 1a) bzw. 10 von 56 Proben (18 %, Kap. V 3.3.2 Modell 2 b) das tatsächliche Sterbejahr nicht in diesem Bereich. Unter Verallgemeinerung dieser Angaben muss mit einer Fehlinterpretation bei der Bestimmung der Liegezeit zwischen 10,7 und 29,7 % (95%-KI, Modell 1a) bzw. zwischen 8,9 und 30,2 % (95%-KI, Modell 2b) gerechnet werden. Damit kann ein Übereinstimmungsbereich von ± 2 s als nicht ausreichend für das Modell FoRCaDa angesehen werden. Die Ursache ist in der interindividuellen Variabilität zu sehen. Daher sollte bei einem Vergleich mit / von Literaturdaten dieser auch für einen Bereich von ± 3s besser jedoch von ± 4s vorgenommen werden. Die Konsequenz ist, dass somit etwas weniger präzise (breitere), aber dafür genauere, weil das tatsächliche Sterbejahr enthaltene Intervalle erhalten werden.

Übereinstimmungsbereiche von ± 4s bzw. ± 3s überdecken jedoch Konzentrationsunterschiede für ^{14}C, die in Abhängigkeit von Gewebealter, Gewebefraktion, Skelettregion und Datierungsmethode zu erwarten sind. Dies lässt das Modell FoRCaDa als relativ robust erscheinen, muss aber im Rückblick auf die Ausführungen in Kapitel II 5.4 und Kapitel V 1.3 durchaus auch kritisch bewertet werden. Insgesamt muss die Radiocarbon-Methode als wenig sensitiv im Hinblick auf die Unterscheidung von Stoffwechselraten zwischen Skelettregionen und -geweben eingeschätzt werden. Weiterhin müssen Schlussfolgerungen auf Grundlage von einem (GEYH 2001) bzw. einigen wenigen Individuen (WILD ET AL. 2000) kritisch beurteilt werden. Zusätzlich kann es wegen einer unsauberen Unterscheidung zwischen chronologischem und Gewebealter bzw. Gewebeentstehungszeit und Liegezeit (SPALDING ET AL. 2005) zu Fehleinschätzungen in Bezug auf die Eignung von ^{14}C zur Liegezeitbestimmung kommen.

Besonders optimistisch im Hinblick auf die Bestimmung der Liegezeit kann die Kombination von ^{14}C-Werten für verschiedene Gewebsfraktionen eingeschätzt werden. Für insgesamt 25 Individuen (Kap. IV 1.3, IV 1.4) konnten entsprechende Werte zusammengetragen werden. Besonders hilfreich hat sich die Kombination von ^{14}C-Werten für Kollagen und Fett dargestellt (z. B. ID 49: Kap. V 1.3.1, V 3.5.3, VI 1.3.1; ID 15, 16: Kap. V 1.3.1, V 3.5.4, VI 1.3.1). Fett mit seiner deutlich höheren Austauschrate (zwischen 20 und 66 % modelliert) liefert wesentlich schmalere Sterbezeitintervalle. Im Kollagen mit seinen geringen Austauschraten (zwischen 1 und 6 %) wird dagegen über ein wesentlich längeres

Intervall die ^{14}C-Entwicklung in der Atmosphäre konserviert. Dieser Umstand hat besondere Bedeutung, wenn man berücksichtigt, dass bis zum Jahr 1950 und ab dem Jahr 2010 ein quasi-stabiler Zustand bei den ^{14}C-Konzentrationen in der Atmosphäre vorlag bzw. vorliegen wird. In Kombination beider ^{14}C-Werte kann eine Präzisierung der Liegezeit anhand möglicher Sterbezeitintervalle bei nicht-identifizierten Individuen erwartet werden. Beispielsweise konnte aus der Kombination beider Werte bei ID 49 eine Fehlinterpretation bei der Bestimmung der Liegezeit vermieden werden, wie dies für den Kollagenwert allein erfolgt wäre (Kap. V 1.3.1). Ist das Individuum identifiziert und nur das Sterbejahr unbekannt (z. B. ID 15, 16 und simuliert für ID 59 und 66, Kap. V 3.5.4), kann mit einer Fett-Probe das Sterbejahr zwar präziser aber dennoch ebenfalls nicht jahrgenau ermittelt werden.

Die Kombination der Messwerte für Kollagen und Fett hat einen Nebeneffekt: Durch das Modell FoRCaDa können sowohl sehr unterschiedliche ^{14}C-Werte für beide Gewebefraktionen wie bei ID 59 und gleichzeitig relativ ähnliche ^{14}C-Werte wie bei ID 66 (Kap. V 3.5.4) erklärt werden. Da sich die Berechnungen für Kollagen und Fett nur bei den Austauschraten unterscheiden, wird damit die grundsätzliche Richtigkeit des Parameters ΔSM unterstützt.

Abschließend wird in Abbildung 39 eine Zusammenfassung der Grundlagen für eine Liegezeitbestimmung unter Verwendung von Radiocarbon versucht. In dieser wird der interdisziplinäre Ansatz des Modells FoRCaDa und die integrative Positionierung zwischen forensischer Osteologie und Radiocarbon-Methode deutlich. Auch wird auf Entscheidungen bei der Erarbeitung der Modell-Parameter aufmerksam gemacht.

Vorrangiges Ziel für eine Überprüfung des theoretischen Konzepts sollte eine Erhöhung der Fallzahl identifizierter, radiocarbon-beprobter Skelettfunde sein. Ob dies in die Praxis umzusetzen ist, hängt davon ab, wie der zukünftige Nutzen für die Forensik beurteilt wird. Denn die deutliche Zurückführung des atmosphärischen ^{14}C auf quasi-stabile Werte wird die Präzision nachhaltig beeinflussen und zur Bestimmung breiter Sterbezeitintervalle führen. Dieses Fazit ergibt sich z. T. auch aus der langen Bearbeitungsphase für dieses Projekt.

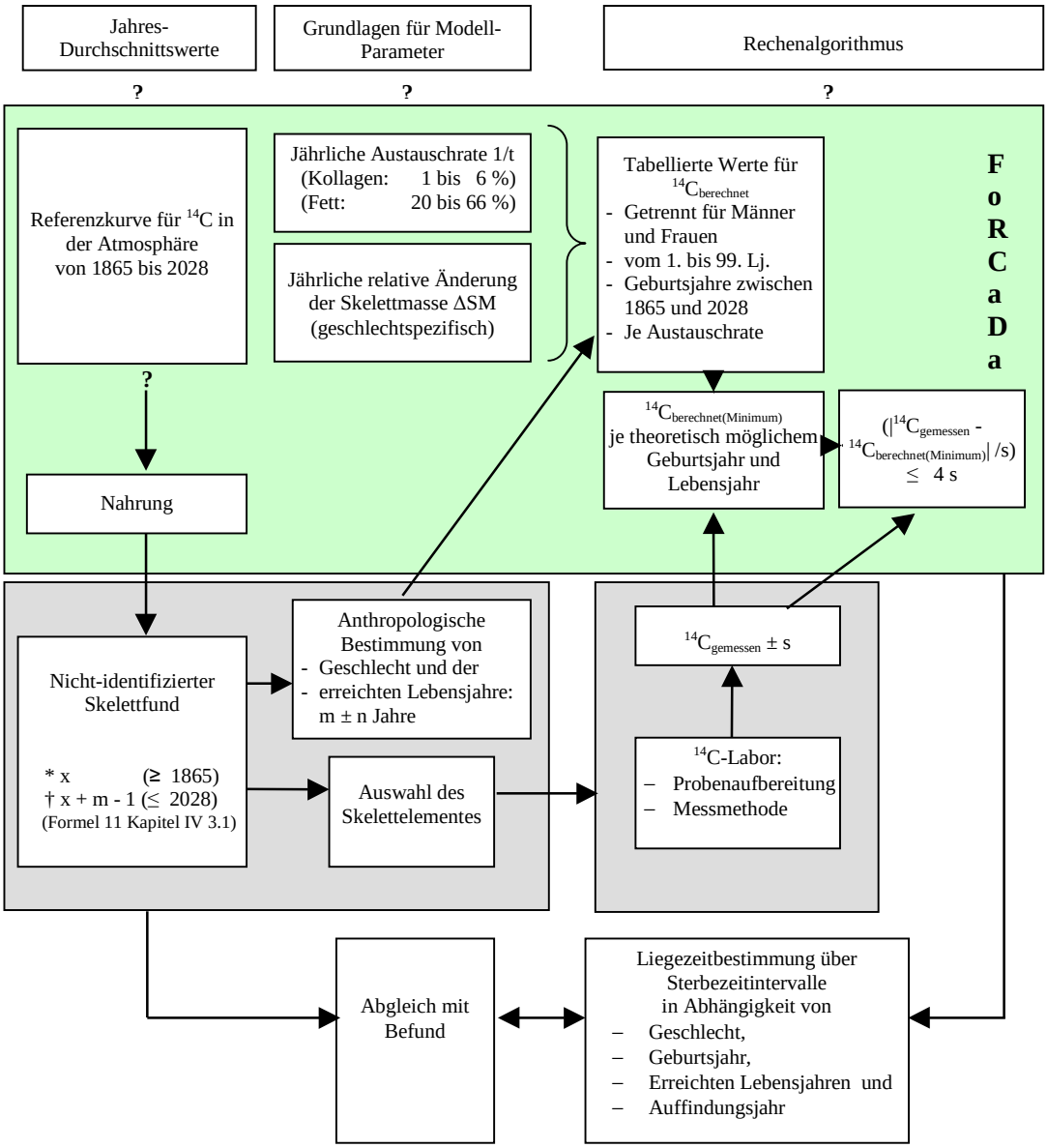


Abbildung 39: Einordnung des Modells FoRCaDa (Forensische Radio-Carbon-Datierung) bei der Liegezeitbestimmung von nicht-identifizierten humanen Skelettfunden unter Verwendung von ^{14}C aus dem Kernwaffeneffekt.

Kapitel VII

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Anwendung der Radiocarbonmethode (^{14}C) zur Liegezeitbestimmung aufgefundener menschlicher Skelettreste nach 1950 unter Ausnutzung des Kernwaffeneffektes. Dieser hat in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts zu einem starken Anstieg des ^{14}C in der Atmosphäre und einem nachfolgenden exponentiellen Abfall geführt. Der Ansatz dieser Arbeit beruht somit auf der Interpretation im Knochen gemessener ^{14}C-Werte. Diesem Umstand wird mit der Einführung der Bezeichnung Forensische Radio-Carbon-Datierung, kurz FoRCaDa, für dieses Rechenmodell entsprochen.

Das Modell FoRCaDa ist ein absolut datierendes, von prämortal auf den Organismus wirkenden zeitlichen und biologischen Prozessen geprägtes integratives Verfahren. Als zeitliche Effekte sind zu nennen, wann und wie lange ein Individuum mit der Umwelt in Beziehung trat. Dies wird mit dem Geburtsjahr und den erreichten Lebensjahren erfasst und ist hochvariabel – sowohl in der Länge als auch in der Parallelisierung mit der ^{14}C-Kurve der Atmosphäre. Als biologische Prozesse sind vorrangig Knochenbildung und -umbildung zu nennen. Diese werden von Geschlecht und Alter bzw. Gewebealter beeinflusst und ist für alle Menschen gleich, wenn auch variabel. Die Variabilität ist von Faktoren abhängig, die von einem Osteologen kaum oder nicht erhoben werden können, wie z. B. sozioökonomischer Status, Ernährungsgewohnheiten, Krankheiten, Abweichungen von der durchschnittlichen Entwicklung der zugehörigen Geschlechts- und Alterskohorte.

Unter diesen methodischen Voraussetzungen wurde mit dem Modell FoRCaDa ein relativ robuster Ansatz entwickelt, mit dem ^{14}C-Werte berechnet und mit dem gemessenen ^{14}C-Wert verglichen werden. Über diesen Vergleich wird dann auf mögliche Sterbejahre geschlossen. Dazu wurden maximal 74 ^{14}C-Proben von 66 Individuen differenziert ausgewertet. In dem Modell werden berücksichtigt: (1) Das anthropologisch bestimmte Geschlecht, (2) die anthropologisch bestimmten Lebensjahre, (3) das frühestmögliche Geburtsjahr und (4) das Auffindungsjahr, sowie (5) als Übereinstimmungsbereich für den Vergleich von berechnetem und gemessenem ^{14}C-Wert ± 4 gemessene Standardabweichungen. Die Berechnungen

erfolgen (6) für jedes Kalenderjahr zwischen 1865 bis 2028 auf Grundlage des durchschnittlichen ^{14}C-Wertes in der Atmosphäre, (7) einer für diese Arbeit hergeleiteten relativen jährlichen Änderung der Skelettmasse ΔSM zur Berücksichtigung der Skelettmassebildung bis zum 21. Lj. für Frauen bzw. bis zum 30. Lj. für Männer und (8) Austauschraten $1/t_C$ für Kollagen von 1 bis 6 % zur Berücksichtigung von einem extraindividuellen ^{14}C-Austausch und Knochenumbildung. Als sicher ist für Kollagen im Knochen ein träger ^{14}C-Austauch über alle Skelettelemente, sowohl für Spongiosa als auch für Kompakta, anzunehmen: Gelangt ^{14}C in den Knochen, bleibt es dort auch für lange Zeit.

Die Datierung ist vorzugsweise für Langknochen der unteren Extremität vorzunehmen, die in einem physiologisch vollwertigen Anteil (ganze oder halbe Knochen oder Späne derselben) mit der Methode der Gelatineherstellung aufbereitet werden. Aus dieser Probe ist dann eine Teilmenge zu entnehmen und der ^{14}C-Messung zuzuführen. Diese kann sowohl mit Zählrohr- als auch AMS-Technik erfolgen. Nur so kann Effekten des Gewebealters und des Reservoirs ausreichend begegnet und eine dem Gesamtskelett entsprechende Entwicklung der Knochenmasse vorausgesetzt werden. Erst wenn eine Abschätzung der Modellparameter ΔSM und $1/t_C$ für die einzelnen Skelettregionen und -elemente erfolgt, kann diese Restriktion aufgehoben werden. Dies ist nachfolgenden Studien vorbehalten.

Das Modell FoRCaDa ist zur Liegezeitbestimmung von Erwachsenen bis zum 85. Lj. gut geeignet. Die Beurteilung der Ergebnisse von Kindern erfordert Zurückhaltung, da diese in der Referenzserie fast vollständig fehlen. Für Individuen ab dem 85. Lj. konnte der Parameter ΔSM nur durch Extrapolation ermittelt werden, was ebenso zu einer gewissen Zurückhaltung führen sollte. Insgesamt ist eine sehr differenzierte Liegezeitbestimmung möglich, wobei Proben mit ^{14}C-Werten $\geq$ 97,2 pMC (!) als prinzipiell relevant einzuschätzen sind. In keinem Fall lässt sich jedoch die Erwartung einer jahrgenauen „Datierung“ erfüllen. Dieser Umstand ist vor Allem darauf zurückzuführen, dass es sich bei Menschen um langlebige Organismen handelt, bei dem im interindividuellen Vergleich eine hohe Variabilität beobachtet wird und eine Altersbestimmung in forensischen Fällen in der Regel ein Intervall über mehrere Jahre einschließt. Werden nur für Kollagen ^{14}C-Werte zur Datierung herangezogen, muss bei einem Übereinstimmungsbereich von $\pm$ 4 gemessenen Standardabweichungen (s.o.) bei 5% aller Proben (95%-KI) auch bei Einhaltung der restriktiven Probenaufbereitung mit Fehlinterpretationen gerechnet werden. Durch die kombinierte Beurteilung einer ^{14}C-Probe für Kollagen mit Austauschraten von $\leq$ 6 % und Fett mit Raten $\geq$ 20 % kann die Genauigkeit und die Präzision der Methode deutlich verbessert und problematische Fälle eindeutig identifiziert und von der Bestimmung der Liegezeit ausgeschlossen werden.

Literaturverzeichnis

I American Association of Physical Anthropologists AAPA (1996) AAPA Statement on Biological Aspects of Race. American Journal of Physical Anthropology 101, 569-570.

II Empfehlungen für die Alters- und Geschlechtsdiagnose am Skelett (1979). Homo 30 (2).

III Empfehlungen für die forensische Geschlechts- und Altersdiagnose am Skelett (2005). Anthropologischer Anzeiger 63, 221-232.

IV ftp://cdiac.ornl.gov/pub/trends/co2/vermunt.c14 (^{14}C-Daten für Vermunt)

V ftp://cdiac.ornl.gov/pub/trends/co2/schauinsland.c14 (^{14}C-Daten für Schauinsland)

VI ftp://cdiac.ornl.gov/pub/ndp057/ndp057.pdf (^{14}C-Daten für Norwegen)

VII http://cdiac.esd.ornl.gov/ (Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) des Oak Ridge National Laboratory in Oak Ridge, Tennessee, zum US-amerikanischen Energie-Ministerium gehörend, ^{14}C-Daten aus Europa stehen über diesen Server zur Verfügung)

VIII http://v8doc.sas./sashtml (SAS-Online Hilfe für Version 8)

IX http://www.c14dating.com (web-info radiocarbon)

X http://www.iscd.org/Visitors/official.cmf (Offical Positions in Bone Mineral Density Testing. International Society for Clinical Densiometry, ISCD):

XI International Committee for Radiation Protection ICRP-23 (1975).

XII Journal of Clinical Densiometry 7 (2004). Official Position of the International Sciety for Clinical Densiometry. 1-5.

XIII Pschyrembel. Klinisches Wörterbuch (2002). 259. Auflage. Stichwort: Kohlenstoff-14. Walter de Gruyter. Berlin, New York. 877.

XIV Radiocarbon 28 2A und 2B (1986) Proceedings of the 12th International Radiocarbon Conference.

XV Radiocarbon 38 (1996) Proceedings of the 7th International AMS Conference.

1. Alciati G, Drusini AG, Di Bacco M, Pezzulli S (1994) Age at death determination by means of femoral frequency of secondary osteons. International Journal of Anthropology 9, 329-337.
2. Acsádi G, Nemeskéri J (1970) History of human life span and mortality. Budapest.
3. Ahlborg HG, Johnell O, Turner CH, Rannevik G, Karlsson MK (2003) Bone Loss and Bone Size after Menopause. New England Journal of Medicine 349, 327-334.
4. Akkus O, Polyakova-Akkus A, Adar F, Schaffler MB (2003) Aging of Microstructural Compartments in Human Compact Bone. Journal of Bone and Mineral Research 18 (6), 1012-1019.
5. Alberius P, Friede H (1992) Skull Growth. In Hall BK (ed) Bone. Vol 6 Bone Growth - A. CRC Press Boca Raton, Ann Arbor, London, chap 5, 129-155.
6. Aloia JF, Vaswani A, Feuerman M, Mikhail M, Ma R (2000) Differences in skeletal and muscle mass with aging in black and white women. American Journal of Physiological Endocrinology and Metabolism 278, E1153-E1157.
7. Ambrose SH (1990) Preparation and Characterization of Bone and Tooth Collagen for Isotopic Analysis. Journal of Archaeological Science 17, 431-451.
8. Amprino R, Bairati A (1936) Processi di Ricostruzione e di Riassorbimento nella Sostanza Compatta delle Ossa dell Uomo. Richerche su Cento Soggetti dalla Nascita Sino a Tarda Eta. Zeitschrift für Zellforschung und Mikroskopische Anatomie 24, 439-511.
9. Anderson JJB (2000) The important role of physical activity in skeletal development: how exercise may counter low calcium intake. American Journal of Clinical Nutrition 71, 1384-1386.
10. Anderson M, Green WT (1948) Lengths of the femur and the tibia. American Journal of Diseases of

Children 75, 279-290
11. Audi L, Garcia-Ramirez M, Carrascosa A (1999) Genetic determinants of bone mass. Hormon Research 51, 105-23.
12. Baker P T, Newman R W (1957) The use of bone weight for human identification. American Journal of Physical Anthropology 15, 601-618.
13. Bass S, Delmas PD, Pearce G, Hendrich E, Tabensky A, Seeman E (1999) The differing tempo of growth in bone size, mass, and density in girls is region-spezific. Journal of Clinical Investigation, 104 (6), 795-804.
14. Bass WM (1984) Time Interval Since Death a Difficult Decision. In Rathburn TA, Buikstra JE (eds) Human Identification, Case Studies in Forensic Anthropology, Charles C Thomas Publisher Springfield Illinois, U.S.A., 136-147.
15. Bailey DA, Martin AD, McKay HA, Whiting S, Mirwald R (2000) Calcium Accretion in girls and boys during puberty: A longitudinal analysis. Journal of Bone and Mineral Research 15, 2245-2250.
16. Beavan-Athfield N, Sparks RJ (2001) Bomb carbon as a tracer of dietary carbon sources in omnivorous mammals. Radiocarbon 43, 711-721.
17. Beavan-Athfield N, McFadgen BG, Sparks RJ (2001) Environmental influences on dietary carbon and ^{14}C ages in modern rats and other species. Radiocarbon 43, 7-14.
18. Berger R, Libby WF (1966) UCLA Radiocarbon Dates V. Radiocarbon 8, 467-497.
19. Berger R, Libby WF (1967) UCLA Radicarbon Dates VI. Radiocarbon 9, 477-504.
20. Berger R, Horney AG, Libby WF (1964) Radiocarbon Dating of Bone and Shell from Their Organic Components. Science 144, 999-1001.
21. Berger R, Fergusson GJ, Libby WF (1965) UCLA Radiocarbon Dates IV. Radiocarbon 7, 336-371.
22. Bertram EA, Swarz SM (1991) The ‚Law of bone transformation': A case of crying Wolff? Biological Revue, 245-273.
23. Biasutti R (1959) Le razze e i popoli della terra. 3. edition, Vol 1-4. Unione Tipografico-Editrice Torinese.
24. Birkenhäger-Frenkel DH, Nigg AL, Hens CJJ, Birkhäger JC (1993) Changes of interstitial bone thickness with age in men and women. Bone 14, 211-216.
25. Bodzsár EB, Susanne C (1998) Secular growth changes in Europe: Do we observe similar trends? Considerations for furture research. In Bodzsár EB, Susanne C (eds) Secular growth changes in Europe. Eötvös University Press, Budapest Hungary, 369-381.
26. Bogin B (1988) Patterns of human growth. Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney.
27. Bouvier M, Ubelaker DH (1977) A comparison of two methods for the microscopic determination of age at death. American Journal of Physical Anthropology 46, 391-394.
28. Bowman S (1990) Radiocarbon Dating. Interpreting the past series 1. University of California Press / British Museum.
29. Boyle WJ, Simonet WS, Lacey DL (2003) Osteoclast differentiation and activation. Review. Nature 423, 337-342.
30. Broecker WS, Olson EA (1960) Radiocarbon from Nuclear Tests, II. Science 132, 712-721.
31. Broecker WS, Schulert A, Olson EA (1959) Bomb carbon-14 in human beings. Science 130, 331-332.
32. Broman GE, Trotter M, Peterson RR (1958) The density of selected bones of the human skeleton. American Journal of Physical Antropology 16, 197-211.
33. Bryant FJ, Loutit JF (1961) Human Bone Metabolism deduced from Strontium assays. Atomic Energy Research Establishment, AERE – R 3718. Harwell, Berkshire.
34. Bryant RJ, Wastney ME, Martin BR, Wood O, McCabe GP, Morshidi M, Smith DL, Peacock M, Weaver CM (2003) Racial Differences in Bone Turnover and Calcium Metabolism in Adolescent Females. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 88, 1043-1047.
35. Bumsted MP (1985) Past human behavior from bone chemical analysis – respects and prospects. Journal of Human Evolution 14, 539-551.
36. Burr DB (1993) Remodeling and the repair of fatigue damage. Calcified Tissue International 53 Suppl 1, S75-S81.
37. Burr DB (2004) Anatomy and physiology of the mineralized tissues: role in the pathogenesis of osteoarthrosis. Review. Osteoarthritis and Cartilage 12 Suppl A, S20-S30.
38. Burr DB, Martin RB (1989) Errors in bone remodeling. Towards a unified theory of metabolic bone disease. American Journal of Anatomie 186, 1-31.

39. Burr DB, Martin RB (1993) Calculating the probability that microcracks initiate resorption spaces. Journal of Biomechanics 26, 613-616.
40. Burr DB, Martin RB, Schaffler MB (1984) Why osteons? American Journal of Physical Anthropology 63, 142.
41. Burr DB, Martin RB, Schaffler MB, Radin EL (1985) Bone remodeling in response to in vivo fatigue microdamage. Journal of Biomechanics 18, 189-200.
42. Burr DB, Schaffler MB, Yang KH, Lukoschek M, Sivaneri N, Blaha JD, Radin EL (1989) Skeletal change in response to altered strain environments. Is woven bone a response to elevated strain? Bone 10, 223-233.
43. Burr DB, Ruff CB, Thompson DD (1990) Patterns of Skeletal Histologic Change Through Time: Comparison of an Archaic Native American Population With Modern Populations. Anatomical Record 226, 307-313.
44. Carlson DS, Armelagos GJ, Van Gerven DP (1976) Patterns of Age-Related Cortical Bone Loss (Osteoporosis) Within the Femoral Diaphysis. Human Biology 48 (2), 295-314.
45. Castanet J, Francillon-Vieillot H, Meunier FJ, Ricqlès A de (1993) Bone and Individual Aging. In Hall BK (ed) Bone. Vol 7 Bone Growth - B. CRC Press Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, chap 9, 245-284.
46. Chisholm BS (1989) Variation in diet reconstructions based on stable carbon isotopic evidence. In Price TD (ed) The chemistry of prehistoric human bone. A School of American research book. Cambridge University Press. Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, 10-37.
47. Chow JW M, Badve S, Chambers TJ (1993) A comparison of microanatomic basis for coupling between bone formation and bone resorption in man and the rat. Bone 14, 355-360.
48. Christian JC, Yu P-L, Slemenda CW, Johnston CC (1989) Heritability of Bone Mass: A Longitudinal Study in Aging Male Twins. American Journal of Human Genetics 44, 429-433.
49. Christiansen C, Rödbro P (1975) Bone Mineral Content and Estimated Todal Body Cacium in Normal Adults. Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation 35, 433-439.
50. Christiansen C, Rödbro P, Jensen H (1975a) Bone Mineral Content in the Forearm Measured by Photon Absorptiometry. Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation 35, 323-330.
51. Christiansen C, Rödbro P, Thöger Nielsen C (1975b) Bone Mineral Contetn and Estimated Total Body Calcium in Mormal Children and Adolescents. Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation 35, 507-510.
52. Cohn SH, Ellis KJ (1975) Predicting Radial Bone Mineral Content in Normal Subjects. International Journal of Nuclear Medicine and Biology 2, 53-57.
53. Cohn SH, Vaswani A, Zanzi I, Ellis KJ (1976a) The effect of aging on bone mass in adult women. American Journal of Physiology 230, 143-148.
54. Cohn SH. Vaswani A, Zanzi I, Aloia JF, Roginsky MS, Ellis KJ (1976b) Changes in Body Chemical Composition With Age Measured by Total-Body Neutron Activation. Metabolism 25 (1), 85-96.
55. Cohn SH, Abesamis C, Zanzi I, Aloia JF, Yasumura S, Ellis KJ (1977) Body elemental composition: comparison between black and white adults. American Journal of Physiology 232, E419-E422.
56. Comar CL, Russel L, Wasserman RH (1957) Strontium-calcium movement from soil to man. Science 126, 485-492.
57. Comar CL (1967) Some principles of Strontium metabolism: Implications, Applications, Limitations. In Lenihan JM, Loutit JF, Martin JH (eds) Strontium Metabolism. Proceedings of the International Symposium on some aspects of Strontium Metabolism 1966. Academic Press, London, New York,17-31.
58. Compston J (2004) Bone Histomorphometry – The Renaissance? BoneKEy-Osteovision 1 (5), 9-12. (http://www.bonekey-ibms.org/cgi/content/full/ibmske;1/5/9).
59. Coon CS (1965) The living races of man. Alfred A Knopf, New York.
60. Cowin SC (1988) Bone mechanics. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.
61. Creer KM (1988) Geomagnetic Field and Radiocarbon Activity through Holocene Time. In Stephenson FR, Wolfendale AW (eds) Secular Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 381-397.
62. Damon PE (1982) Fluctuation of Atmospheric Radiocarbon and the Radiocarbon Time Scale. In Currie LA (ed) Nuclear and Chemical Dating Techniques. Interpreting the Environmental Record. American Chemical Society ACS Symposium Series 176, Washington DC, 233-244.

63. Damon PE (1988) Production and Decay of Radiocarbon and its Modulation by Geomagnetic Field-Solar Activity changes with Possible Implications for Global Environment. In Stephenson FR, Wolfendale AW (eds) Secular Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 267-285.
64. Danielmeyer A (1994) Binnenstruktur der Femurkompakta bei mittelalterlichen Skelettfunden. Diplomarbeit, Institut für Anthropologie, Georg-August-Universität Göttingen.
65. Das SK, Harris RS (1970a) Fatty Acids in the Tooth Lipids of 16 Animal Species. Journal of Dental Research 49, 119-125.
66. Das SK, Harris RS (1970b) Lipids and Fatty Acids in Fossil Teeth. Journal of Dental Research 49, 126-130.
67. Dehos R, Schmier H, Eder M (1984) Strontium-90 content in human bone of West Germany residents. IRPA, Proceedings Vol 1, 337-340.
68. DeVries HL (1958) Variation in concentration of Radiocarbon with time and location on earth. Proceedings of the Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Serie B, 1958/61, 1, 94-102.
69. Dodds RA Emery RJH, Klenerman L, Chayen J, Bitensky L (1989) Comparative Metabolic Enzymatic Activity in Trabecular against Cortical Osteoblasts. Bone 10, 251-254.
70. Druffel EM, Mok HYI (1983) Time history of human gallstones: Application of the post-bomb radiocarbon signal. Radiocarbon 25, 629-636.
71. Duan Y, Turner CH, Kim BT, Seeman E (2001a) Sexual dimorphism in vertebral fragility is more the result of gender differences in age-related bone gain than in bone loss. Journal of Bone and Mineral Research 16, 2276-2283.
72. Duan Y, Seeman E, Turner CH (2001b) The biochemical basis of vertebral body fragility in men and women. Journal of Bone and Mineral Research 16, 2267-2275.
73. Ducy P, Amling M, Takeda S, Priemel M, Schilling AF, Beil FT, Shen J, Vinson C, Rueger JM, Karsenty G (2000a) Leptin inhibits bone formation through a hypothalamic relay: a central control of bone mass. Cell 100, 197-207.
74. Ducy P, Schinke T, Karsenty G (2000b) The Osteoblast: A Sophisticated Fibroblast under Central Surveillance. Review. Science 289, 1501-1504.
75. Dvornyk V, Liu XH, Shen H, Lei SF, Zhao LJ, Huang QR, Qin YJ, Jiang DK, Long JR, Zhang YY, Gong G, Recker RR, Deng HW (2003) Differentiation of Caucasians and Chinese at Bone Mass Candidate Genes: Implication for Ethic Difference of Bone Mass. Annals of Human Genetics 67, 216-227.
76. Eckelmann WR, Kulp JL, Schulert AR (1958) Strontium-90 in Man, II. Science 127, 266-274.
77. Elefteriou F, Takeda S, Ebihara K, Magre J, Patano N, Ae KC, Ogawa Y, Liu X, Ware SM, Craigen, WJ, Robert JJ, Vinson C, Nakao K, Capeau J, Karsenty G (2004) Serum leptin level is a regulator of bone mass. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 101, 3258-3263.
78. Ellis KJ (1990) Reference Man and Woman More Fully Characterized. Biological Trace Element Research 26-27, 385-400
79. Eickstedt E von (1934) Rassenkunde und Rassengeschichte der Menschheit. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
80. Enlow DH (1963) Principles of Bone Remodeling. Charles C Thomas Publisher, Springfield Illinois, U.S.A..
81. Enlow DH (1976) The Remodeling of Bone. Yearbook of Physical Anthropology 20, 19-34.
82. Eveleth PB, Tanner JM (1990) Worldwide Variation in Human Growth. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney, 2nd edition.
83. Flanagan B, Nichols G jr (1965) Metabolic Studies of Human Bone In Vitro. I Normal Bone. Journal of Clinical Investigation 44, 1788-1794.
84. Fletcher W, Loutit JF Papworth DG (1966) Interpretation of Levels of Strontium-90 in Human Bone. British Medical Journal 2, 1225-1230.
85. Flügel B, Greil H, Sommer K (1986) Anthropologischer Atlas. Grundlagen und Daten Deutsche Demokratische Republik. 1. Auflage, Verlag Tribüne, Berlin.
86. Fochler-Hauke G (1972) Der Fischer Weltalmanach 1972. Fischer Taschenbuch Verlag.
87. Foldes AJ, Brodsky J, Bentur N (2003) Long-term effects of poor environmental conditions during early life: increased prevalence of hip fractures among holocaust survivors. Journal of Bone and Mineral Research 18 Suppl 2, Abstract, S535.

88. Forbes GB (1987) Human Body Composition. Growth, Aging, Nutrition, and Activity. Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo.
89. Forbes GB, McGoord A (1969) Long-term behavior of Radiosodium in bone: Comparison with Radiosodium and effects of various procedures. Calcified Tissue Research 4, 113-128.
90. Frost HM (1963) Bone remodelling dynamics. Charles C Thomas, Springfield Illinois,U.S.A..
91. Frost HM (1964) The Laws of Bone Structure. Charles C Thomas, Springfield Illinois,U.S.A..
92. Frost HM (1969) Tetracycline-based histological analysis of bone remodeling. Calcified Tissue Research 3, 211-237.
93. Frost HM (1979) A Chondral Modeling Theory. Calcified Tissue International 28, 181-200.
94. Frost HM (1982) Mechanical Determinants of Bone Modeling. Metabolic Bone Diseases and Related Research 4, 217-229.
95. Frost HM (1983a) A determinant of bone architecture. The minimum effective strain. Clinical Orthopaedics and Related Research 175, 286-292.
96. Frost HM (1983b) The Skeletal Intermediary Organization. Metababolic Bone Diseases and Related Research 4, 281-290.
97. Frost HM (1985) The skeletal intermediary organization: A synthesis. In Peck WA (ed) Bone and Mineral Research 3. Elsevier, Amsterdam, New York, Oxford, chap 3, 49-107.
98. Frost HM (1986) Intermediary Organization of the Skeleton. Vol 1. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.
99. Frost HM (1987a) The mechanostat: A proposed pathogenic mechanism of osteoporoses and the bone mass effects of mechanical and nonmechanical agents. Bone and Mineral 2, 73-85.
100. Frost HM (1987b) Bone „Mass“ and the „Mechanostat“: A Proposal. Anatomical Record 219, 1-9.
101. Frost HM (1987c) Secondary osteon populations: An algorithm for determining mean bone tissue age. Yearbook of Physical Anthropology 30, 221-238.
102. Frost HM (1987d) Secondary osteon population densities: An algorithm for estimating the missing osteons. Yearbook of Physical Anthropology 30, 239-254.
103. Frost HM (1990a) Skeletal Structural Adaptations to Mechanical Usage (SATMU): 3. The Hyaline Cartilage Modeling Problem. Anatomical Record 226, 423-432.
104. Frost HM (1990b) Skeletal Structural Adaptations to Mechanical Usage (SATMU): 4. Mechanical Influences on Intact Fibrous Tissues. Anatomical Record 226, 433-439.
105. Frost HM (1990c) Skeletal Structural Adaptations to Mechanical Usage (SATMU: 1. Redefining Wolff´s Law: The Bone Modeling Problem. Anatomical Record 226, 403-413.
106. Frost HM (1990d) Skeletal Structural Adaptations to Mecahnical Usage (SATMU): 2. Redefining Wolff´s Law: The Remodeling Problem. Anatomical Record 226, 423-432.
107. Frost HM (1997) Obesity, and Bone Strength and „Mass“: A Tutorial Based on Insight From a New Paradigm. Bone 21 (3), 211-214.
108. Frost HM (1998) From Wolff's Law to the mechanostat: A new „face“ of physiology. Journal of Orthopaedic Sciences 3, 282-286.
109. Frost HM (2000) Letters to the Editor: Toward a mathematical description of bone biology: the principles of cellular accommodation (siehe Turner CH 1999 und 2000). Calcified Tissue International 67, 184-185.
110. Frost HM (2001) From Wolff's Law to the Utah Paradigm: Insight About Bone Physiology and Its Clinical Application. Invited Review. Anatomical Record 262, 398-419.
111. Frost HM (2003) Bone's mechanostat: a 2003 update. Anatomical Record 275 A (2), 1081-1101.
112. Gallagher JA (1991) Bone remodeling, Human. In Encyclopedia of Human Biology, Vol 1. Academic Press, Inc., 811-824.
113. Garn SM (1970) The earlier gain and the later loss of cortical bone, in nutritional perspective. Charles C Thomas Publisher, Springfield Illinois, U.S.A..
114. Garn SM (1972) The Course of Bone Gain and the Phases of Bone Loss. Orthopedic Clinics of North America 3, 503-520.
115. Garn SM, Wagner B (1969) The Adolescent Growth of the Skeletal Mass and its Implications to Mineral Requirements. In Heald FP (ed) Adolescent Nutrition and Growth. Butterworths, London, chap 11, 139-161.
116. Garn SM, Shaw HA (1976) Extending the Trotter Model of Bone Gain and Bone Loss. Yearbook of Physical Anthropology 20, 45-56.

117. Garn SM, Poznanski AK (1987) Early Attainment of Sex and Race Differences in Skeletal Mass. Letter to the Editor. American Journal of Diseases of Children 141, 1251-1252.
118. Garn SM, Rohmann CG, Nolan P jr (1964a) The Developmental nature of bone changes during aging. In Birren JE (ed) Relations of development and aging. Charles C Thomas Publisher, Springfield Illinois U.S.A., chap 4, 41-61.
119. Garn SM, Pao EM, Rihl ME (1964b) Compact Bone in Chinese and Japanese. Science 143, 1439-1440.
120. Garn SM, Nagy JM, Sandusky ST (1972) Differential Sexual Dimorphism in Bone Diameters of Subjects of European and African Ancestry. American Journal of Physical Anthropology 37, 127-130.
121. Garn SM, Poznanski A K, Larson K (1976) Metacarpal lengths, cortical diameters and areas from the 10-state nutrition survey. In Jaworski CFG (ed) Proceedings of the first workshop of Bone Morphometry. University of Ottawa Press, Ottawa, 367-391.
122. Garrow JS, Fletcher K (1964) The total weight of mineral in the human infant. British Journal of Nutrition 18, 409-412.
123. Garrow JS, Fletcher K, Halliday D (1965) Body composition in severe infantile malnutrition. Journal of Clinical Investigation 44, 417-425.
124. Geyh MA (1983) Physikalische und Chemische Datierungsmethoden in der Quartär-Forschung. Clausthaler Tektonische Hefte 19, Verlag Ellen Pilger, Clausthal-Zellerfeld.
125. Geyh MA (1993) 14C-Kurve der Atmosphäre, Inputfunktion. (Schriftliche Mitteilung).
126. Geyh MA (2001) Bomb Radiocarbon Dating of Animal Tissues and Hair. Radiocarbon 43 2B, 723-730.
127. Geyh MA, Guhlich E (1970) Zur Frage der Zuverlässigkeit der 14C-Altersbestimmung an Knochen. Nachrichten aus Niedersachsens Urgeschichte 39, 9-16.
128. Geyh MA, Schleicher H (1990) Absolute Age Determination, Physical and Chemical Dating Methods and Their Application. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
129. Godwin H (1962) Half-life of Radiocarbon. Nature 195, 984.
130. Greenland S, Pearl J, Robins JM (1999) Causal Diagrams for Epidemiologic Research. Epidemiology, 37-48.
131. Greulich WW, Pyle SI (1959) Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist. Stanford University Press, Stanford.
132. Grupe G (1986) Multielementanalyse: Ein neuer Weg für die Paläodemographie. Materialien zur Bevölkerungswissenschaft, Sonderheft 7. Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung, Wiesbaden.
133. Gustavsson AH, Nyquist F, Karlsson C, Olsson T, Nordström P, Karlsson MK (2003) High peak bone mass associated with physical activity may result in fewer fragility in elderly men. Journal of Bone and Mineral Research 18 Suppl 2, Abstract, S85.
134. Haberland M, Schilling AF, Rueger JM, Amling M (2001) Brain and Bone: Central Regulation of Bone Mass. The Journal of Bone and Joint Surgery 83-A (12), 1871-1875.
135. Hall RL (ed 1982) Sexual Dimorphism in Homo Sapiens. A Question of Size. Praeger Special Studies, Praeger Scientific. Praeger, New York.
136. Hamill PVV, Hohnston FE, Lemeshow S (1973) Body weight, stature and sitting height: White and Negro youth 12-17 years. DHEW Publications No. (HRA) 74-1608. Vital and health statistics series 11 No. (Rockville, MD: U.S. Department of Health, Education, and Welfare.) 126ff.
137. Hamrick MW (2004) Leptin, bone mass, and the thrifty phenotyp. Journal of Bone and Mineral Research 19, 1607-1611.
138. Hansen MA, Overgaard K, Riis BJ, Christiansen C (1991) Role of peak bone mass and bone loss in postmenopausal osteoporosis: 12 year study. British Medical Journal 303, 961-964.
139. Harada S, Rodan GA (2003) Control of osteoblast function and regulation of bone mass. Review. Nature 423, 349-355.
140. Harkness DD, Walton A (1969) Carbon-14 in the biosphere and humans. Nature 223, 1216-1218.
141. Harkness DD, Walton A (1972) Further investigations of the transfer of bomb 14C to man. Nature 240, 302-303.
142. Harris WH (1960) A Microscopic Method of dertermining Rates of Bone Growth. Nature 188, 1038-1039.
143. Heaney RP (1983) Determinants of age-related bone loss. In Frame B, Potts JT jr (eds) Clinical Disorders of Bone and Mineral Metabolism. Excerpta Medica. Amsterdam, Oxford, Princeton, 333-336.

144. Hedges REM, Wallace CJA (1980) The survival of protein in bone. In Hare PE, Hoering TC, King K (eds) Biogeochemistry of Amino Acid. John Wiley and Sons, New York, 35-41.
145. Heikel HVA (1960) On ossification and growth of certain bones of the rabbit; with a comparison of the skeletal age in the rabbit and in man. Acta Orthopaedica Scandinavica 29, 171-184.
146. Helms JA, Schneider RA (2003) Cranial skeletal biology. Review. Nature 423, 326-331.
147. Henderson J (1987) Factors determining the state of preservation of human remains. In Boddington A, Garland AN, Janaway RC (eds) Death, decay and reconstruction. Approaches to archaeology and forensic science. Manchester University Press, chap 5, 43-54.
148. Henry YM, Eagleton AC, Fatayerji D, Eastell R (2001) Effect of puberty, ageing, and gender on serum n-terminal propeptide of type I procollagen (PINP) and c-terminal telopeptide of type I collagen (S-CTX). Bone 28 Suppl 5, Abstract.
149. Herrmann B, Newesely H (1982) Dekompositionsvorgänge des Knochens unter langer Liegezeit. 1. Die mineralische Phase. Anthropologischer Anzeiger 40, 19-31.
150. Hill PA, Orth M (1998) Bone Remodeling. British Journal of Orthodontics 25, 101-107.
151. Hochberg MC, Lethbridge-Cejku M, Plato CC, Wigley FM, Tobin JD (1991) Factors Associated with Osteoarthritis of the Hand in Males: Data from the Baltimore Longitudinal Study of Aging. American Journal of Epidemiology 134, 1121-1127.
152. Hochberg MC, Lethbridge-Cejku M, Scott WW jr, Plato CC, Tobin JD (1994) Appendicular Bone Mass and Osteoarthritis of the Hands in Women: Data form the Baltimore Longitudinal Study of Aging. Journal of Rheumatology 21, 1532-1536.
153. Hui SL, Dimeglio LA, Longcope C, Peacock M, McClintock R, Perkins AJ, Johnston CC jr (2003) Difference in Bone Mass between Black and White American Children: Attributable to Body Build, Sex Hormone Levels, or Bone Turnover? Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 88, 642-649.
154. Ingalls NW (1931) Observations on bone weights. American Journal of Anatomy 48, 45-98.
155. Ives R, Brickley MB (2004) A procedural guide to metacarpal radiogrammetry in Archaeology. International Journal of Osteoarchaeology 14, 7-17.
156. Jantz LM, Jantz RL (1999) Secular change in long bone length and proportion in the United States, 1800-1970. American Journal of Physical Anthropology 110, 57-67.
157. Jantz RL, Hunt DR, Meadows L (1994) Meximum length of the tibia: How did Trotter measure it. Notes and Comments. American Journal of Physical Anthropology 93, 525-528.
158. Jaworski ZFG (1984) Lamellar Bone Turnover System and Its Effector Organ. Calcified Tissue International 36 (Suppl), S46-S55.
159. Jaworski ZF, Meunier P, Frost HM (1972) Observation on Two Types of Resorption Cavities in Human Lamellar Cortical Bone. Clinical Orthopaedics and Related Research 83, 279-285.
160. Johnston CC jr (1985) Studies on prevention of age-related bone loss. In Peck WA (ed) Bone and mineral research 3. Elsevier, Amsterdam, New York, Oxford, chap 8, 233-257.
161. Jowsey J (1960) Age changes in human bone. Clinical Orthopaedics and Related Research 17, 210-218.
162. Jowsey J (1973) Autoradiography and microscopic studies of bone. In Zipkin I (ed) Biological Mineralization. John Wiley and Sons, New York, 297-333.
163. Jürgens HW (1971) Gruppenunterschiede des menschlichen Wachstums in zeitlicher und örtlicher Hinsicht. Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie 63, 63-75.
164. Juricic M, Bruzek J, Charlet JP, Tillier AM (1994) Dynamique de la croissance du crâne. L´exemple de la population médiévale de ducove (Slovaquie). Application a l'échantillon fossile de Predmosti (Paléolithique Supérieur, République Tchéque). Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris 6, 85-99.
165. Kannus P, Sievänen H, Vuori I (1996) Physical Loading, Exercise, and Bone. Bone 18 Suppl , 1S-3S.
166. Karlsson M, Bass S, Seeman E (2001) The evidence that exercise during growth or adulthood reduces the risk of fragility fractures is weak. Best Practice and Research. Clinical Rheumatology 15, 429-450.
167. Karsenty G (2000) Bone formation and factors affecting this process. Matrix Biology 19, 85-89.
168. Karsenty G (2003) The complexities of skeletal biology. Overview. Nature 423, 316-318.
169. Katzenberg MA (1992) Advances in Stable Isotope Analysis of Prehistoric Bones. In Saunders SR, Katzenberg MA (eds) Skeletal Biology of Past People: Research Methods. Wiley-Liss, Inc., chap 6, 105-119.

170. Kerley ER (1965) The Microscopic Determination of Age in Human Bone. American Journal of Physical Anthropology 23, 149-164.
171. Kerley ER, Ubelaker DH (1978) Revision in the microscopic method of estimating age at death in human cortical bone. American Journal of Physical Anthropology 49, 545-546.
172. Klein L, Wolfe MS (2001) Direct measurement of absolute bone mass of whole bones from men and women, 20 to 90 years of age. Bone 28 Suppl 5, Abstract.
173. Kneissel M (1993) Vergleich von nicht-invasiven und invasiven Methoden zur Erfassung des alters- und geschlechtsabhängigen trabekulären Knochenverlustes an archäologischem Material. Dissertation, Formal- und Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Wien.
174. Knese KH (1979) Stützgewebe und Skelettsystem. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
175. Knizhnikov VA, Marei AN (1967) Strontium metabolism in man. In Lenihan JM, Loutit JF, Martin JH (eds) Strontium Metabolism. Proceedings of the International Symposium on some aspects of Strontium Metabolism 1966. Academic Press, London, New York, 71-82.
176. Knußmann R (1968a) Größen- und Formmerkmale des Körpers. In Becker PE (Hrsg) Humangenetik Bd I/1. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 197-279 .
177. Knußmann R (1968b) Entwicklung, Konstitution, Geschlecht. In Becker PE (Hrsg) Humangenetik Bd I/1. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 280-437 .
178. Knußmann R (1996) Vergleichende Biologie des Menschen. 2. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm.
179. Kobayashi S, Takahashi HE, Ito A, Sait N, Nawata M, Horiuchi H, Ohta H, Ito A, Iorio R, Yamamoto N, Takaoka K (2003) Trabecular minimodeling in human iliac bone. Bone 32, 163-169.
180. Kronenberg HM (2003) Developmental regulation of the growth plate. Review. Nature 423, 332-336.
181. Kulp JL, Schulert AR (1962) Strontium-90 in Man V. Science 136, 619-632.
182. Kulp JL, Eckelmann WR, Schulert AR (1957) Strontium in Man. Science 125, 219-225.
183. Kulp JL, Schulert AR, Hodges EJ (1959) Strontium-90 in Man III. Science 129, 1249-1255.
184. Kulp JL, Schulert AR, Hodges EJ (1960) Strontium-90 in Man IV. Science 132, 448-454.
185. L´Orange R, Zimen KE (1968a) C-14 aus Kernwaffenexplosionen im Carbonat und im Kollagen menschlicher Knochen. Naturwissenschaften 55, 492.
186. L'Orange R, Zimen KE (1968b) C-14 aus Kernwaffenexplosionen. Szintillations-Messungen des Äthanols naturreiner Weine. Naturwissenschaften 55, 35-36.
187. L'Orange R, Zimen KE (1969a) Neue Bestimmung der biologischen Halbwertzeit von C-14 in Menschenknochen bei Aufnahme von Kohlenstoff in organisch gebundener Form. In Jacobi W (ed) Strahlenschutzprobleme bei der Freisetzung und Inkorporation radioaktiver Stoffe. 289-297.
188. L'Orange R, Zimen KE (1969b) Zeitliche Verteilung (1952-1967) des bei Kernwaffenversuchen entstandenen C-14. Radiochimica Acta 11, 145-149.
189. Langham WH, Anderson EC (1957) Strontium-90 and Skeletal Formation. Science 126, 205-206.
190. Lazenby RA (2002) Prediction of Cross-Sectional Geometry From Metacarpal Radiogrammetry: A Validation Study. American Journal of Human Biology 14, 74-80.
191. Lenihan JMA (1967) Studies in Strontium Metabolism. I: Correlation of Strontium-90 Levels in Foetal Bone and Maternal Diet. In Lenihan JM, Loutit JF, Martin JH (eds) Strontium Metabolism. Proceedings of the International Symposium on some aspects of Strontium Metabolism 1966. Academic Press. London, New York, 57-61.
192. Lenihan JMA, Loutit JF, Martin JH (1967, eds) Strontium Metabolism. Proceedings of the International Symposium on Some Aspects of Strontium Metabolism held at Chapelcross, Glasgow and Strontian, 5-7 May, 1966. Academic Press. London, New York.
193. Levin I, Kromer B (1997) Twenty years of atmospheric $^{14}CO_2$ observations at Schauinsland station, Germany. Radiocarbon 39, 205-218.
194. Levin I, Hesshaimer (2000) Radiocarbon – A unique tracer of global carbon cycle dynamics. Radiocarbon 42, 69-80.
195. Levin I, Kromer B, Schoch-Fischer H, Bruns M, Münnich M, Berdau D, Vogel JC, Münnich KO (1985) 25 Years of Tropospheric 14C Observations in Central Europe. Radiocarbon 27, 1-19.
196. Levin I, Graul R, Trivett NBA (1995) Long-term Observations of Atmospheric CO_2 and Carbon Isotopes at Continental Sites in Germany. Tellus 47B, 23-34.
197. Libby WF (1952) Radiocarbon Dating. The University of Chicago Press.
198. Libby WF (1969) Altersbestimmung mit der C14-Methode. Hochschultaschenbücher-Verlag, Bibliographisches Institut, Mannheim, Zürich.

199. Libby WF, Anderson EC, Arnold JR (1949) Age determination by Radiocarbon content: World-wide assay of natural Radiocarbon. Science 9, 227-228
200. Libby WF, Berger R, Mead JF, Alexander GV, Ross JF (1964) Replacement rates for human tissue from atmospheric radiocarbon. Science 146, 1170-1172.
201. Lieberman DE (1996) How and why humans grow thin skulls: experimental evidence for systemic cortical robusticity. America Journal of Physical Anthropology 101, 217-236.
202. Lindskoug BA (1992) The Reference Man in diagnostic radiology dosimetry. The British Journal of Radiology 65, 431-437.
203. Lohmann H (1962) Untersuchungen über die praktische Anwendbarkeit von Altersbestimmungs-Methoden an menschlichen Knochen. Inauguraldissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Medizin, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen.
204. Long A, Wilson AT, Ernst RD, Gore BH, Hare PE (1989) AMS Radiocarbon Dating of Bones at Arizona. Radiocarbon 31, 231-238.
205. Longin R (1971) New Method of Collagen Extraction for Radiocarbon Dating. Nature 230, 241-242.
206. Loutit JF (1967) Strontium-90 from fallout in human bone. In Lenihan JM, Loutit JF, Martin JH (eds) Strontium Metabolism. Proceedings of the International Symposium on some aspects of Strontium Metabolism, 1966. Academic Press, London, New York, 41-45.
207. Luckey MM, Meier DE, Mandeli JP, DaCosta MC, Hubbard ML, Goldsmith SJ (1989) Radial and Vertebral Bone Density in White and Black Women: Evidence for Racial Differences in Premenopausal Bone Homeostatis. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 69, 762-770.
208. Luke A, Duazo-Arvizu R, Rotimi C (1997) Relation between body mass index and body fat in black population samples from Nigeria, Jamaica, and the United States. American Journal of Epidemiology 135, 620-628.
209. Lux B, Rösing FW (1996) Der Atombombeneffekt auf Radiocarbon – Eine erste objektive Methode zur Schätzung der Liegezeit. Abstract. 75. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin in Zürich, Schweiz, 128.
210. Lynnerup, N, Bentzer NK, Heinemeier J (2005) Radiocarbon dating of human remains in a forensic medical context. Scandinavian Journal of Forensic Science 1, 11-14.
211. Maat GJR (1984) Dating and Rating of Harris'Lines. American Journal of Physical Anthropology 63, 291-299.
212. Maat GJR, Aarents MJ, Nagelkerke NJD (2003) Age Prediction from bone replacement. Barge`s Anthropologica 10, Leiden.
213. Maresh MM (1955) Linear Growth of Long Bones of Extremities from Infancy Through Adolescence. American Journal of Diseases of Children 89, 725-742.
214. Maresh MM (1970) Measurement from Roentgenograms. In McCammon RW (ed) Human growth and development. Charles C Thomas Publisher, Springfield Illinois, U.S.A., Section F, 157-200.
215. Mariani FV, Martin GR (2003) Deciphering skeletal patterning: clues from the limb. Review. Nature 423, 319-325.
216. Martin DL, Armelagos GJ (1979) Morphometrics of Compact Bone: An Example from Sudanese Nubia. American Journal of Physical Anthropology 51, 571-578.
217. Martin DL, Armelagos GJ (1985) Skeletal Remodeling and Mineralization as Indicators of Health: an Example form Prehistoric Sudanese Nubia. Journal of Human Evolution 14, 527-538.
218. Martin R, Saller K (1959) Lehrbuch der Anthropologie. 3. Auflage, Band II, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
219. Martin R, Knußmann (1988) Anthropologie. Band I/1. 4. Auflage des Lehrbuchs der Anthropologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York.
220. Martin RB (1985) The Usefulness of Mathematical Models for Bone Remodeling. Yearbook of Physical Anthropology 28, 227-236.
221. Martin RB, Burr DB (1989) Structure, Function, and Adaption of Compact Bone. Raven Press, New York.
222. Mays S (2000) Age-dependant cortical bone loss in women form the 18^{th} and early 19^{th} century. American Journal of Physical Anthropology 112, 349-361.
223. Mays S (2001) Effects of age and occupation on cortical bone in a group of 18^{th}-19^{th} century British men. American Journal of Physical Anthropology 116, 34-44.
224. Mazess RB (1983) The noninvasive measurement of skeletal mass. In Peck WA (ed) Bone and mineral research 1. Excerpta Medica, Amsterdam, chap 6, 223-279.

225. Mazess RB, Cameron JR (1972) Growth of bone in school children: Comparison of radiographic morphometry and photon absorptiometry. Growth 2, 77-92.
226. McKenney NP, Bennett CE (1994) Issues Regarding Data on Race and Ethnicity: The Census Bureau Experience. Public Health Reports 109, 16-25.
227. McLellan AR, Fraser M, Gallacher SJ, Baxter I, Morrison C (2003) The influence of socioeconomic deprivation on the incidence of fractures and on the uptake of post-fracture osteoporosis assessment by a fracture liaison service. Journal of Bone and Mineral Research 18 Suppl 2, Abstract, S245.
228. Merz AL, Trotter M, Peterson RR (1956) Estimation of skeleton weight in thr living. American Journal of Physical Athropology 14, 589-509.
229. Milch RA, Rall DP, Tobie JE (1957) Bone localization of the tetracyclines. Journal of the National Cancer Institute 19, 87-93.
230. Milne JS (1985) Clinical Effects of Ageing. A longitudinal study. Croom Helm, London, Sydney, Dover New Hampshire, chap 8, 205-231.
231. Minas K, Minas S (2004) Bestimmung der Skelettreife. CRB Papenburg (ISBN 3-00-012614-7).
232. Mitchell HH, Hamilton TS, Steggerda FR, Bean HW (1945) Journal of Biological Chemistry 158, 625-637.
233. Mook WG, Waterbolk HAT (eds, 1985) Radiocarbon Dating. Handbooks for Archaeologists N. 3, European Science Foundation, Strasbourg.
234. Moss-Salentijn L (1992) Long Bone Growth. In Hall BK (ed) Bone. Vol 6 Bone Growth – A. CRC Press Boca Raton, Ann Arbor, London, chap 7, 185-208.
235. Neis P, Paschke M, Pilwat G, Hille R (2001) Liegezeitbestimmung an Knochen mittels Strontium90. In Oehmichen M, Geserick G (Hrsg) Osteologische Identifikation und Altersschätzung. Research in Legal Medicine 26, 19-29.
236. Nelson BK, DeNiro MJ, Schoeninger MJ, DePaolo DJ, Hare PE (1986) Effects of diagnesis on strontium, carbon, nitrogen and oxygen concentration and isotopic composition of bone. Geochimica et Cosmochimica Acta 50, 1941-1949.
237. Nelson DA, Barondess DA (1997) Whole Body Bone, Fat and Lean Mass in Children: Comparison of Three Ethnic Groups. American Journal of Physical Anthropology 103, 157-162.
238. Nelson DA, Feingold M, Bolin F, Parfitt AM (1991) Principal Components Analysis of Regional Bone Density in Black and White Women: Relationship to Body Size and Composition. American Journal of Physical Anthropology 86, 507-514.
239. Nelson DA, Jacobsen G, Barondess DA, Parfitt AM (1995) Ethnic Differences in Regional Bone Density, Hip Axis Length, and Lifestyle Variables among Healthy Black and White Man. Journal of Bone and Mineral Research 10, 782-787.
240. Nelson DA, Simpson PM, Johnson CC, Barondess DA, Kleerekoper M (1997) The Accumulation of Whole Body Skeletal Mass in Third- and Fourth-Grade Children: Effects of Age, Gender, Ethnicity, and Body Composition. Bone 20, 73-78.
241. Niklaus TR, Bonani G, Simonius M, Suter M, Wölfli W (1992) CalibETH: An interactive computer program for the calibration of radiocarbon dates. Radiocarbon 34, 483-492.
242. Nielsen SP (2004) The biological role of strontium. Bone 35, 583-588.
243. Nimni ME (1991) Collagen, structure and function. In Encyclopedia of Human Biology, Vol 2. Academic Press, Inc., chap 3, 559-574.
244. Nydal R, Lövseth K (1965) Distribution of radiocarbon from nuclear tests. Nature 206, 1029-1031.
245. Nydal R, Lövseth K (1996) Carbon-14 measurements in atmospheric CO2 from northern and southern hemisphere sites, 1962-1993. (ftp://cdiac.ornl.gov/pub/ndp057/ndp057.pdf)
246. Nydal R, Lövseth K, Syrstad O (1971) Bomb 14C in the human population. Nature 232, 418-421.
247. Olsson IU (1974) Some Problems in Connection with the Evalutation of 14C Dates. Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 96, 311-320.
248. Olsson IU, El-Daoushy MFAF, Abd-El-Mageed AI, Klasson M (1974) A comparison of different methods for pretreatment of bones I. Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 96, 171-181.
249. Ortner DJ (1975) Aging effects on osteon remodeling. Calcified Tissue Research 18, 27-36.
250. Ortner DJ (1976) Microscopic and Molecular Biology of Human Compact Bone: An Anthropological Perspective. Yearbook of Physical Anthropology 20, 35-44.
251. Pankovitch AM; Simmons DJ, Kulkarni VV (1974) Zonal Osteons in cortical bone. Clinical Orthopaedics and Related Research 100, 356-363.

252. Parfitt AM (1983) Recent Developments in Bone Physiology – Introduction. In Frame B, Potts JT jr (eds) Clinical Disorders of Bone and Mineral Metabolism. Excerpta Medica. Amsterdam, Oxford, Princeton, 171-172.
253. Parfitt AM (1983) The physiologic and clinical significance of bone histomorphometric data. In Recker RR (ed) Bone Hisotmorphometry: Techniques and Interpretation. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 143-223.
254. Parfitt AM (1984) The Cellular Basis of Bone Remodeling: The Quantum concept Reexamined in Light of Recent Advances in the Cell Biology of Bone. Calcified Tissue International (Suppl) 36, S37-S45.
255. Parfitt AM (1991) Bone Density and Fragility, Age-Related Changes. In Encyclopedia of Human Biology, Vol 1. Academic Press, Inc., 771-778.
256. Parfitt AM (1993) Morphometry of bone resorption: Introduction and overview. Bone 14, 435-441.
257. Parfitt AM (1994a) Osteonal and hemi-osteonal remodeling: The spatial and temporal framework for signal traffic in adult human bone. Journal of cellular Biochemistry 55, 273-286.
258. Parfitt AM (1994b) The two faces of growth: Benefits and risks to bone integrity. Osteoporosis International 4, 382-398.
259. Parfitt AM (1995) Problems in the application of in vitro systems to the study of human bone remodeling. Calcified Tissue International 56 Suppl 1, S5-S7.
260. Parfitt AM (1997) Genetic effects on bone mass and turnover-relevance to black/white differences. Journal of the American College of Nutrition 16, 325-333.
261. Parfitt AM (2000) The Mechanism of Coupling: A Role for the Vasculature. Bone 26 (4), 319-323.
262. Parfitt AM, Han ZH, Palnitkar S, Rao DS, Shih MS, Nelson D (1997) Effects of ethnicity and age or menopause on osteoblast function, bone mineralization, and osteoid accumulation in iliac bone. Journal of Bone and Mineral Research 12, 1864-1873.
263. Parfitt AM, Travers R, Rauch F, Glorieux FH (2000) Structural and cellular changes during bone growth in healthy children. Bone 27, 487-494.
264. Perez-Amodio S, Beertsen W, Everts V (2004) (Pre-)osteoclasts induce retraction of osteoblasts before their fusion to osteoclasts. Journal of Bone and Mineral Research 19, 1722-1231.
265. Pirok DJ, Ramser JR, Takahashi H, Villanueva AR, Frost MD (1966) Normal histological, tetracycline and dynamic parmeters in human, mineralized bone sections. Henry Ford Hospital Medicine Bulletin 14, 195-218.
266. Plank LD, Mitra S, Knight GS (2000) A Solution with an Elemental Composition of Reference Man for Calibrating in Vivo Neutron-Activation Analysis Scanners.Annals of New York Academy of Sciences 904. New York Academy of Sciences, 193-195.
267. Polach HA (1975) Radiocarbon Dating as a Research Tool in Archaeology – Hopes and Limitations. In Barnard N (ed) Proceedings of Symposium on Scientific Methods of Research in the Study of Ancient Chinese Bronzes and Southeast Asian Metal and Other Archaeological Artifacts, National Gallery of Victoria, Melbourne, Australia 255-298.
268. Porter AMW (2002) Estimation of body size and physique from hominin skeletal remains. Homo 53, 17-38.
269. Power M (1998) Bone markers: overuse and much abuse. Molecular and Cellular Biology of the Bone 26, 45-47.
270. Price TD, Schoeninger MJ, Armelagos GJ (1985) Bone Chemistry and Past Behavior: An Overview. Journal of Human Evolution 14, 419-447.
271. Puchegger S, Rom W, Steier P (2000) Automated evaluation of ^{14}C AMS measurements. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 172, 274-280.
272. Recker R, Lappe J, Davies KM, Heaney R (2003) Bone Remodeling Increases Substantially in the Years After Menopause and Remains Increased in Older Osteoporosis Patients. Journal of Bone and Mineral Research 19, 1628-1633.
273. Reeve J, Arlot M, Hesp R, Tellez M, Meunier PJ (1983) Tracer measurements of bone remodelling and their significance in involutional osteporosis. In Frame B, Potts JT jr (eds) Clinical Disorders of Bone and Mineral Metabolism. Excerpta Medica. Amsterdam, Oxford, Princeton, 99-104.
274. Reid IR (2002) Relationship among body mass, its components, and bone. Bone 31, 547-555.
275. Rhine JS (1984) Forensic Anthropology in New Mexico. In Rathbun TA, Buikstra JE (eds) Human Identification. Charles C Thomas Publisher, Springfield Illinois, U.S.A., chap 3, 28-41.

276. Riggs BL, Wahner HM, Dunn WL, Mazess RB, Offord KP, Melton III LJ (1981) Differential Changes in Bone Mineral Density of Appendicular and Axial Skeleton with Age. Journal of Clinical Investigation 67, 328-335.
277. Riggs BL, Melton III LJ, Robb RA, Camp JJ, Atkinson EJ, Peterson JM, Rouleau PA, McCollough CH, Bouxsein ML, Sundeep K (2004) Population-Based Study of Age and Sex Differences in Bone Volumetric Density, Size, Geometry, and Structure at Different Skeletal Sites. Journal of Bone and Mineral Research 19, 1945-1954.
278. Ringe JD, Rehpenning W, Kuhlencordt F (1977) Physiologische Änderung des Mineralgehalts von Radius und Ulna in Abhängigkeit von Lebensalter und Geschlecht. Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlung und Nuklearmedizin 126, 376-380.
279. Rivera J (1964) Sr-90 Distribution in Two Human Skeletons. U.S. Atomic Energy Commission, Report HASL-144. Health and Safety Laboratory, New York, 278-280.
280. Rivera J (1967) Predicting Strontium-90 Concentrations in Human Bone. In Lenihan JM, Loutit JF, Martin JH (eds) Strontium Metabolism. Proceedings of the International Symposium on some aspects of Strontium Metabolism 1966. Academic Press. London, New York, 47-55.
281. Rivera J, Harley JH (1965) The HASL Bone Program 1961-1964. U.S. Atomic Energy Commission, Report HASL-163. Health and Safety Laboratory. New York.
282. Robins JM (2001) Data, Design, and Background Knowledge in Etiologic Inference. Epidemiology 11, 313-320.
283. Robling AG, Hinant FM, Burr DB, Turner CH (2002) Shorter, more frequent mechanical loading sessions enhance bone mass. Medicine and Science in Sports and Exercise 34, 196-202.
284. Roche AF (1978) Bone Growth and Maturation. In Falkner F, Tanner J M (eds) Human Growth. Vol 2 Postnatal Growth. Plenum Press, New York, London, chap 12, 317-355.
285. Rodrigues WC, Bass WM (1985) Decomposition of Buried Bodies and Methods That May Aid in Their Location. Journal of Forensic Sciences 30, 836-852.
286. Rösing FW (1988) Körperhöhenrekonstruktion aus Skelettmaßen. In Martin R, Knußmann (Hrsg.) Anthropologie. Band I/1. 4. Auflage des Lehrbuchs der Anthropologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York. Kap. E 4, 586-600.
287. Rösing FW, Winkler EM (1992) Zur Rardigmengeschichte der Taxonomie: von Bernier über von Eickstedt zu Hierneaux. Homo 43, 29-42.
288. Rösing FW, Kvaal SI (1998) Dental age in adults. A review of estimation methods in Dental Anthropology. In Alt KW, Rosin FW, Teschler-Nicola M (eds) Dental Anthropology. Fundamentals, Limits, and Prospects. Springer-Verlag, Wien, 443-468.
289. Rom W, Golser R, Kutschera W, Priller A, Puchegger S, Steier P, Vycudilik W, Wild E (1998) Systematic investigations of 14C AMS measurements and first results of a forensic study in humans. In Heys JR, Melillo DG (eds) Synthesis and Applications of Isotopically Labelled Compounds 1997, Paper 120, 567-570.
290. Rubin C T (1984) Skeletal Strain and the Functional Significance of Bone Architecture. Calcified Tissue International 36 Suppl, S11-S18.
291. Ruff C (1992) Biomechanical Analyses of Archaeological Human Skeletal Samples. In Skeletal Biology of Past Peoples: Research Methods, chap 3, 37-58.
292. Saunders SR, Hoppa RD (1993) Growth Deficit in Survivors and Non-Survivors: Biological Mortality Bias in Subadult Skeletal Samples. Yearbook of Physical Anthropology 36, 127-151.
293. Sauvain-Dugerdil C (1987) The biological diversity of the human populations of Central America. In Schwidetzky I (Hrsg) Rassengeschichte der Menschheit. 12. Lieferung Amerika II: Mittel- und Südamerika. R. Oldenbourg Verlag München, 23-65.
294. Schiebler TH (1996) Histologie. Kapitel 10.4. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
295. Schmeling A, Schulz R, Danner B, Rösing FW (2002) The influence of socio-economic status on ossification. Abstact. Glücksburger Auxologie-Tage. Monatsschrift für Kinderheilkunde 150, 1277.
296. Schmitz HWP (1957) Knochenaltersbestimmung mit Hilfe gerichtlich medizinischer und archäologischer Verfahren, unter besonderer Berücksichtigung der Radiokohlenstoffmethode. Inauguraldissertation zur erlangung des Doktorgrades in der Zahnheilkunde, Philipps-Universität Marburg.
297. Schoeninger MJ (1989) Reconstructing prehistoric human diet. In Price TD (ed) The chemistry of prehistoric human bone. A School of American research book. Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, 38-67.

298. Schönhofer F (1989) Determination of 14C in alcoholic beverages. Radiocarbon 31, 777-784.
299. Schuhmacher A, Knußmann R (1977) Sind die Körperhöhenunterschiede zwischen den sozialen Ständen beim Menschen ein Modifikations- oder ein Siebungseffekt? Homo 28, 235-244.
300. Seale RU (1959) The Weight of the Dry Fat-free Skeleton of American Whites and Negroes. American Journal of Physical Anthropology 17, 37-48.
301. Sealy JC, van der Merwe NJ, Sillen A, Kruger FJ, Krueger HW (1991) 87Sr/86Sr as a Dietary indicator in Modern and Archaeological Bone. Journal of Archaeological Science 18, 399-416.
302. Sedlin E (1964) Uses of bone as a model system in the study of aging. In Frost HM (ed) Bone Biodynamics. Little, Brown and Co., Boston, 655-666.
303. Sedlin ED, Frost H M (1963) Variations in rate of human osteon formation. Canadian Journal of Biochemestry and Physiology 41, 19-22.
304. Sedlin ED, Frost HM, Villanueva AR (1963) Age changes in resorption in human rib cortex. Journal of Gerontology 18, 345-349.
305. Seeman E (1997) From Density to Structure: Growing Up and Growing Old on the Surface of Bone. Journal of Bone and Mineral Research 12, 509-521.
306. Seeman E (1998) Growth in Bone Mass and Size – Are Racial and Gender Differences in Bone Mineral Density More Apparent than Real? Editorial. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 83, 1414-1419.
307. Seeman E (2001a) Sexual Dimorphism in Skeletal Size, Density, and Strength. Clinical Review 137. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 86, 4576-4584.
308. Seeman E (2001b) During aging, men lose less bone than women because they gain more periosteal bone, not because they resorb less endosteal bone. Calcified Tissue International 69, 205-208.
309. Seeman E (2003a) Periosteal Bone Formation – A Neglected Determinant of Bone Strength. New England Journal of Medicine 349 (4), 320- 323.
310. Seeman E (2003b) The structural and biochemical basis of the gain and loss of bone strength in women and men. Review. Endocrinology and Metabolism Clinics of North America 32, 25-32.
311. Seidler H (1986) Zur Variation der Körperhöhe bei 18jährigen Männern in Ostösterreich. Anthropologischer Anzeiger 44, 149-155.
312. Shephard RJ (1991) Body composition in biological anthropology. Cambridge University Press Cambridge, New York.
313. Shih MS, Cook MA, Spence CA, Palnitkar S, McElroy H, Parfitt AM (1993) Relationship between bone formation rate and osteoblast surface on different subdivisions of the endosteal envelope in aging & osteoporosis. Bone 14, 519-521.
314. Shipman P (1981) Life History of a Fossil. An Introduction to Taphonomy and Paleoecology. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England.
315. Simmons DJ (1976) Comparative physiology of bone. In Bourne GH (ed) The biochemistry and physiology of bone. 2. Edition, vol IV. Academic Press New York, San Francisco, London, chap 11, 446-516.
316. Simmons DJ, Grynpas MD (1990) Mechanisms of Bone Formation in vivo. In Hall BK (ed) Bone. Vol 1: The Osteoblast and Osteocyte. The Telford Press, Caldwell, New Jersey, chap 6, 193-302.
317. Smith DM, Nance WE, Kang KW, Christian JC, Johnston CC jr (1973) Genetic Factors in Determining Bone Mass. Journal of Clinical Investigation 52, 2800-2808.
318. Smith DM, Khairi MRA, Norton J jr, Johnston CC jr (1976a) Age and Activity Effects on Rate of Bone Mineral Loss. Journal of Clinical Investigation 58, 716-721.
319. Smith DM; Norton JA, Khair R, Johnston CC jr (1976b) The measurement of rates of mineral loss with aging. Journal of Laboratory and Clinical Medicine 87, 882-892.
320. Smith EL, Hill RL, Lehman IR, Lefkowitz RJ, Handler P, White A (1983) Principles of Biochemistry: Mammalian Biochemistry. Seventh edition. New York: McGraw-Hill Book Company.
321. Solomons NW, Kumanyika (2000) Implications of racial distinction for body composition and its diagnostic assessment. Editorial. American Journal of Clinical Nutrition 71, 1387-1389.
322. Spalding KL, Buchholz BA, Bergman LE, Druid H, Frisen J (2005) Age written in teeth by nuclear tests. Naure 437, 333-334.
323. Specht W, Berg S (1958) Eine neue Technik als naturwissenschaftlicher Beitrag zur Altersbestimmung von Knochenfunden. Archiv für Kriminologie 122, 43-65.
324. Spiers FW (1968) Radioisotopes in the Human Body: Physical and Biological Aspects. Academic Press. New York, London.

325. Stafford TW Jr, Hare Pe, Currie L, Jull AJT, Donahue DJ (1991) Accelerator Radiocarbon Dating at the Molecular Level. Journal of Archaeological Science 18, 35-72.
326. Stenhouse MJ (1979) Further Application of Bomb 14C as a Biological Tracer. In Berger R, Suess HE (eds) Radiocarbon Dating. University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London, chap 4, 342-354
327. Stenhouse MJ, Baxter MS (1976) Glasgow University Radicarbon Measurements VIII. Radiocarbon 18, 161-171.
328. Stenhouse MJ, Baxter MS (1977a) Bomb 14C and human radiation burden. Nature 267, 825-827.
329. Stenhouse MJ, Baxter MS (1977b) Bomb 14C as a biological tracer. Nature 267, 828-832.
330. Stenhouse MJ, Baxter MS (1979) The Uptake of Bomb 14C in Human. In Berger R, Suess HE (eds) Radiocarbon Dating. Proceedings oft the Ninth International Conference in Los Angeles and La Jolla 19761. University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London, chap 3, 324-34
331. Stout SD (1982) The Effects of Long-Term Immobilization on the Histomorphology of Human Cortical Bone. Calcified Tissue International 34, 337-342.
332. Stout SD (1992) Methods of Determining age at Death Using Bone Microstructure. In Skeletal Biology of Past Peoples: Research Methods, chap 2, 21-35.
333. Stout SD, Teitelbaum SL (1976) Histomorphometric Determination of Formation rates of Archeological Bone. Calcified Tissue Research 21, 163-169.
334. Stout SD, Simmons DJ (1979) Use of histology in ancient bone research. Yearbook of Physical Anthropology 22, 228-249.
335. Stout SD, Gehlert SJ (1982) Effects of field size when using Kerley's histological method for determination of age at death. American Journal of Physical Anthropology 58, 123-125.
336. Stout SD, Stanley SC (1991) Percent osteonal bone versus osteon counts: The variable of choice for estimating age at death. American Journal of Physical Anthropology 86, 515-519.
337. Stout SD, Paine RR (1994) Brief communication: Bone remodeling rates: A test of an algorithm for estimatin missing osteons. American Journal of Physical Anthropology 93, 123-129.
338. Stout SD, Lueck R (1995) Bone remodeling rates and skeletal maturation in three archaeological skeletal populations. American Journal of Physical Anthropology 98, 161-171.
339. Stuiver M (1982) A high-precision calibration of the AD Radiocarbon time scale. Radiocarbon 14, 1-26.
340. Stuiver M, Robinson SW (1974) University of Washington Geosecs North Atlantic carbon-14 results: Earth and Planetary Science Letters 23, 87-90.
341. Stuiver M, Polach HA (1977) Discussion. Reporting of 14C Data. Radiocarbon 19, 355-363.
342. Stuiver M, Pearson GW (1986) High-Precision Calibration of the Radiocarbon Time Scale, AD 1950-500 BC. Radiocarbon 28 2B, 805-838.
343. Stuiver M, Becker B (1986) High-Precision Decadal Calibration of the Radiocarbon Time Scale, AD 1950-2500 BC. Radiocarbon 28 2B, 863-909.
344. Stuiver M, Braziunas TF (1993) Sun, Ocean, Climate and Atmospheric $^{14}CO_2$. An evaluation of causal and spectral relationships. Holocene 3,4, 289-305 .
345. Stuiver M, Reimer PJ (1993) Extended ^{14}C data base and revised CALIB3.0 ^{14}C calibration Program. Radiocarbon 35, 215-230.
346. Suess HE (1955) Radiocarbon concentration in modern wood. Science 122, 415-417.
347. Suess HE (1986) Secular Variations of Cosmogenic ^{14}C on Earth: Their Discovery and Interpretation. Radiocarbon 28 2A, 256-265.
348. Susanne C, Bodzsár EB (1998) Patterns of secular change of growth and development. In Bodzsár EB, Susanne C (eds) Secular growth changes in Europe. Eötvös University Press, Budapest Hungary, 5-26.
349. Susanne C, Bodzsar E, Bielicki T, Hauspie R, Hulanicka B, Lepage Y, Rebato E, Vercauteren M (2001) Changements séculaires de la croissance et du développement en Europe. Antropo 0, 71-90 (Online-Version http://www.didac.ehu.es/antropo/0/0-8/susanne.htm).
350. Swift B, Lauder I, Black S, Norris J (2001) An estimation of the post-mortem interval in human skeletal remains: a radiouclide and trace element approach. Forensic Science International 117, 73-87.
351. Tanner JM, Hughes PCR, Whitehouse RH (1981) Radiographically determined widths of bone muscle and fat in the upper arm and calf from age 3-18 years. Annales of Human Biology 8, 495-517.
352. Taylor JF (1992) The Periosteum and Bone Growth. In Hall BK (ed) Bone. Vol 6 Bone Growth – A. CRC Press Boc Raton, Ann Arbor, London, chap 2, 21-52.

353. Taylor RE (1978) Radiocarbon Dating: An Archaeological Perspective. In Carter GF (ed) Archaeological Chemistry II. Advances in Chemistry Series 171. American Chemical Society, Washington DC, 33-69.
354. Taylor RE (1980) Radiocarbon dating of Pleistocene bone: towards criteria for the selection of samples. Radiocarbon 22, 969-979.
355. Taylor RE (1982) Problems in the Radiocarbon Dating of Bone. In Currie LA (ed) Nuclear and Chemical Dating Techniques. Interpreting the Environmental Record. American Chemical Society ACS Symposium Series 176, Washington DC, 453-473.
356. Taylor RE, Suchey JM, Payen LA, Slota PJ (1989) The Use of Radiocarbon (14C) to Identify Human Skeletal Materials of Forensic Science Interest. Journal of Forensic Sciences 34, 1196-1205.
357. Teitelbaum SL (2000) Bone Resorption by Osteoclasts. Review. Science 289, 1504-1508.
358. Thomas KA, Cook SD, Bennett JT, Whitecloud TS, Rice JC (1991) Femoral Neck and Lumbar Spine Bone Mineral Densities in a Normal Population 3-20 Years of Age. Journal of Pediatric Orthopaedics 11, 48-58.
359. Trotter M, Gleser GC (1952) Estimation of stature from long bones of American Whites and Negros. American Journal of Physical Anthropology 10, 463-514.
360. Trotter M, Peterson RR (1955) Ash weight of human skeletons in per cent of their dry, fat-free weight. Anatomical Record 123, 341-358.
361. Trotter M, Peterson RR (1962) The relationship of ash weight and organic weight of human skeletons. Journal of Bone and Joint Surgery 44-A, 669-681.
362. Trotter M, Peterson RR (1969a) Weight of bone in the fetus during the last half of pregnancy. Clinical Orthopaedics and Related Research 65, 46-50.
363. Trotter M, Peterson RR (1969b) Weight of bone during the fetal period. Growth 33, 167-184.
364. Trotter M, Peterson RR (1970) Weight of the skeleton during postnatal development. American Journal of Physical Antropopology 33, 313-324.
365. Trotter M, Hixon BB (1974) Sequential Changes in Weight, Density, and Percentage Ash Weight of Human Skeletons from an Early Fetal Period through Old Age. Anatomical Record 179, 1-18.
366. Trotter M, Browman GE, Peterson RR (1960) Densities of bones of White and Negro skeletons. Journal of Bone and Joint Surgery 42-A, 50-58.
367. Turner CH (1999) Toward a mathematical description of bone biology: the principles of cellular accommodation. Calcified Tissue International 65, 466-471.
368. Turner CH (2000) Reply to Frost (2000), Letters to the Editor. Calcified Tissue International 67, 185-187.
369. Turner CH, Robling AG (2004) Mechanical loading and bone formation. BoneKEy-Osteovision 1 (9), 15-23. (Online-Version http://www.bonekey-ibms.org/cgi/content/full/ibmske;1/9/15)
370. Ubelaker, DH (2001) Artificial Radicarbon as an Indicator of Recent Origin Remains in Forensic Cases. Journal of Forensic Sciences 46, 1285-1287.
371. Uytterschaut HAT (1985) Determination of skeletal age by histological methods. Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie 75, 331-340.
372. Vaughan J (1975) The Physiology of Bone. Strontium. Clarendon Press, Oxford, 110-113.
373. van der Merwe NJ (1982) Carbon Isotopes, Photosynthesis, and Archaeology. American Scientist. 596-606.
374. Verhoff MA, Kreutz K, Ramsthaler F, Schiwy-Bochat KH (2006) Forensische Anthropologie und Osteologie – Übersicht und Definitionen. Deutsches Ärzteblatt 103, B661-B666.
375. Vickery S R, Cureton K J, Collins M A (1988) Prediction of Body Density from Skinfolds in Black and White Young Men. Human Biology 60, 135-149.
376. Vogel JC, van der Merwe NJ (1977) Isotopic evidence for early maize cultivation in New York State. American Antiquity 42, 238-242.
377. Wagner DR, Heyward VH (2000) Measures of body composition in blacks and whites: a comparative review. American Journal of Clinical Nutrition 71, 1392-1402.
378. Wallace JD, Cuneo RC, Lundberg PA, Rosen T, Jørgensen JOL, Longobardi S, Keay N, Sacca L, Christiansen JS, Begtsson BÅ, Sönksen PH (2000) Responses of Markers of Bone and Collagen Turnover to Exercise, Growth Hormone (GH) Administration, and GH Withdrawal in Trained Adult Males. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism 85, 124-133.
379. Wallin JA, Tkocz I, Kristensen G (1994) Microscopic age determination of human skeletons including an unknown but calculable variable. International Journal of Osteoarchaeology 4, 353-362.

380. Walton A, Baxter MS, Callow WJ, Baker MJ (1967) Carbon-14 concentrations in environmental materials and their temporal fluctuations (SM-87/32). In Radioactive Dating and Methods of Low-level Counting IAEA, Wien, 41-47
381. Watson AA (1989) Forensic medicine – a handbook for professionals. Gower, Seldershot, Brookfield USA, Hong Kong, Singapore, Sydney.
382. Wegener OH (1992) Ganzkörpercomputertomographie. 2. Auflage, Blackwell Wissenschaft, Berlin, Kap. 3, 81-99.
383. Wild E, Golser R, Hille P, Kutschera W, Priller A, Puchegger S, Rom W, Steier P (1998) First 14C results from archaeological and forensic studies at the Vienna Environmental Research Accelerator. Radiocarbon 40, 273-281.
384. Wieringen van JC (1979) Secular growth changes. In Falkner F, Tanner J M (eds) Human Growth. Vol 3, Neurobiology and Nutrition. Plenum Press, New York, London, chap 15, 307-331.
385. Wild EM, Arlamovsky KA, Golser R, Kutschera W, Priller A, Puchegger S, Rom W, Steier P, Vycudilik W (2000) ^{14}C dating with the bomb peak: An application to forensic medicine. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 172, 944-950.
386. Willis EH, Tauber H, Münnich KO (1960) Variations in the atmospheric radiocarbon concentration over the past 1900 years. American Journal of Science, Radiocarbon Supl., 2, 1-4.
387. Winkler EM (1983) Volk, Ethnos, Kultur, Population, Typus. Zur Methodik der „ethnischen Deutung“. Mitteilungen der Anthropologischen Gesellschaft Wien 113, 5-14.
388. Winkler EM (1988) Kultur, Ethnos, Rasse – Realität oder Fiktion? In Oeser E, Bonet F (Hrsg.) Das Realismusproblem. Wiener Studien zur Wissenschaftstheorie II, 270-288.
389. Wolff JD (1892) Das Gesetz der Transformation der Knochen. A. Hirschwald, Berlin.
390. Wolfsperger M (1992) Trace element analysis of Medieval and Early Modern skeletal remains from Western Austria for reconstruction of diet. Homo 43, 278-294.
391. Wu K, Schubeck KE, Frost HM, Villanueva A (1970) Haversian bone formation rates determined by a new method in a mastodon, and in human diabetes mellitus and osteoporosis. Calcified Tissue Research 6, 204-219.
392. Zelszer E, Olsen BR (2003) The genetic basis for skeletal diseases. Review. Nature 423, 343-348.
393. Zimen KE (1972/73) The Future CO2 Burden of the Atmosphere and Carbon-14 in the Ethanol from Wines. In Internationl Radiocarbon Dating Conference. Proceedings of the International Radiocarbon Dating Conference. Wellington Newsealand 1972/73, A85-A90
394. Zumkley H, Spieker C (1988) The bioavailability of trace elements and age-specific trace element metabolism. In Grupe G, Herrmann H (eds) Tace Elements in Environmental History. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 145-150.

Universität Ulm
Institut für Humangenetik
Leiter: Prof. Dr. Walther Vogel

Kernwaffen-induziertes Radiocarbon (^{14}C) und die Liegezeitbestimmung von menschlichen Skelettresten

Anhang

Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades der Humanbiologie
(Dr. biol. hum.)
der Medizinischen Fakultät
der Universität Ulm

vorgelegt von
Bettina Danner
aus Rostock

2006

Amtierender Dekan:	Prof. Dr. Klaus-Michael Debatin
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Friedrich Wilhelm Rösing
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. Wilhelm Gaus
Tag der Promotion:	26. Januar 2007

Anhang

Inhaltsverzeichnis

Anhang 1:	^{14}C-Konzentrationen in der Atmosphäre.	A 1
Anhang 2:	Skelettmasse getrennt nach Geschlecht und Rasse.	A 2
Anhang 3:	Knochenmasse einzelner Skelettelemente.	A 3
Anhang 4:	Durchschnittliche Kompakta-Fläche (f_C in mm²) für Männer zwischen 0,5 und 80 Jahre aus 9 Bevölkerungsgruppen Nord- und Lateinamerikas.	A 4
Anhang 5:	Durchschnittliche Kompakta-Fläche (f_C in mm²) für Frauen zwischen 0,5 und 80 Jahre aus 9 Bevölkerungsgruppen Nord- und Lateinamerikas.	A 5
Anhang 6:	Kompaktawachstum für Humerus und Tibia	A 6
Anhang 7:	Berechnung des Korrekturwertes für Männer.	A 7
Anhang 8:	Berechnung des Korrekturwertes für Frauen.	A 8
Anhang 9:	Berechnung des Korrekturwertes für Männer.	A 9
Anhang 10	Berechnung des Korrekturwertes für Männer.	A 10
Anhang 11:	Umbauraten für Knochenkompakta bei Männer und Frauen.	A 11
Anhang 12:	Merkmalsliste für die Asservate.	A 12
Anhang 13:	Anlistung der 99 ^{14}C-Konzentrationen in Kollagen aus Knochen und Knorpel, eigene und Literatur-Daten.	A 14
Anhang 14:	Anlistung der ^{14}C-Konzentrationen in Apatit und Fett aus Knochen, eigene Messwerte und Literatur-Daten.	A 19
Anhang 15:	Anlistung der ^{14}C-Konzentrationen in Kollagen, Apatit und Fett je ID.	A 21
Anhang 16:	Anlistung der ^{14}C-Konzentrationen für Kompakta und Spongiosa in Kollagen und Apatit je ID.	A 22
Anhang 17:	Anlistung der Skelettmassen nach Alter und Geschlecht.	A 23
Anhang 18:	Gegenüberstellung der Skelettmassen für negride Frauen.	A 24
Anhang 19:	Skelettmassen für „White Ohio“.	A 25
Anhang 20:	Prozentuale Entwicklung verschiedener anthropologischer Parameter zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung für Männer zwischen 0 und 40 Jahren (Literaturdaten).	A 26
Anhang 21:	Prozentuale Entwicklung verschiedener anthropologischer Parameter zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung für Frauen zwischen 0 und 40 Jahren (Literaturdaten).	A 27
Anhang 22:	Skelettmassen für Individen von der Geburt bis zur Mitte des dritten Lebensjahrzehnts (Literaturdaten).	A 28
Anhang 23:	Skelettmassen für 24 Altersklassen von 0 bis 22,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Altersklasse (Daten Anhang 22).	A 33
Anhang 24:	Skelettmassen für 24 Altersklassen von 0 bis 22,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 22).	A 35
Anhang 25:	Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 22,5 Jahren (Daten Anhang 22).	A 37
Anhang 26:	Skelettmasse für Frauen im Alter von 0 bis 22,5 Jahren (Daten Anhang 22).	A 41
Anhang 27:	Skelettmassen für Individuen ab dem dritten Lebensjahrzehnt (Literaturdaten)	A 45

Anhang 28:	Skelettmassen für 33 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Altersklasse (Daten Anhang 27).	A 48
Anhang 29:	Skelettmassen für 33 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 27).	A 51
Anhang 30:	Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahren (Daten Anhang 27).	A 54
Anhang 31:	Skelettmasse für Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahren (Daten Anhang 27)	A 57
Anhang 32:	Skelettmassen für 29 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 27 nach Ausschluss von 12 Datensätzen bzw. 300 Individuen von Garn 1970).	A 59
Anhang 33:	Skelettmasse für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahren (Daten Anhang 32).	A 62
Anhang 34:	Skelettmasse für Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahren (Daten Anhang 32).	A 65
Anhang 35:	Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 83 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32).	A 67
Anhang 36:	Skelettmasse für Frauen im Alter von 0 bis 84 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32).	A 72
Anahng 37:	Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten für 74 Proben (66 Individuen) für beide Geschlechter und 13 Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1 und 7 %.	A 77
Anhang 38 :	ID 3: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 80
Anhang 39 :	ID 4: Simulierte Liegezeitbestimmung	A 82
Anhang 40:	ID 5: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 83
Anhang 41:	ID 12: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 84
Anhang 42:	ID 18: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 90
Anhang 43:	ID 99: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 91
Anhang 44:	ID 97: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 92
Anhang 45:	ID 98: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 94
Anhang 46:	ID 11: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 96
Anhang 47:	ID 14: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 97
Anhang 48:	ID 9: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 99
Anhang 49:	ID 49: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 101
Anhang 50:	ID 83: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 103
Anhang 51:	ID 77: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 104
Anhang 52:	ID 13: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 105
Anhang 53:	ID 59: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 108
Anhang 54:	ID 66: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 110
Anhang 55:	ID 69: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 113
Anhang 56:	ID 45: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 116
Anhang 57:	ID 15: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 118
Anhang 58:	ID 16: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A121
Anhang 59:	ID 17: Simulierte Liegezeitbestimmung.	A 124
Anhang 60:	Simulierte Liegezeitbestimmung (nach Ubelaker 2001).	A 127
Anhang 61:	Berechnung der Differenzen aus gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert unter Verwendung von 24 Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1,0 und 66,0 % für 74 Messwerte (66 Individuen) vom 10. bis 89. Lj. (nach Lebensjahren aufsteigend sortiert).	A 130
Anhang 62:	Vergleich der Übereinstimmungsbereiche für 11 Individuen,bei denen dieLebensjahre durch den Rechenmodus überschätzt werden. (nach Lebensjahren aufsteigend sortiert).	A 133

Danksagung

Anhang 1: ^{14}C-Konzentrationen in der Atmosphäre
(percent modern, pMC: 100 % + $\Delta^{14}C$ % seit 1950).

a)

Jahrzehnt	Jahr									
u. Z.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
186	099,6	099,7	099,3	099,4	099,4	099,7	099,5	099,6	099,6	099,5
187	099,4	099,5	099,5	099,4	099,3	099,4	099,1	099,5	099,4	099,4
188	099,7	099,4	099,9	099,6	099,5	099,6	099,4	099,2	099,1	099,4
189	099,4	099,4	099,4	099,4	099,5	099,7	099,7	099,8	099,7	099,6
190	099,8	099,9	099,7	099,5	099,4	099,4	099,4	099,4	099,4	099,4
191	099,3	099,2	099,1	099,1	099,2	099,4	099,0	099,1	098,8	098,9
192	098,5	098,8	098,7	098,3	098,9	098,7	098,2	098,5	098,3	098,1
193	098,4	098,3	097,8	098,1	098,4	098,3	098,3	098,2	098,3	097,9
194	097,6	097,9	097,9	097,4	097,6	097,7	097,7	097,7	097,7	097,2
195	097,3	097,3	097,3	097,5	097,6	100,0	102,5	105,5	111,5	122,7
196	121,4	122,1	136,2	171,1	183,5	175,5	169,1	162,4	156,4	154,4
197	153,0	149,9	146,5	141,9	140,1	136,8	135,2	133,5	133,5	129,4
198	127,1	126,0	124,1	123,4	120,9	120,0	118,6	118,3	116,9	115,9
199	114,9	113,8	113,4	112,6	112,0	111,2	110,4			
200										
201										
202										

b)

Jahrzehnt	Jahr									
u. Z.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
186										
187										
188										
189										
190										
191										
192										
193	096,10	096,20	096,30	096,40	096,50	096,6	096,70	096,80	096,90	097,00
194	097,05	097,10	097,15	097,20	097,25	097,30	097,35	097,40	097,45	097,50
195	097,60	097,70	097,75	098,80	099,00	101,00	103,00	107,00	113,00	127,00
196	123,00	125,00	138,00	170,00	186,00	176,00	169,00	165,10	159,10	156,90
197	154,70	151,60	147,90	144,70	141,70	139,10	136,50	134,50	132,50	130,50
198	128,50	126,50	124,50	123,00	122,00	121,00	120,00	119,00	118,00	116,50
199	115,40	114,30	113,20	112,10	111,00	110,50	109,90	109,40	108,80	108,30
200	107,70	107,20	106,60	106,10	105,50	105,00	104,75	104,50	104,24	104,00
201	103,75	103,50	103,25	103,00	102,75	102,50	102,38	102,25	102,13	102,00
202	101,88	101,75	101,63	101,50	101,38	101,25	101,12	101,06	101,00	

a) Literaturdaten:
1860 - 1954 (STUIVER UND BRAZIUNAS 1993), bei fehlender Angabe wurden gleichgesetzt: 1890,5 mit 1891, 1892,5 mit 1893 usw. bis 1910,5 mit 1911
bzw. wurde zwischen vorangegangenem und nachfolgendem Jahr interpoliert für die Jahre 1890, 1892 usw. bis 1912 und 1946
1955 - 1958 (STENHOUSE UND BAXTER 1977a), Werte aus Diagramm fig. 1, S. 828, auf 0,5 % gerundet (auch STENHOUSE UND BAXTER 1979 fig. 1, S. 326)
1959 -1976 (LEVIN ET AL. 1985, 1995), Wert für 1973 von 142,9 geändert auf 141,9 pMC, da Wert für „proposed clean air" nur 142,6 pMC beträgt
1977 - 1996 (LEVIN UND KROMER 1997, Tab. 2). Schauinsland (auf eine Dezimalstelle gerundet, Durchschnittswerte für die Messungen von Mai bis August)

b) *(1930) 1997 - 2028* (GEYH 1993, schriftliche Mitteilung)

Anhang 2: Skelettmasse getrennt nach Geschlecht und Rasse.
(nach Daten von TROTTER UND HIXON 1974, tbl. 3, p. 8)

a) Männer N=156 Rasse	Altersspanne [Jahren]	MW Alter [Jahren]	n	Skelettmasse kranial	Skelettmasse post-kranial	Skelettmasse Gesamt	relativer Anteil an der Endmasse [%]* kranial	relativer Anteil an der Endmasse [%]* post-kranial	relativer Anteil an der Endmasse [%]* Gesamt	Anteil [%] des Schädels am Gesamt-skelett*
negrid	37-44 SSW	0,00	9	35,20	47,30	82,50	5,1	1,3	2,0	42,7
	0,0 - 0,5	0,22	4	48,70	61,30	110,00	7,1	1,7	2,6	44,3
	< 0,5 - 3,0	1,30	13	125,90	134,30	260,20	18,2	3,8	6,2	48,4
	< 3,0 - 13,0	7,80	9	438,90	1017,70	1456,60	63,6	28,8	34,4	30,1
	<13,0 - 24,0	18,20	29	690,10	3538,40	4228,50	100,0	100,0	100,0	16,3
	25,0 - 44,0	34,50	2	575,40	3334,70	3910,10	83,4	94,2	92,5	14,7
	45,0 - 64,0	53,90	15	684,40	3287,80	3972,20	99,2	92,9	93,9	17,2
	64,0 -	71,70	13	701,90	3150,50	3852,40	101,7	89,0	91,1	18,2
europid	37-44 SSW	0,00	4	43,90	64,40	108,30	4,5	1,5	2,0	40,5
	0,0 - 0,5	0,26	7	48,20	47,60	95,80	4,9	1,1	1,8	50,3
	< 0,5 - 3,0	1,50	5	133,40	182,40	315,80	13,6	4,1	5,8	42,2
	< 3,0 - 13,0	7,20	7	365,60	567,00	932,60	37,4	12,8	17,2	39,2
	<13,0 - 24,0	18,80	9	697,30	3307,10	4004,40	71,3	74,5	73,7	17,4
	25,0 - 44,0	34,00	1	978,00	4437,20	5415,20	100,0	100,0	100,0	18,1
	45,0 - 64,0	54,90	11	611,60	2926,80	3538,40	62,5	66,0	65,3	17,3
	64,0 -	69,20	18	554,00	2630,70	3184,70	56,6	59,3	58,8	17,4
b) Frauen N=147 Rasse	Altersspanne [Jahren]	MW Alter [Jahren]	n	Skelettmasse kranial	Skelettmasse post-kranial	Skelettmasse Gesamt	relativer Anteil an der Endmasse [%]* kranial	relativer Anteil an der Endmasse [%]* post-kranial	relativer Anteil an der Endmasse [%]* Gesamt	Anteil [%] des Schädels am Gesamt-skelett*
negrid	37-44 SSW	0,00	11	37,70	51,60	89,30	5,2	2,0	2,7	42,2
	0,0 - 0,5	0,11	4	45,40	56,90	102,30	6,2	2,2	3,1	44,4
	< 0,5 - 3,0	1,90	7	182,40	199,90	382,30	25,0	7,6	11,7	47,7
	< 3,0 - 13,0	8,20	11	379,50	926,10	1305,60	52,0	35,3	40,1	29,1
	<13,0 - 24,0	18,10	19	629,80	2626,40	3256,20	85,4	100,0	100,0	19,3
	25,0 - 44,0	37,40	9	729,30	2397,90	3127,20	100,0	91,3	96,0	23,3
	45,0 - 64,0	57,30	7	626,50	2378,70	3005,20	85,9	90,6	92,3	20,8
	64,0 -	78,00	14	594,80	2025,70	2620,50	81,6	77,1	80,5	22,7
europid	37-44 SSW	0,00	15	35,70	49,40	85,10	6,8	1,9	2,8	42,0
	0,0 - 0,5	0,26	3	30,10	40,90	71,00	5,7	1,6	2,3	42,4
	< 0,5 - 3,0	2,00	4	129,30	139,10	268,40	24,7	5,4	8,7	48,2
	< 3,0 - 13,0	8,20	10	312,00	820,40	1132,40	59,5	31,9	36,7	27,6
	<13,0 - 24,0	17,70	3	524,00	2200,30	2724,30	100,0	85,6	88,3	19,2
	25,0 - 44,0	34,50	2	514,70	2569,70	3084,40	98,2	100,0	100,0	16,7
	45,0 - 64,0	56,00	13	505,20	1831,00	2336,20	96,4	71,3	75,7	21,6
	64,0 -	77,80	15	519,40	1610,60	2130,00	99,1	62,7	69,1	24,4

*Je Alterskohorte ist Zusätzlich der relative Anteil einer Skelettregion am Maximalgewicht und der relative Anteil des Schädels an der Gesamtmasse berechnet.

Anhang 3: Knochenmasse einzelner Skelettelemente.
(nach INGALLS 1931, tbl. I, II und III).

Skelettregion	MW [g]		s [g]		Spannweite Min [g]		Spannweite Max [g]	
Gesamtskelett ohne Zähne*, ohne Hyoid	4956,85		719,76		2984		6976	
Cranium ohne Zähne*	642,56		114,02		388		983	
Unterkiefer ohne Zähne*	81,98		16,48		44		127	
Schädel ohne Zähne*	724,54		120,72		435		1110	
Halswirbel	73,1		12,65		38		110	
Brustwirbel	217,28		38,58		116		323	
Lendenwirbel	173,13		35,52		106		282	
Kreuzbein	111,48		31,18		41		189	
Steißbein (n=82)	1,77							
Wirbelsäule insGesamt	576,76		108,40		312		891	
Brustbein	32,5		8,89		13		56	
Rippen, Gesamte	330,18		64,44		173		564	
	re	li	re	li	re	li	re	li
Schlüsselbein	26,99		5,30		15		41	
Schulterblatt	77,66		12,96		40		115	
Schultergürtel	104,65	102,96	17,52	17,50	55	54	156	168
Oberarm	180,3	175,09	28,82	27,88	102	98	251	253
Speiche	54,02		8,65		37		80	
Elle	67,19		11,01		43		101	
Unterarm	121,21	117,54	19,50	17,95	80	77	180	168
Handwurzel	15,28		3,16		7		24	
Mittelhand	28,34		5,04		17		44	
Fingerknochen	25,05		4,39		15	38		
Hand	68,67	65,58	11,99	11,3	40	39	106	91
Arm	370,18	358,21	52,87	53,51	227	218	530	512
Arm und Schultergürtel	474,83	461,17			282	272	686	670
Hüfte	223,67	227,1	45,82	45,85	115	117	352	382
Becken und os coccygis	564,02		118,08		283		916	
Oberschenkel	458,9	460,71	76,39	74,65	266	281	695	642
Kniescheibe	16,11		3,84		8		27	
Schienbein	268,32		48,52		168		424	
Wadenbein	57,58		11,88		33		96	
Unterschenkel	342,01	338,87	60,22	63,64	213	213	543	530
Fußwurzelknochen	105,14		22,71		52		181	
Mittelfußknochen	37,01		7,36		20		64	
Zehenknochen	11,7		2,55		7		18	
Fuß	153,85	151,76	31,28	31,30	85	80	263	251
Bein	954,76	951,34	159,66	160,98	564	574	1430	1367
Bein und Hüfte	1178,43	1178,44			679	691	1749	1749

* Zähne: ca. je 10 g für Ober- bzw. Unterkiefer

Anhang 4: Durchschnittliche Kompakta-Fläche (f_C in mm²) für Männer zwischen 0,5 und 80 Jahre aus 9 Bevölkerungsgruppen Nord- und Lateinamerikas. (nach Daten von GARN 1970).

Alterskohorte	Guate-mala [mm²]*	El Sal-vador [mm²]*	Hon-duras [mm²]*	Nica-ragua [mm²]*	Costa Rica [mm²]*	Pana-ma [mm²]*	Mexican American [mm²]*	White Ohio [mm²]*	American Negro [mm²]*	Spann-weite [mm²]	Max/Min [%]
0,5	6,81	6,64	6,17	6,67	7,23	7,99				1,82	129,5
1	7,39	8,30	7,18	8,13	7,55	8,67		8,72		1,54	121,5
2	9,93	8,84	8,29	9,77	9,76	13,70		12,24		5,41	165,3
3	10,30	10,95	10,97	12,34	12,94	13,07			12,87	2,77	126,9
4	11,86	17,72	13,06	14,64	12,89	15,97	13,64	16,75	16,27	5,86	149,4
5	14,32	14,39	15,27	16,60	17,45	17,98	16,84		20,71	6,39	144,6
6	14,73	15,05	16,07	18,07	17,39	19,58	18,17	21,44	19,32	6,71	145,6
7	18,29	16,81	16,64	20,14	18,44	21,25	20,15		26,44	9,80	158,9
8	18,41	18,74	19,24	23,55	21,03	23,24	20,60	26,32	27,08	8,67	147,1
9	22,20	20,68	21,67	25,81	22,51	24,88	24,46		29,90	9,22	144,6
10	21,58	23,43	22,76	25,98	23,90	25,97	27,72	31,88	29,68	10,30	147,7
11	24,23	24,23	25,58	28,15	27,45	29,44	31,16		33,55	9,32	138,5
12	26,64	26,81	27,16	30,58	28,48	29,27	32,93	37,88	34,32	11,24	142,2
13	29,36	27,36	30,14	31,61	30,71	33,85	38,83		39,56	12,20	144,6
14	32,65	23,64	34,92	37,06	33,77	38,42	42,29	47,03	51,45	27,81	217,6
15	37,90	38,78	38,30	31,97	36,43	46,28	41,76		52,71	20,74	164,9
16	40,04	42,20	43,28	49,06	42,34	46,53	47,43	53,72	51,47	13,68	134,2
17	47,43	45,74	41,50	48,71	43,70	46,75	45,36		50,91	9,41	122,7
18	46,48	48,38	45,81	49,20	47,56	52,06	52,05	57,86	54,84	12,05	126,3
19-29	47,07	51,20	49,36	51,42	48,21	53,57	45,99			7,58	116,5
22	49,33	50,09	50,18	53,33	50,08	55,55	55,91	59,58	64,61	15,28	131,0
30-39	49,32	49,91	51,59	52,58	52,65	55,66	57,05	59,61	64,52	15,20	130,8
40-40	47,16	50,30	51,87	55,12	51,34	56,01	53,70	58,34	61,13	13,97	129,6
50-59	50,20	51,63	53,18	56,87	51,28	53,44	54,70	59,51	65,14	14,94	129,8
60-69	48,66	48,68	49,71	54,32	51,66	53,81	46,78	58,60	60,36	13,58	129,0
70-79	47,01	50,37	51,15	51,92	49,49	53,26	50,93	54,09	59,05	12,04	125,6
80	46,97	44,71	47,21	49,80	50,66	51,73	41,60	50,56	55,63	14,03	133,7
									Mittel-werte:	10,80	140,7

Anzahl der Stichproben	Guate-mala*	El Sal-vador*	Hon-duras*	Nica-ragua*	Costa Rica*	Pana-ma*	Mexican American*	White Ohio*	American Negro*
	27	27	27	27	27	27	23	17	23
Summe Rang $_{min}$	-14	-3	-6	-1	0	0	-3	0	0
Summe Rang $_{min+1}$	-7	-14	-2	0	-4	0	0	0	0
Summe Rang $_{max-1}$	0	0	0	3	3	5	2	10	4
Summe Rang $_{max}$	0	1	0	0	0	4	0	6	16
Summe	-21	-16	-8	2	-1	9	-1	16	20
Summe/Anzahl der Stichproben	-0,78	-0,59	-0,30	0,07	-0,04	0,33	0,04	0,94	0,87
Rang	9.	8.	7.	4.	6.	3.	5.	1.	2.

* $f_C = (d_C^2 - d_M^2) \times 0{,}7854$

Werte nach GARN (1970, durchschnittlich 25 Individuen pro Stichprobe):
für Lateinamerika: Appendix tbl. Ip. 134
Amercian Negros und Mexican American: Appendix tbl. II p. 135
White Ohio tbl. II, p. 15 und tbl. VIII p. 26
gGrau hinterlegt: kleinster und größter Wert

Anhang 5: Durchschnittliche Kompakta-Fläche (f_C in mm²) für Frauen zwischen 0,5 und 80 Jahre aus 9 Bevölkerungsgruppen Nord- und Lateinamerikas. (nach Daten von GARN 1970).

Alterskohorte	Guate-mala [mm²]*	El Sal-vador [mm²]*	Hon-duras [mm²]*	Nica-ragua [mm²]*	Costa Rica [mm²]*	Pana-ma [mm²]*	Mexican American [mm²]*	White Ohio [mm²]*	American Negro [mm²]*	Spann-weite [mm²]	Max/Min [%]
0,5	6,03	6,82	5,96	6,10	6,27	7,02				1,06	117,8
1	6,14		6,50	6,99	6,89	8,24		8,48		2,34	138,1
2	8,45	10,52	9,04	10,07	11,28	11,47		11,42		3,02	135,7
3	9,11	10,82	9,83	11,60	12,25	12,52			12,63	3,52	138,6
4	10,69	12,61	11,44	13,54	14,25	15,60	15,03	15,51	16,14	5,45	151,0
5	13,86	12,86	14,02	15,68	15,34	18,08	16,58		17,28	5,22	140,6
6	15,16	14,45	15,56	17,78	16,46	18,91	17,43	18,99	19,80	5,35	137,0
7	16,63	17,55	18,02	18,08	17,56	20,35	19,95		22,27	5,64	133,9
8	18,83	19,41	18,64	22,81	20,92	21,63	21,68	23,67	23,92	5,28	128,3
9	21,13	19,75	19,72	23,68	22,40	23,07	24,17		27,45	7,73	139,2
10	23,53	22,40	24,68	26,27	24,22	26,69	26,34	28,03	28,31	5,91	126,4
11	26,84	23,53	26,99	29,01	26,22	29,43	30,46		35,05	11,52	149,0
12	27,64	28,83	29,04	32,63	30,45	31,97	35,48	34,89	36,20	8,56	131,0
13	31,31	33,72	33,90	36,52	31,51	37,18	36,49		38,55	7,24	123,1
14	36,06	32,54	32,15	40,60	33,20	38,92	39,19	41,04	43,30	11,15	134,7
15	35,15	35,41	36,59	40,78	37,24	38,86	38,97		41,95	6,80	119,4
16	36,24	36,71	37,79	40,19	39,24	41,09	38,23	42,05	39,09	5,81	116,0
17	38,48	39,35	39,43	41,31	36,78	41,10	39,41		41,01	4,53	112,3
18	37,55	38,49	42,54	43,91	41,45	38,85	42,62	43,20	39,81	6,36	116,9
19-29	38,36	41,74	41,31	43,43	39,82	40,94	41,71		53,04	14,68	138,3
22	37,61	36,81	40,34	43,11	40,68	40,94	40,78	44,25	46,00	9,19	125,0
30-39	37,81	39,14	40,54	42,67	41,34	42,09	41,60	43,96	46,15	8,34	122,1
40-40	37,35	39,31	40,49	43,50	40,01	43,21	42,66	45,71	49,05	11,70	131,3
50-59	38,60	39,21	41,20	43,09	41,59	41,83	42,98	43,71	47,47	8,87	123,0
60-69	34,24	34,67	37,84	39,65	35,35	38,09	37,78	41,62	45,37	11,13	132,5
70-79	34,66	34,13	34,81	35,77	36,25	38,83	35,30	39,56	43,13	11,24	132,9
80	30,15	31,46	35,69	35,07	30,85	33,95	34,36	34,34	39,83	9,68	132,1
									Mittel-wert	7,31	130,6

Anzahl der Stichproben	Guate-mala*	El Sal-vador*	Hon-duras*	Nica-ragua*	Costa Rica*	Pana-ma*	Mexican American*	White Ohio*	American Negro*
	27	26	27	27	27	27	23	17	24
Summe Rang $_{min}$	-16	6	4	0	1	0	0	0	0
Summe Rang $_{min+1}$	-8	11	4	0	4	0	0	0	0
Summe Rang $_{max-1}$	0	1	1	2	0	7	3	12	1
Summe Rang $_{max}$	0	0	0	2	0	3	0	2	20
Summe	-24	-16	-7	4	-5	10	3	14	21
Summe/Anzahl der Stichproben	-0,89	-0,62	-0,26	0,15	-0,19	0,37	0,13	0,82	0,88
Rang	9.	8.	7.	4.	6.	3.	5.	2.	1.

* $f_C = (d_C^2 - d_M^2) \times 0{,}7854$

Werte nach GARN (1970, durchschnittlich 25 Individuen pro Stichprobe):
für Lateinamerika: Appendix tbl. I p. 134
Amercian Negros und Mexican American: Appendix tbl. II p. 135
White Ohio tbl. II, p. 15 und tbl. VIII p. 26
grau hinterlegt: kleinster und größter Wert je Alterskohorte

Anhang 6: Kompaktawachstum für Humerus und Tibia
(nach Daten von MARESH 1955, MAAT 1984 und TANNER ET AL. 1981)

a) Männer
b) Frauen.

a)

	Tibia								Humerus							
		l [mm]	d_T [mm]		d_M [mm]		d_C [mm]			l [mm]	d_T [mm]		d_M [mm]		d_C [mm]	
Alter	n**	Median*	MW**	s**	MW**	s**	MW**	s**	n**	Median*	MW**	s**	MW**	s**	MW**	s**
0		69,0								72,8						
1		108,7								104,8						
2		139,7								129,7						
3	26	163,2	15,07	1,30	8,88	1,97	5,86	1,48	26	146,5	12,55	1,27	7,21	1,27	5,51	0,48
4	44	183,3	16,01	1,41	10,31	1,77	5,64	0,93	44	162,1	12,99	1,18	7,01	1,18	5,84	0,75
5	67	201,8	16,71	1,29	11,22	1,42	5,62	0,62	67	176,6	13,32	1,24	7,03	1,55	6,09	0,68
6	86	219,2	17,58	1,41	11,73	1,71	5,93	0,60	86	190,3	13,94	1,15	7,46	1,25	6,51	0,75
7	95	235,7	18,57	1,62	12,27	1,83	6,43	0,69	95	203,4	13,94	1,32	7,65	1,44	6,71	0,90
8	104	252,0	19,49	1,51	12,72	1,78	6,58	0,89	104	215,9	14,93	1,27	7,83	1,35	6,97	0,77
9	118	268,0	20,26	1,59	13,06	1,61	6,96	0,91	118	228,1	15,58	1,32	8,20	1,47	7,25	0,88
10	116	283,7	21,26	1,65	13,87	1,87	7,33	1,14	116	239,8	16,12	1,45	8,48	1,46	7,55	0,93
11	116	299,0	21,93	1,67	13,93	1,89	7,68	1,16	116	251,3	16,34	1,32	8,53	1,33	7,66	0,89
12	104	314,2	23,76	1,76	14,40	1,74	8,06	1,17	104	262,8	17,02	1,52	9,21	1,54	7,83	0,89
13	104	333,9	24,76	1,94	15,12	2,13	8,46	1,50	104	297,5	17,63	1,58	9,45	1,64	8,26	1,11
14	100	352,9	25,68	2,28	15,68	2,53	8,66	1,73	100	314,8	18,51	1,73	9,67	1,73	8,84	1,31
15	93	366,6	26,06	2,24	16,80	2,23	8,84	1,76	93	332,0	19,47	1,74	9,79	1,55	9,55	1,21
16	81	375,4	26,49	2,27	15,63	1,78	10,17	1,39	81	344,2	20,25	1,72	10,07	1,75	10,23	1,27
17	69	379,0	26,90	2,15	16,86	3,46	9,55	1,95	69	350,2	21,07	1,43	10,47	1,91	10,51	1,13
18	50	380,1	27,65	2,29	19,07	5,22	8,55	1,23	50	352,8	21,50	1,61	10,66	1,85	11,14	1,38

* Länge der Tibia-Diaphyse: 0-12 Jahre nach MARESH (1955, tbl. 1 p. 727),
ab 13 Jahre nach MAAT (1984, tbl. 1 p. 294, calculated diaphyseal length B^2)

** Individuenzahl und Durchmesser für Tibia-Diaphyse nach TANNER (1981)

b)

	Tibia								Humerus							
		l [mm]	d_T [mm]		d_M [mm]		d_C [mm]			l [mm]	d_T [mm]		d_M [mm]		d_C [mm]	
Alter	n**	Median*	MW**	s**	MW**	s**	MW**	s**	n**	Median*	MW**	s**	MW**	s**	MW**	s**
0		70,0								71,2						
1		107,7								103,8						
2		137,5								128,0						
3	12	161,0	14,79	1,70	9,62	1,84	4,68	0,42	12	145,8	12,45	2,08	7,18	2,23	5,38	0,59
4	32	181,5	15,68	1,70	10,93	2,30	5,36	0,82	32	161,5	12,67	1,28	7,04	1,47	5,70	0,58
5	49	200,6	17,19	1,79	11,91	1,88	5,88	0,78	49	176,0	13,47	1,38	7,63	1,47	5,97	0,86
6	71	218,3	17,89	2,00	12,16	1,83	6,11	0,75	71	189,5	13,74	1,27	7,52	1,28	6,28	0,72
7	90	235,6	18,62	1,96	13,08	1,96	6,19	0,74	90	202,5	14,20	1,33	7,81	1,36	6,52	0,88
8	94	252,5	19,29	1,81	13,11	1,76	6,40	0,96	94	215,1	14,45	1,47	7,53	1,39	6,69	0,83
9	90	269,3	20,11	1,76	14,14	1,74	6,43	1,41	90	227,5	14,95	1,47	7,92	1,36	6,84	0,93
10	91	285,9	20,77	1,96	14,08	2,03	6,84	0,85	91	240,3	15,40	1,56	8,09	1,44	7,09	0,93
11	86	302,6	21,73	1,90	14,44	1,67	7,52	1,09	86	253,8	16,36	1,65	8,67	1,74	7,52	1,03
12	86	321,8	22,31	2,09	14,00	1,97	8,21	1,14	86	267,8	16,79	1,47	8,58	1,65	8,13	0,96
13	86	330,7	23,14	2,17	14,39	2,38	8,74	1,23	86	303,0	17,40	1,52	8,64	1,63	8,67	1,11
14	78	340,5	23,61	2,13	15,07	2,73	9,32	2,02	78	313,0	18,11	1,69	8,59	1,69	9,42	1,03
15	65	345,6	23,76	2,18	14,97	3,23	8,57	1,79	65	320,0	18,55	1,87	8,91	2,10	9,44	1,06
16	39	346,8	24,21	2,24	15,91	3,74	8,91	1,79	39	322,0	18,40	1,63	8,86	1,84	9,61	1,22
17	31		23,79	2,42	14,83	2,35	9,28	1,44	31		18,41	1,70	8,87	1,63	9,60	0,83
18	17		24,13	2,71	14,64	2,87	8,30	1,69	17		18,77	1,72	9,26	1,70	9,39	0,68

* Länge der Tibia-Diaphyse: 0-12 Jahre nach MARESH (1955, tbl. 2 p. 729),
ab 13 Jahre nach MAAT (1984, tbl. 2 p. 295, calculated diaphyseal length B^2)

** Individuenzahl und Durchmesser für Tibia-Diaphyse nach TANNER (1981)

Anhang 7: Berechnung des Korrekturwertes für Männer.
(nach Daten von GARN (1970)

	American Negro			Mexican American			White Ohio																
Alter	d_T [mm] MW	d_M [mm] MW	f_{Cneu} [mm²] MW	d_T [mm] MW	d_M [mm] MW	f_{Cneu} [mm²] MW	l [mm] MW	s	d_T [mm] MW	d_M [mm] MW	f_C [mm²] MW	f_{Cneu} [mm²] MW	SM_{netto} [g] MW	ΔSM_{netto} [g]	SM_{dT} [g] MW	ΔSM_{dT} [g]	SM_{dM} [g] MW	ΔSM_{dM} [g]	100x(ΔSM/ SM_{netto}) [%]	K [%]	SM netto	SM dT	SM dM
1< 2							26,00		4,51	3,04	8,80	8,72	220		403		-183						
2< 4							30,60	1,50	5,12	3,26	11,90	12,24	363	143	611	208	-248	-65	-17,81	8,90	Z	Z	R
4< 6	6,00	3,91	16,27	5,26	3,21	13,64	37,90	2,30	5,54	3,06	16,20	16,75	615	252	885	275	-270	23	3,67	1,84	Z	Z	R*
6< 8	6,20	3,72	19,32	5,75	3,15	18,17	44,90	2,90	6,07	3,09	21,70	21,44	933	318	1259	374	-326	-56	-6,02	3,01	Z	Z	R
8< 10	7,06	3,92	27,08	6,06	3,24	20,60	50,20	3,40	6,60	3,17	26,20	26,32	1280	348	1664	405	-384	-58	-4,50	2,25	Z	Z	R
10< 12	7,34	4,01	29,65	6,86	3,43	27,72	55,00	3,90	7,17	3,29	32,20	31,88	1699	419	2152	488	-453	-69	-4,07	2,04	Z	Z	R
12< 14	7,93	4,38	34,32	7,59	3,96	32,93	60,60	3,90	7,75	3,44	38,70	37,88	2224	526	2770	618	-546	-93	-4,17	2,08	Z	Z	R
14< 16	9,40	4,78	51,45	8,45	4,19	42,29	67,10	4,80	8,56	3,66	47,30	47,03	3058	834	3742	972	-684	-138	-4,52	2,26	Z	Z	R
16< 18	8,99	3,91	51,47	8,62	3,73	47,43	73,20	3,80	9,11	3,82	53,70	53,72	3811	753	4624	882	-813	-129	-3,38	1,69	Z	Z	R
18< 30	9,26	3,99	54,84	8,83	3,42	52,05	73,90	3,50	9,30	3,58	57,80	57,86	4144	333	4865	241	-721	92	0,00	0,00	Z	Z	Z
30< 40	9,67	3,37	64,52	9,15	3,33	57,05	74,00	3,80	9,40	3,53	59,80	59,61	4275	131	4977	112	-702	19	0,00	0,00	Z	Z	Z
40< 50	9,67	3,96	61,13	8,96	3,45	53,70	74,00		9,34	3,60	57,80	58,34	4183	-91	4913	-63	-730	-28	0,00	0,00	R	R	R
50< 60	10,05	4,25	65,14	9,05	3,50	54,70	74,00		9,49	3,78	59,50	59,51	4268	84	5072	159	-805	-75	-1,75	0,18	Z	Z	R
60< 70	9,64	4,01	60,36	8,52	3,61	46,78	74,00		9,68	4,37	58,70	58,60	4202	-66	5277	205	-1076	-271	4,88	0,49	R	Z	R
70< 80	9,60	4,12	59,05	8,93	3,86	50,93	74,00		9,37	4,35	54,20	54,09	3879	-323	4945	-333	-1066	10	0,25	0,03	R	R	Z
80 <100	9,93	5,27	55,63	8,74	4,84	41,60	74,00		9,07	4,23	51,20	50,56	3626	-254	4633	-312	-1008	58	1,60	0,08	R	R	Z

Angaben nach GARN 1970: tbl. II/15, Tab. VIII/26, und tbl. XXXIV/83

d_T: Gesamtdurchmesser des MC II

d_M: Druchmesser der Markhöhle des MC II

f_{Cneu}: Kompaktafläche des MC II, neu berechnet anhand der Mittelwerte (MW): $f_{Cneu} = (d_T^2 - d_M^2) \times 0{,}7854$

l: Länge des MC II

SM_{netto} $= (d_T^2 - d_M^2) \times l \times 0{,}7854 \times 0{,}969 = (d_T^2 - d_M^2) \times l \times 0{,}7611$; vgl. dazu Anhang 19

ΔSM_{netto} $= SM_{a+1} - SM_a$, absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall

SM_{dT} $= d_T^2 \times l \times 0{,}7611$

ΔSM_{dT} $= SM_{dTa+1} - SM_{dTa}$ absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall am Periost

SM_{dM} $= d_M^2 \times l \times 0{,}7611$

ΔSM_{dM} $= SM_{dMa+1} - SM_{dMa}$ absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall am Endost

(100xΔSM/SM_{netto}): Ausgleich für einen durch Abbau überlagerten Zuwachs von Skelettmasse über gesamte Altersintervall: der Korrekturwert ergibt sich aus dem Verhältnis der unterstrichenen Zahl zu ΔSM_{netto}

SM Skelettmasse, Z Zuwachs, R Reduktion jeweils im Vergleich zur vorangegangenen Alterskohorte

K: Korrekturwert für einen durch Abbau überlagerten Zuwachs von Skelettmasse pro Lebensjahr in dem jeweiligen Altersintervall

Anhang 8: Berechnung des Korrekturwertes für Frauen.
(nach Daten von GARN (1970)

	American Negro			Mexican American			White Ohio																
Alter	d_T [mm] MW	d_M [mm] MW	f_{Cneu} [mm²] MW	d_T [mm] MW	d_M [mm] MW	f_{Cneu} [mm²] MW	l [mm] MW	s	d_T [mm] MW	d_M [mm] MW	f_C [mm²] MW	f_{Cneu} [mm²] MW	SM_{netto} [g] MW	ΔSM_{netto} [g]	SM_{dT} [g] MW	ΔSM_{dT} [g]	SM_{dM} [g] MW	ΔSM_{dM} [g]	100x(ΔSM/ SM_{netto}) [%]	K [%]	SM netto	SM dT	SM dM
1 < 2							26,20		4,37	2,88	8,60	8,48	215		381		-165						
2 < 4							31,30	1,90	4,94	3,14	11,30	11,42	346	131	581	201	-235	-69	-20,05	10,03	Z	Z	R
4 < 6	5,56	3,22	16,14	5,43	3,21	15,03	38,20	2,30	5,39	3,05	15,40	15,51	574	228	845	263	-270	36	6,20	3,10	Z	Z	R*
6 < 8	5,87	3,04	19,80	5,50	2,83	17,43	45,60	3,20	5,77	3,02	19,40	18,99	839	265	1155	311	-317	46	5,49	2,75	Z	Z	R*
8 < 10	6,44	3,32	23,92	6,22	3,32	21,68	51,20	3,30	6,28	3,05	23,60	23,67	1174	335	1537	381	-363	-46	-3,91	1,96	Z	Z	R
10 < 12	6,91	3,42	28,31	6,57	3,09	26,34	56,60	4,10	6,81	3,27	27,80	28,00	1537	363	1998	461	-461	-98	-6,38	3,19	Z	Z	R
12 < 14	7,89	4,02	36,20	7,40	3,08	35,48	63,20	4,40	7,42	3,26	34,50	34,89	2137	600	2648	650	-511	51	2,37	1,18	Z	Z	R*
14 < 16	8,20	3,48	43,30	7,69	3,02	39,19	*67,40*	3,90	7,80	2,93	41,20	41,04	2681	543	3121	473	-440	71	0,00	0,00	Z	Z	Z
16 < 18	7,81	3,35	39,09	7,70	3,24	38,23	*68,60*	4,30	7,81	2,73	42,10	42,05	2796	115	3185	64	-389	51	0,00	0,00	Z	Z	Z
18 < 30	7,71	2,96	39,81	7,84	2,66	42,62	*67,50*	4,30	7,91	2,75	42,90	43,20	2826	30	3214	30	-389	0	0,00	0,00	Z	Z	
30 < 40	8,25	3,05	46,15	7,70	2,49	41,60	*67,10*		7,93	2,63	43,70	43,96	2858	32	3212	-3	-353	35	0,00	0,00	Z	Z	Z
40 < 50	8,53	3,21	49,05	7,84	2,65	42,66	*67,10*		8,06	2,60	46,20	45,71	2972	114	3318	106	-345	8	0,00	0,00	Z	Z	Z
50 < 60	8,53	3,51	47,47	8,12	3,33	42,98	*67,10*		7,93	2,69	43,30	43,71	2842	-130	3212	-106	-370	-24	0,00	0,00	R	R	R
60 < 70	8,44	3,67	45,37	7,92	3,81	37,78	*67,10*		8,09	3,53	41,90	41,62	2706	-136	3342	131	-636	-267	4,84	0,48	R	Z	R
70 < 80	8,67	4,50	43,13	7,95	4,26	35,30	*67,10*		8,34	4,38	38,90	39,56	2572	-134	3552	210	-980	-343	8,15	0,82	R	Z	R
80 <100	8,69	4,98	39,83	8,19	4,82	34,36	*67,10*		8,29	5,00	34,50	34,34	2233	-339	3510	-42	-1277	-297	0,00	0,00	R	R	R

Angaben nach GARN 1970: tbl. II/15, Tab. VIII/26, und tbl. XXXIV/83

d_T: Gesamtdurchmesser des MC II

d_M: Druchmesser der Markhöhle des MC II

f_{Cneu}: Kompaktafläche des MC II, neu berechnet anhand der Mittelwerte (MW): $f_{Cneu} = (d_T^2 - d_M^2) \times 0{,}7854$

l: Länge des MC II

SM_{netto} = $(d_T^2 - d_M^2) \times l \times 0{,}7854 \times 0{,}969 = (d_T^2 - d_M^2) \times l \times 0{,}7611$; vgl. dazu Anhang 19

ΔSM_{netto} = $SM_{a+1} - SM_a$, absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall

SM_{dT} = $d_T^2 \times l \times 0{,}7611$

ΔSM_{dT} = $SM_{dTa+1} - SM_{dTa}$ absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall am Periost

SM_{dM} = $d_M^2 \times l \times 0{,}7611$

ΔSM_{dM} = $SM_{dMa+1} - SM_{dMa}$ absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall am Endost

(100xΔSM/SM_{netto}): Ausgleich für einen durch Abbau überlagerten Zuwachs von Skelettmasse über gesamte Altersintervall: der Korrekturwert ergibt sich aus dem Verhältnis der unterstrichenen Zahl zu ΔSM_{netto}

SM Skelettmasse,
Z Zuwachs, R Reduktion jeweils im Vergleich zur vorangegangenen Alterskohorte

K: Korrekturwert für einen durch Abbau überlagerten Zuwachs von Skelettmasse pro Lebensjahr in dem jeweiligen Altersintervall

Anhang 9: Berechnung des Korrekturwertes für Männer.
(nach Daten von GARN (1972)

a) Einkommen < $592 pro Kopf
b) Einkommen > $1800 pro Kopf.

a)

Alter [Jahre]	SM_{dT} [g]	SM_{dM} [g]	SM_{netto} [g]	ΔSM_{netto} [g]	ΔSM_{dT} [g]	ΔSM_{dM} [g]	(100xΔSM/SM_{netto}) [%]	K [%g]	SM_{netto}	SM_{dT}	SM_{dM}
1 < 5	403	-159	244								
5 < 10	995	-316	679	435	592	-157	-23,12		Z	Z	R
10 < 22	1874	-517	1357	678	879	-201	-14,81		Z	Z	R
22 < 30	4224	-655	3569	2212	2350	-138	-3,87		Z	Z	R
30 < 40	4427	-575	3852	283	203	80	0,00		Z	Z	Z
40 < 50	4988	-834	4154	302	561	-259	-6,23		Z	Z	R
50 < 60	4968	-993	3975	-179	-20	-159	0,00		R	R	R
60 < 70	4946	-995	3951	-24	-22	-2	0,00		R	R	R
70 < 80	4830	-931	3899	-52	-116	64	1,64		R	R	Z
80 < 100	5265	-1404	3861	-38	435	-473	11,27		R	Z	R

b)

Alter [Jahre]	SM_{dT} [g]	SM_{dM} [g]	SM_{netto} [g]	ΔSM_{netto} [g]	ΔSM_{dT} [g]	ΔSM_{dM} [g]	(100xΔSM/SM_{netto}) [%]	K [%g]	SM_{netto}	SM_{dT}	SM_{dM}
1 < 5	404	-112	292								
5 < 10	1056	-369	687	395	652	-257	-37,41		Z	Z	R
10 < 22	1951	-543	1408	721	895	-174	-12,36		Z	Z	R
22 < 30	4830	-644	4186	2778	2879	-101	-2,41		Z	Z	R
30 < 40	4911	-690	4221	35	81	-46	0,00		Z	Z	R
40 < 50	5054	-745	4309	88	143	-55	-1,28		Z	Z	R
50 < 60	5050	-831	4219	-90	-4	-86	0,00		R	R	R
60 < 70	5056	-877	4179	-40	6	-46	0,14		R	Z	R
70 < 80	5254	-1165	4089	-90	198	-288	4,84		R	Z	R
80 < 100	5478	-1333	4145	56	224	-168	-4,05		Z	Z	R

d_T:	Gesamtdurchmesser des MC II
d_M:	Druchmesser der Markhöhle des MC II
SM_{netto}, SM_{dT}, SM_{dM}:	Werte nach GARN (1972, tbl. 8)
ΔSM_{netto}	= $SM_{a+1} - SM_a$, absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall
ΔSM_{dT}	= $SM_{dTa+1} - SM_{dTa}$ absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall am Periost
ΔSM_{dM}	= $SM_{dMa+1} - SM_{dMa}$ absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall am Endost
(100 x ΔSM/SM_{netto}):	Ausgleich für einen durch Abbau überlagerten Zuwachs von Skelettmasse über das gesamte Altersintervall. Der Korrekturwert ergibt sich aus dem Verhältnis der unterstrichenen Zahl zu ΔSM_{netto} SM Skelettmasse, Z Zuwachs, R Reduktion Unterstreichung hebt Unterschiede an der periostalen (d_T) und endostalen (d_M) Oberfläche hervor
K:	Ausgleich für einen durch Abbau überlagerten Zuwachs von Skelettmasse pro Jahr im jeweiligen dem Altersintervall

Anhang 10: Berechnung des Korrekturwertes für Männer.
(nach Daten von GARN (1972)

a) Einkommen < $592 pro Kopf
b) Einkommen > $1800 pro Kopf.

a)

Alter [Jahre]	SM_{dT} [g]	SM_{dM} [g]	SM_{netto} [g]	ΔSM_{netto} [g]	ΔSM_{dT} [g]	ΔSM_{dM} [g]	(100xΔSM/SM_{netto}) [%]	K [%g]	SM_{netto}	SM_{dT}	SM_{dM}
1 < 5	286	-119	167								
5 < 10	921	-255	666	499	635	-136	-20,42		Z	Z,	R
10 < 22	1847	-418	1429	763	926	-163	-11,41		Z	Z	R
22 < 30	3190	-369	2821	1392	1343	49	0,00		Z	Z	Z
30 < 40	3341	-412	2929	108	151	-43	-1,47		Z	Z	R
40 < 50	3459	-433	3026	97	118	-21	-0,69		Z	Z	R
50 < 60	3374	-400	2974	-52	-85	33	1,11		R	R	Z
60 < 70	3524	-738	2786	-188	150	-338	5,38		R	Z	R
70 < 80	3336	-882	2454	-332	-188	-144	0,00		R	R	R
80 < 100	3601	-1210	2391	-63	265	-328	11,08		R	Z	R

b)

Alter [Jahre]	SM_{dT} [g]	SM_{dM} [g]	SM_{netto} [g]	ΔSM_{netto} [g]	ΔSM_{dT} [g]	ΔSM_{dM} [g]	(100xΔSM/SM_{netto}) [%]	K [%g]	SM_{netto}	SM_{dT}	SM_{dM}
1 < 5	497	-218	279								
5 < 10	990	-303	687	408	493	-85	-12,37		Z	Z	R
10 < 22	2015	-517	1498	811	1025	-214	-14,29		Z	Z	R
22 < 30	3192	-399	2793	1295	1177	118	0,00		Z	Z	Z
30 < 40	3220	-380	2840	47	28	19	0,00		Z	Z	Z
40 < 50	3298	-395	2903	63	78	-15	-0,52		Z	Z	R
50 < 60	3435	-492	2943	40	137	-97	-3,30		Z	Z	R
60 < 70	3530	-688	2842	-101	95	-196	3,34		R	Z	R
70 < 80	3553	-944	2609	-233	23	-256	0,88		R	Z	R
80 < 100	3573	-1007	2566	-43	20	-63	0,78		R	Z	R

d_T: Gesamtdurchmesser des MC II
d_M: Druchmesser der Markhöhle des MC II
SM_{netto}, SM_{dT}, SM_{dM}: Werte nach GARN (1972, tbl. 8)
ΔSM_{netto} = $SM_{a+1} - SM_a$, absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall
ΔSM_{dT} = $SM_{dTa+1} - SM_{dTa}$ absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall am Periost
ΔSM_{dM} = $SM_{dMa+1} - SM_{dMa}$ absolute Skelettmasse-Änderung über Altersintervall am Endost
(100 x ΔSM/SM_{netto}): Ausgleich für einen durch Abbau überlagerten Zuwachs von Skelettmasse über das gesamte Altersintervall. Der Korrekturwert ergibt sich aus dem Verhältnis der unterstrichenen Zahl zu ΔSM_{netto}
SM Skelettmasse, Z Zuwachs, R Reduktion
Unterstreichung hebt Unterschiede an der periostalen (d_T) und endostalen (d_M) Oberfläche hervor
K: Ausgleich für einen durch Abbau überlagerten Zuwachs von Skelettmasse pro Jahr im jeweiligen dem Altersintervall

Anhang 11: Umbauraten für Knochenkompakta bei Männer und Frauen. (Literaturdaten)

Alter	11. Rippe[1]	6. Rippe[2]	6. Rippe[3]	6. Rippe[3]	6. Rippe[4]	Rippen[5]	Beckenkamm[6]
	Männer und Frauen	Männer und Frauen	Männer	Männer	Männer und Frauen		Frauen
	Tetracyclin	Tetracyclin	Tetracyclin	Osteonen	Algorithmus	Osteonen	Tetracyclin
0,3		0,850					
4,5		0,380					
9,0	0,27						
13,5						0,459	
15,0	0,21						
15,7					0,242		
16,0		0,210					
16,5						0,555	
17,0						0,208	
19,0						0,253	
23,0	0,08		0,177	0,185			
24,0		0,067				0,258	
24,4					0,083		
24,5						0,250	
26,5						0,122	
26,5						0,146	
27,0						0,206	
28,0						0,174	
30,0					0,041		
32,0	0,02		0,138	0,145			
33,0						0,128	
35,0		0,018					
36,0						0,164	
38,0			0,116	0,124			
40,0	0,03						
44,0		0,037					
44,1					0,037		
47,5						0,061	
47,5						0,085	
49,4							0,13
50,0						0,090	
50,0						0,059	
51,9			0,103	0,109			
54,6							0,24
55,0		0,036					
58,9			0,095	0,096			
59,0	0,05						
60,0							0,37
64,0		0,040					
66,0	0,04						
70,0					0,02		
73,0	0,05						
75,0		0,044					

1 PIROK ET AL. (1966)
2 FROST (1969)
3 WU ET AL (1970)
4 STOUT UND PAINE (1994)
5 STOUT UND TEITELBAUM (1976)
6 RECKER ET AL. (2004)

Anhang 12: Merkmalsliste für die Asservate.

ID	_ _ _	001 bis 110
Herkunft	_	1 RM Düsseldorf 2 RM Ulm 3 RM München 4 RM Jena 5 RM Würzburg 6 RM Erfurt 7 RM Hamburg 8 Anthropologie Ulm
Instituts-Nr	_ _ _ _ _ _ _ — _ _ _ _ _	(anonymisiert)
Geschlecht	1 2 3 4 5 männlich ? weiblich	
Alter Bestimmung	_ _ _ ± _ _	JJJ bei anthropologischer
Geburtsdatum	_ _ . _ _ . _ _	TTMMJJ
Todes- / Auffindungstag	_ _ . _ _ . _ _	TTMMJJ
Leichen- / Liegezeit	_	1 nein 2 ja
wenn ja: Dauer	_ _ _ _	in Wochen, Monaten, Jahren
Todesumstände / Befundart Knochen: Sturz, Ersticken	_	0 ? 1 Trauma mit Defekt am Straßenverkehr, Bahnleiche, Erschießen, ? 2 Trauma an Weichteilen : Erhängen, Erdrosseln, 3 Brandleiche 4 Wasserleiche / Ertrinken 5 Vergiftungen / Intoxikationen
Pathologien	_	1 nicht bekannt / nicht erkennbar 2 ja
wenn ja, welche:	..... ……. …….....	
Mazeration Antiformin	_	0 ? 1 keine, da Skelettfund 2 Waschmittel 3 Fäulnis 4 Kochen 5 Kochen, Zusatz von

Anhang 12: Merkmalsliste für die Asservate (Fortsetzung).

Präparation			_	0	?
				1	keine
				2	Benzol und H_2O_2
Skelettelemente			_ _ _	1	kranial
				2	postkranial
				1+2	kranial + postkranial
	kranial	Element	_	0	Fragmente
				1	gesamter Schädel (±Zähne)
				2	Teile des Neurokraniums
				3	Teile des Viscerokraniums
				4	Teile des Viscerokraniums mit Zähnen
	postkranial	Seite	_ _ _	1	rechts
				2	links
				1+2	beide
		Element	_	0	Fragmente
				1	Femur
				2	Tibia
				3	Fibula
				4	Humerus
				5	Radius
				6	Ulna
				7	Schultergürtel
				8	Becken
				9	Wirbel, Rippen, Brustbein
Gewicht			_ _ _ _ (mg)		
Proben für Knochenschliff			_	1	nein
				2	ja
Probe für Düsseldorf			_	1	nein
				2	ja
weitere Informationen			_	1	nein
				2	ja
	wenn ja, welche:		.....		
			…….		
			….....		
^{14}C-Probennummer	Hv-Nr		_ _ _ _ _		
	Probencharakter		_ _ _	711	Kollagen
				713	Aatit
				xxx	Fett

Anhang 13: Anlistung der 99 ^{14}C-Konzentrationen in Kollagen aus Knochen und Knorpel, eigene und Literatur-Daten.

a) prämoderne und forensische Fälle (eigene Messungen und Literaturdaten)

ID	Proben-Nr.		G	SR	Alter	Geburtsdatum		Sterbe- bzw. Auffindungs-datum		$\Delta^{14}C$	s	$\delta^{13}C$	Kommentar
1	Hv-18628		5	2	59	00.00.	1869	00.07.	1928	99,2	1,30	-28,5	(65 +/- 105 a); aus Grabauflassung Friedhof
2	Hv-18319		2	2	[25]			00.00.	1990	86,5	0,70	-24,7	(1150 ± 70 a)
3	Hv-19410		1	1	[39]			00.00.	1993	97,8	0,60	-25,6	(Neurocranium) (180 ± 50 a)
4	Hv-19430		2	2	[42]			00.00.	1990	97,5	0,80	-28,2	(205 ± 65 a)
5	Hv-18626		2	2	[44]			00.00.	1986	98,3	1,10	-24,3	(140 ± 85 a); 1945 auf Helgoland gefallener Soldat
6	Hv-18331		1	2	[__]			29.09.	1980	113,8	1,00	-26,3	nicht identifiziert
7	Hv-19511		4	2	[__]			00.00.	1992	121,7	1,10	-25,5	nicht identifiziert
8	Hv-19507		3	2	[__]			00.00.	1993	135,2	0,90	-23,1	nicht identifiziert
9	Hv-18354	*	1	2	[29]			00.03.	1980	139,0	1,40	-25,2	nicht identifiziert
10	Hv-19506		4	2	[__]			00.00.	1992	139,2	0,80	-23,2	nicht identifiziert
11	Hv-19512		1	2	[26]			00.00.	1992	150,9	0,80	-23,9	nicht identifiziert; Wasserleiche
12	ETH-13435		2	1	[>60]			00.00.	1994	98,8	0,70	-21,1	1680-1754 (26,7 %), 1804-1937 (72,6 %), 1954-1956 (0,7 %)
13	ETH-14202		1	1	[43]			00.00.	1995	108,1	0,70	-21,4	
14	ETH-		1	1	[26]			00.00.	1995	116,5	0,60		
15		**	5	2	[84]	00.00.	1900	00.00.	1992	118,2	0,74	-23,6	ROM ET AL. 1998, WILD ET AL. 2000, Langknochen, Emma, ca. 85jährig verstorben 1988?
16		**	5	2	[84]	00.00.	1903	00.00.	1992	112,3	0,89	-19,2	ROM ET AL. 1998, WILD ET AL. 2000, Langknochen, Valerie, ca. 85jährig verstorben 1989?
17			5	2	[84]	00.00.	1903	00.00.	1992	123,7	0,84	-18,0	ROM ET AL. 1998, WILD ET AL. 2000, Rippe, Valerie M., ca. 85jährig verstorben 1989?
18			3	2	0			00.00.	1995	112,2	0,88	-14,2	WILD ET AL. 2000, Langknochen, Neugeborenes, gestorben 1994/1995

Legende:	G	Geschlecht	1	männlich
			2	eher männlich
			3	fraglich
			4	eher weiblich
			5	weiblich
			leer	fehlende Angabe
	SR	Skelettregion	1	kranial
			2	postkranial
			3	kranial und postkranial
			leer	fehlende Angabe
		Proben-Nmmer	a, b, c	Proben vom selben Individuum
			*	auch Apatit-Probe gemessen
			**	auch Fett-Probe gemessen
			***	auch Apatit-und Fett-Probe gemessen
		Alter		= Sterbejahr - Geburtsjahr

Anhang 13: Anlistung der 99 ^{14}C-Konzentrationen in Kollagen aus Knochen und Knorpel, eigene und Literatur-Daten (Fortsetzung).

b) Sektionsmaterial (Literaturdaten)

ID	Proben-Nr.		G	SR	Alter	Geburtsdatum		Sterbe- bzw. Auffindungs-datum		$\Delta^{14}C$	s	$\delta^{13}C$	Kommentar
19	UCLA-852		3		3	00.00.	1962	07.12.	1965	166,2			BERGER UND LIBBY 1967, Knorpelkollagen
20	UCLA-853		3		8	00.00.	1958	02.01.	1966	148,6			BERGER/UND LIBBY 1967, Knorpelkollagen; Lungenembolie
21	UCLA-854		3		9	00.00.	1956	15.12.	1965	141,0			BERGER UND LIBBY 1967, Knorpelkollagen, Pathologie: chronic renal failure
22	UCLA 855		3		25	00.00.	1940	14.12.	1965	129,4			BERGER UND LIBBY 1967, Knorpelkollagen, Pathologie: Systematic lupus erythrematosis
23			1		73	00.00.	1891	09.01.	1964	[99,4]			LIBBY ET AL. 1964; [-0,6] zu dem Referenzwert von 1890; Knorpelkollagen; Pathologie: Anemie, Diab. mell., Pneumonie
24			1		73	00.00.	1891	21.01.	1964	[100,3]			LIBBY ET AL. 1964; [+0,3] zu dem Referenzwert von 1890; Knorpelkollagen; Pathologie: Blasenkrebs und extensive Metastasen
*25		*	5	2	20	00.00.	1947	00.00.	1967	131,8	0,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
*26		*	5	2	20	00.00.	1947	00.00.	1967	126,8	0,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
27			5	2	30	00.00.	1937	00.00.	1967	117,3	0,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
28		*	1	2	61	00.00.	1906	00.00.	1967	111,8	0,50		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
29		*	1	2	65	00.00.	1902	00.00.	1967	106,6	0,40		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
30		*	5	2	65	00.00.	1902	00.00.	1967	115,3	0,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
31		*	5	2	65	00.00.	1902	00.00.	1967	118,4	0,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
32		*	1	2	69	00.00.	1898	00.00.	1967	110,7	0,40		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
33		*	5	2	70	00.00.	1897	00.00.	1967	114,2	0,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
34		*	5	2	75	00.00.	1892	00.00.	1967	123,6	0,40		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
35		*	1	2	79	00.00.	1888	00.00.	1967	108,0	0,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
36		*		2	69	00.00.	1898	00.00.	1967	113,6	2,00		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A, Durchschnittswert für die acht senilen Inidividuen
37		*	1	2	56	00.00.	1912	00.00.	1968	107,5	0,70		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
38		*	1	2	56	00.00.	1912	00.00.	1968	119,1	1,00		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
39		*	1	2	56	00.00.	1912	00.00.	1968	111,7	1,30		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
40		*	1	2	56	00.00.	1912	00.00.	1968	114,5	0,90		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
41		*	5	2	57	00.00.	1911	00.00.	1968	116,6	0,80		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
42		*	5	2	57	00.00.	1911	00.00.	1968	114,1	0,80		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
43		*	5	2	85	00.00.	1883	00.00.	1968	107,6	1,10		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
44		*	5	2	85	00.00.	1883	00.00.	1968	125,7	0,80		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)

* Berechnung der Mittelwerte für $\Delta^{14}C$ und s aus den Messungen für ID 25 und ID 26 nach Formel 12 in Kapitel IV 3.2: $\Delta^{14}C = 129,3$, s = 0,42; Wert wird teilweise unter ID 100 geführt

Anhang 13: Anlistung der 99 ^{14}C-Konzentrationen in Kollagen aus Knochen und Knorpel, eigene und Literatur-Daten (Fortsetzung).

b) Sektionsmaterial (Literaturdaten, Fortsetzung)

ID	Proben-Nr.		G	SR	Alter	Geburtsdatum		Sterbe- bzw. Auffindungs-datum		$\Delta^{14}C$	s	$\delta^{13}C$	Kommentar
45		*	5	2	85	00.00.	1883	00.00.	1968	102,1	0,80		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
46		*	5	2	85	00.00.	1883	00.00.	1968	114,9	0,80		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
47		*	1	2	88	00.00.	1880	00.00.	1968	110,3	0,50		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
48		*	1	2	88	00.00.	1880	00.00.	1968	118,2	0,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
49		**	1	2	30	00.00.	1965	00.00.	1995	141,1	1,20	-16,1	ROM ET AL. 1998, WILD ET AL. 2000, Langknochen, 3 weitere Kollagenproben gemessen mit anderer Aufbereitungsmethode
50			5		37	00.00	1932	00.09.	1969	125,7	0,70		HARKNESS/WALTON 1972; Pathologie: Erkrankung der Herzkranzgefäße
51			1		72	00.00.	1899	00.03.	1971	110,4	2,70		STENHOUSE/BAXTER 1977

Legende:				
	Geschlecht	G	1	männlich
			2	eher männlich
			3	fraglich
			4	eher weiblich
			5	weiblich
			leer	fehlende Angabe
	Skelettregion	SR	1	kranial
			2	postkranial
			3	kranial und postkranial
			leer	fehlende Angabe
	Proben-Nmmer		a, b, c	Proben vom selben Individuum
			*	auch Apatit-Probe gemessen
			**	auch Fett-Probe gemessen
			***	auch Apatit-und Fett-Probe gemessen
	Alter			= Sterbejahr - Geburtsjahr

Anhang 13: Anlistung der 99 ^{14}C-Konzentrationen in Kollagen aus Knochen und Knorpel, eigene und Literatur-Daten (Fortsetzung).

c) Asservate (eigene Messwerte)

ID.	Proben-Nr.		G	SR	Alter	Geburtsdatum		Sterbe- bzw. Auffindungs-datum		$\Delta^{14}C$	s	$\delta^{13}C$	Kommentar
52	Hv-18625		5	2	80	21.12.	1902	08.11.	1983	132,8	1,60	-26,0	Pathologie: Osteoporose und Collumfraktur (großer Knochenkallus)
53	Hv-19509		5	2	81	00.00.	1910	00.00.	1991	122,9	0,90	-23,4	Pathologie: Osteoporose
54	Hv-20748		1	2	72	00.00.	1902	00.00.	1974	116,3	0,70	-23,7	
55	Hv-18627		1	2	78	24.10.	1903	05.09.	1982	113,7	1,20	-27,6	
56	Hv-20750		1	2	73	00.00.	1912	30.07.	1985	115,3	0,70	-24,9	
57	Hv-18324		1	1	76	00.00.	1913	00.00.	1989	113,5	0,90	-25,1	(Viscerocranium)
58	Hv-18346	*	1	2	54	01.11.	1924	15.05.	1979	111,2	1,20	-27,3	
59	Hv-18342	***	1	2	46	00.00.	1928	00.00.	1974	112,7	1,20	-25,8	
60	Hv-18332		5	2	48	00.00.	1930	00.00.	1978	110,9	1,20	-24,3	
61	Hv-19501		1	2	59	00.00.	1932	00.00.	1991	113,0	0,70	-24,7	
62	Hv-18397		1	2	42	08.11.	1934	28.09.	1977	136,5	1,40	-25,0	Pathologie ?
63	Hv-20749		1	3	31	10.07.	1935	29.10.	1966	114,2	0,70	-24,6	
64	Hv-20751		1	3	50	00.00.	1935	07.02.	1985	126,3	0,90	-22,9	
65	Hv-18334	**	1	2	24	00.00.	1937	01.01.	1961	105,5	0,80	-25,3	
66	Hv-18338	***	1	1	48	00.00.	1937	00.00.	1985	111,4	1,20	-26,7	(Neurocranium)
67	Hv-18330		1	2	46	16.05.	1938	05.02.	1985	118,9	1,20	-24,3	
68	Hv-18328		1	1	49	00.00.	1938	00.00.	1987	113,6	0,70	-25,8	(Neurocranium)
69	Hv-19499		1	2	53	00.00.	1938	00.00.	1991	109,0	0,80	-23,5	
70	Hv-19504		1	2	54	00.00.	1938	00.00.	1992	125,9	0,90	-24,0	
71	Hv-18325		1	1	50	00.00.	1939	15.06.	1989	115,2	1,10	-26,7	(Viscerocranium)
72	Hv-18340	*	1	2	41	23.12.	1939	07.04.	1981	120,8	0,80	-27,3	
73	Hv-18329		1	1	46	00.00.	1940	09.09.	1986	114,6	0,80	-27,0	(Neurocranium)
74	Hv-18326		5	1	45	00.00.	1944	00.00.	1989	125,1	1,00	-23,8	(Viscerocranium)
75	Hv-19503		5	2	46	00.00.	1945	00.00.	1991	122,3	0,70	-22,7	
76	Hv-20752		1	2	34	00.00.	1947	30.09.	1981	142,8	1,20	-23,2	
77	Hv-18327		1	1	41	00.00.	1947	13.04.	1988	147,9	1,10	-25,1	(Neurocranium)
78	Hv-18333		1	1	24	00.00.	1948	00.00.	1972	134,3	1,30	-26,7	(Neurocranium)
79	Hv-18344	***	1	2	19	00.00.	1948	23.02.	1967	131,6	0,90	-24,4	
80	Hv-18352	*	1	2	24	10.12.	1951	00.06.	1976	140,0	2,40	-19,2	Argentinien
81	Hv-19497		1	2	40	00.00.	1952	00.00.	1992	143,8	0,90	-25,2	chron. Alkoholabusus, obdachlos
82	Hv-19508		1	2	36	00.00.	1954	00.00.	1990	138,1	0,80	-24,2	
83	Hv-19502		1	2	36	00.00.	1955	00.00.	1991	151,0	1,00	-22,7	
84	Hv-19510		1	2	35	00.00.	1956	00.00.	1991	136,0	0,90	-23,0	
85	Hv-19500		1	2	33	00.00.	1958	00.00.	1991	143,6	1,20	-23,8	
86	Hv-19513		1	2	33	00.00.	1958	00.00.	1991	142,4	0,80	-21,7	
87	Hv-18348	*	1	2	19	01.10.	1960	00.00.	1980	143,4	1,00	-26,6	
88	Hv-18318		1	2	26	10.10.	1963	00.00.	1990	131,5	0,90	-24,3	
89	Hv-19505		1	2	29	00.00.	1963	00.00.	1992	128,4	0,80	-23,1	
90	Hv-18320		5	1	24	00.00.	1966	26.07.	1990	125,5	1,00	-27,1	(Viscerocranium)

Anhang 13: Anlistung der 99 ^{14}C-Konzentrationen in Kollagen aus Knochen und Knorpel, eigene und Literatur-Daten (Fortsetzung).

c) Asservate (eigene Messwerte, Fortsetzung)

ID	Proben-Nr.		G	SR	Alter	Geburtsdatum		Sterbe- bzw. Auffindungs-datum		$\Delta^{14}C$	s	$\delta^{13}C$	Kommentar
91	Hv-18321		1	1	24	00.00.	1966	30.07.	1990	122,7	1,00	-26,6	(Viscerocranium)
92	Hv-18322		1	1	23	00.00.	1967	20.11.	1990	124,2	0,90	-24,3	(Viscerocranium)
93	Hv-19496		1	2	20	00.00.	1969	00.00.	1989	124,0	0,80	-23,9	
94	Hv-20906		1	2	19	00.00.	1971	00.00.	1990	120,7	0,90	-22,9	li Tibia: 4. Viertel der physiologischen, proximalen Diaphysenhälfte
95	Hv-20907		1	2	19	00.00.	1971	00.00.	1990	123,1	1,00	-22,4	li Tibia: 2. Viertel der physiologischen, proximalen Diaphysenhälfte
96	Hv-20908		1	2	19	00.00.	1971	00.00.	1990	125,0	0,90	-25,5	li Tibia: physiologische, distale Diaphysenhälfte
97	Hv-18323		1	2	17	14.09.	1972	23.07.	1990	118,6	1,10	-27,5	
98	Hv-19498		1	2	18	00.00.	1973	00.00.	1991	120,7	0,80	-24,2	
99	Hv-18350	*	5	2	9	26.09.	1975	00.07.	1985	126,7	1,50	-27,0	1987 aufgefunden

Legende:	G	Geschlecht	1	männlich
			2	eher männlich
			3	fraglich
			4	eher weiblich
			5	weiblich
			leer	fehlende Angabe
	SR	Skelettregion	1	kranial
			2	postkranial
			3	kranial und postkranial
			leer	fehlende Angabe
		Proben-Nummer	a, b, c	Proben vom selben Individuum
			*	auch Kollagen-Probe gemessen
			**	auch Kollagen-Probe gemessen
			***	Gesamte 3 Fraktionen je Probe gemessen
		Alter		= Sterbejahr - Geburtsjahr

Anhang 14: Anlistung der ^{14}C-Konzentrationen in Apatit und Fett aus Knochen, eigene Messwerte und Literatur-Daten.

a) Apatit

ID	Proben-Nr.		G	SR	Alter	Geburtsdatum		Sterbe- bzw. Auffindungs-datum		$\Delta^{14}C$	s	$\delta^{13}C$	Kommentar
9	Hv-18353	*	1	2	[30]			00.03.	1980				Miniaturzählrohr, Ergebnis bis 2004 nicht mitgeteilt
*25		*	5	2	20	00.00.	1947	00.00.	1967	140,5	1,20		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
*26		*	5	2	20	00.00.	1947	00.00.	1967	139,5	1,20		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
28		*	1	2	61	00.00.	1906	00.00.	1967	122,6	1,30		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
29		*	1	2	65	00.00.	1902	00.00.	1967	121,0	0,70		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
30		*	5	2	65	00.00.	1902	00.00.	1967	127,6	1,70		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
31		*	5	2	65	00.00.	1902	00.00.	1967	131,0	1,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
32		*	1	2	69	00.00.	1898	00.00.	1967	127,1	0,90		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
33		*	5	2	70	00.00.	1897	00.00.	1967	128,6	0,80		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
34		*	5	2	75	00.00.	1892	00.00.	1967	129,4	2,00		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
35		*	1	2	79	00.00.	1888	00.00.	1967	119,0	1,00		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A
36		*		2	69	00.00.	1898	00.00.	1967	125,6	1,70		L´ORANGE UND ZIMEN 1968A, Durchschnittswert für die acht senilen Inidividuen
37		*	1	2	56	00.00.	1912	00.00.	1968	123,8	1,10		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
38		*	1	2	56	00.00.	1912	00.00.	1968	125,3	1,20		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
39		*	1	2	56	00.00.	1912	00.00.	1968	115,0	1,10		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
40		*	1	2	56	00.00.	1912	00.00.	1968	119,9	0,90		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
41		*	5	2	57	00.00.	1911	00.00.	1968	114,9	1,00		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
42		*	5	2	57	00.00.	1911	00.00.	1968	121,8	1,20		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
43		*	5	2	85	00.00.	1883	00.00.	1968	121,8	1,60		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
44		*	5	2	85	00.00.	1883	00.00.	1968	130,9	1,90		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
45		*	5	2	85	00.00.	1883	00.00.	1968	113,2	1,10		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
46		*	5	2	85	00.00.	1883	00.00.	1968	120,3	1,10		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
47		*	1	2	88	00.00.	1880	00.00.	1968	123,2	1,40		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Kompakta (Femur)
48		*	1	2	88	00.00.	1880	00.00.	1968	125,8	1,10		L´ORANGE UND ZIMEN 1969A, Spongiosa (Femur)
58	Hv-18345	*	1	2	54	01.11.	1924	15.05.	1979	107,3	1,30	-9,0	
59	Hv-18341	***	1	2	46	00.00.	1928	00.00.	1974	105,6	2,20	-15,3	
66	Hv-18337	***	1	1	48	00.00.	1937	00.00.	1985	116,1	2,00	-15,0	(Neurocranium)
72	Hv-18339	*	1	2	41	23.12.	1939	07.04.	1981	111,9	1,20	-14,3	
79	Hv-18343	***	1	2	19	00.00.	1948	23.02.	1967	132,5	1,50	-13,4	
80	Hv-18351	*	1	2	24	10.12.	1951	00.06.	1976				Argentinien, Miniaturzählrohr
87	Hv-18347	*	1	2	19	01.10.	1960	00.00.	1980	136,7	1,80	-14,0	
99	Hv-18349	*	5	2	9	26.09.	1975	00.07.	1985				Miniaturzählrohr

* Berechnung der Mittelwerte für $\Delta^{14}C$ und s aus den Messungen für ID 25 und ID 26 nach Formel 12 in Kapitel IV 3.2: $\Delta^{14}C = 140,0$, $s = 0,85$

Anhang 14: Anlistung der ^{14}C-Konzentrationen in Apatit und Fett aus Knochen, eigene Messwerte und Literatur-Daten (Fortsetzung)

b) Fett

ID	Proben-Nr.		G	SR	Alter	Geburtsdatum		Sterbe- bzw. Auffindungs-datum		$\Delta^{14}C$	s	$\delta^{13}C$	Kommentar
15		**	5	2	[84]	00.00.	1900	00.00.	1992	119,5	0,47	-23,5	WILD ET AL. 2000, Langknochen, Emma M., ca. 85jährig verstorben 1988?
16		**	5	2	[84]	00.00.	1903	00.00.	1992	118,4	0,52	-24,5	WILD ET AL. 2000, Langknochen, Valerie M., ca. 85jährig verstorben 1989?
49		**	1	2	30	00.00.	1962	00.00.	1995	113,7	0,55	-22,0	WILD ET AL. 2000, Langknochen, 3 weitere Kollagenproben gemessen, mit anderer Aufbereitungsmethode
59	Hv-20532	***	1	2	46	00.00.	1928	00.00.	1974	145,7	1,30	-25,4	
65	Hv-20531	**	1	2	24	00.00.	1937	01.01.	1961	51,7	2,20	-24,7	Aceton nicht vollständig entfernt?
66	Hv-20530	***	1	1	48	00.00.	1937	00.00.	1985	123,8	2,00	-25,5	(Neurocranium)
79	Hv-20533	***	1	2	19	00.00.	1948	23.02.	1967				Miniaturzählrohr, Ergebnis bis 2004 nicht mitgeteilt

Legende:	G	Geschlecht	1	männlich
			2	eher männlich
			3	fraglich
			4	eher weiblich
			5	weiblich
			leer	fehlende Angabe
	SR	Skelettregion	1	kranial
			2	postkranial
			3	kranial und postkranial
			leer	fehlende Angabe
		Proben-Nummer	a, b, c	Proben vom selben Individuum
			*	auch Kollagen-Probe gemessen
			**	auch Kollagen-Probe gemessen
			***	Gesamte 3 Fraktionen je Probe gemessen
		Alter		= Sterbejahr - Geburtsjahr

Anhang 15: Anlistung der ^{14}C-Konzentrationen in Kollagen, Apatit und Fett je ID. (siehe auch Anhang 13 und 14).

ID	Geschlecht	Alter	Geburtsjahr	Sterbejahr	Kollagen		Apatit		Fett	
					$\Delta^{14}C$	s	$\Delta^{14}C$	s	$\Delta^{14}C$	s
15	5	[84]	1900	1992	118,2	0,			119,5	0,4
16	5	[84]	1903	1992	112,3	0,			118,4	0,5
25	5	20	1947	1967	129,3	0,	140,0	1,20		
28	1	61	1906	1967	111,8	0,	122,6	1,30		
29	1	65	1902	1967	106,6	0,	121,0	0,70		
30	5	65	1902	1967	115,3	0,	127,6	1,70		
31	5	65	1902	1967	118,4	0,	131,0	1,60		
32	1	69	1898	1967	110,7	0,	127,1	0,90		
33	5	70	1897	1967	114,2	0,	128,6	0,80		
34	5	75	1892	1967	123,6	0,	129,4	2,00		
35	1	79	1888	1967	108,0	0,	119,0	1,00		
37	1	56	1912	1968	107,5	0,	123,8	1,10		
39	1	56	1912	1968	111,7	1,	115,0	1,10		
41	5	57	1911	1968	116,6	0,	114,9	1,00		
43	5	85	1883	1968	107,6	1,	121,8	1,60		
45	5	85	1883	1968	102,1	0,	113,2	1,10		
47	1	88	1880	1968	110,3	0,	123,2	1,40		
49	1	30	1965	1995	141,1	1,			113,7	0,5
58	1	54	1924	1979	111,2	1,	107,3	1,30		
59	1	46	1928	1974	112,7	1,	105,6	2,20	145,7	1,3
66	1	48	1937	1985	111,4	1,	116,1	2,00	123,8	2,0
72	1	41	1939	1981	120,8	0,	111,9	1,20		
79	1	19	1948	1967	131,6	0,	132,5	1,50		
87	1	19	1960	1980	143,4	1,	136,7	1,80		

Legende: Geschlecht 1 männlich
5 weiblich
Alter [84] nicht genau bekannt, 1992 Auffindungsjahr; Sterbejahr 1987 bis 1989 nach WILD ET AL. (2000) möglich
= Sterbejahr - Geburtsjahr

Anhang 16: Anlistung der ^{14}C-Konzentrationen für Kompakta und Spongiosa in Kollagen und Apatit je ID.
(siehe auch Anhang 13 und 14).

ID	Gewebeart	Geschlecht	Alter	Geburtsjahr	Sterbejahr	Kollagen		Apatit	
						$\Delta^{14}C$	s	$\Delta^{14}C$	s
37	Kompakta	1	56	1912	1968	107,5	0,70	123,8	1,10
38	Spongiosa	1	56	1912	1968	119,1	1,00	125,3	1,20
39	Kompakta	1	56	1912	1968	111,7	1,30	115,0	1,10
40	Spongiosa	1	56	1912	1968	114,5	0,90	119,9	0,90
41	Kompakta	5	57	1911	1968	116,6	0,80	114,9	1,00
42	Spongiosa	5	57	1911	1968	114,1	0,80	121,8	1,20
43	Kompakta	5	85	1883	1968	107,6	1,10	121,8	1,60
44	Spongiosa	5	85	1883	1968	125,7	0,80	130,9	1,90
45	Kompakta	5	85	1883	1968	102,1	0,80	113,2	1,10
46	Spongiosa	5	85	1883	1968	114,9	0,80	120,3	1,10
47	Kompakta	1	88	1880	1968	110,3	0,50	123,2	1,40
48	Spongiosa	1	88	1880	1968	118,2	0,60	125,8	1,10

Legende: Geschlecht 1 männlich
5 weiblich

Anhang 17: Anlistung der Skelettmassen nach Alter und Geschlecht (nach Daten von TROTTER und Co-Autoren).

Geschlecht	Rasse	Altersklassen																												
		0	n	0 <1	n	1 <2	n	2 <3	n	3 <4	4 <5	5 <6	6 <7	7 <8	8 <9	9 <10	10 <11	11 <12	12 <13	13 <14	14 <15	15 <16	16 <17	17 <18	18 <19	19 <20	20 <21	21 <22	22 <23
Männer	Negrid	82,5	9*	110,0	4*	225,0	8'	287,5		762,5			550,0		1437,5		1587,5	2325,0			2287,5		3525,0	2800,0	4237,5	3500,0	4575,0	4087,5	
		83,5	9**	150,0	6'	(260,2	13*)	437,5					962,5				1625,0				3450,0			2875,0	4262,5	4337,5	5450,0	4550,0	
		85,2	9***			375,0	1						1437,5				2300,0							3150,0	4525,0	4487,5		4850,0	
																								3325,0	4562,5	4587,5		5012,5	
																								3350,0	4762,5			5162,5	
																								3862,5	4925,0				
																								4537,5	5587,5				
																								4800,0					
	Europid	108,3	4*	95,8	7*	225,0	3'			712,5		675,0	350,0			1325,0			1600,0					1525,0	2875,0	4062,0	4450,0		5300,0
		109,5	4**	150,0	8'	(315,8	5*)			812,5			837,5												3450,0	5100,0			
		x117, 3	1***										950,0												4237,5				
																									4587,5				
Frauen	Negrid	89,3	11*	102,3	4*	225,0	2'	362,5		550,0	962,5	900,0	1012,5		1200,0		1050,0	2000,0		1400,0	2512,5		2950,0	2675,0	3075,0	3400,0	3337,5	3512,5	3500,0
		89,9	11**	150,0	5'	(382,3	7*)	462,5		662,5	1250,0				1375,0					2962,5		3150,0	2725,0	3225,0	3737,5	3600,0	3900,0	
		94,4	8***												1800,0							3187,5	2925,0	3375,0	3800,0			
																							3000,0						
	Europid	85,1	15*	71,0	3*	225,0	2'	187,5		600,0		450,0	550,0	775,0			1987,5		1337,5				2237,5		3025,0	2812,5			
		85,7	15**	150,0	3'			(268,4	4*)				687,5						1725,0										
		x95,7	9***					537,5					975,0						2100,0										
n		(105)		(40)		(41)		(10)		6	2	3	10	1	4	1	5	2	4	2	3	0	5	13	15	10	5	7	2

Für die Altersklasse 0 <1 wurde für TROTTER UND PETERSON (1970, fig. 2, S. 318) nur ein Durchschnittswert für alle 22 Individuen abgelesen
Für die Altersklasse 1 <2 wurde für TROTTER UND PETERSON (1970, fig. 2, S. 318) nur ein Durchschnittswert für alle 15 Individuen abgelesen

x mongolid
geschätzte Einzelwerte aus TROTTER UND PETERSON (1970, fig. 2, S. 318)
' geschätzte Mittelwerte aus TROTTER UND PETERSON (1970, fig. 2, S. 318)
* TROTTER UND HIXON (1974), () Mittelwert von Individuen zwischen 0,5 und 3,0 Jahren
** TROTTER UND PETERSON (1969a)
*** TROTTER UND PETERSON (1969b)

Anhang 18: Gegenüberstellung der Skelettmassen für negride Frauen.
(nach Daten von TROTTER UND PETERSON 1970).

Altersklasse	rekonstruiert nach figure 2, S. 318	Originalwert table 3, S. 322	Differenz	%Differenz
0<1	150,00	86,52	63,48	73,37
	150,00	86,95	63,05	72,51
	150,00	103,08	46,92	45,52
	150,00	131,85	18,15	13,77
	150,00	145,30	4,70	3,23
1<2	225,00	233,31	-8,31	-3,56
	225,00	271,66	-46,66	-17,18
2<3	362,50	358,52	3,98	1,11
	462,50	445,54	16,96	3,81
3<4	550,00	540,70	9,30	1,72
	662,50	681,90	-19,40	-2,84
4<5	962,50	966,58	-4,08	-0,42
	1250,00	1266,30	-16,30	-1,29
5<6	900,00	910,18	-10,18	-1,12
6<7	1012,50	1038,32	-25,82	-2,49
8<9	1200,00	1209,90	-9,90	-0,82
	1375,00	1379,50	-4,50	-0,33
	1800,00	1804,10	-4,10	-0,23
10<11	1050,00	1072,70	-22,70	-2,12
11<12	2000,00	2026,00	-26,00	-1,28
13<14	1400,00	1412,80	-12,80	-0,91
	2962,50	2990,60	-28,10	-0,94
14<15	2512,50	2577,90	-65,40	-2,54
16<17	2950,00	2974,50	-24,50	-0,82
	3150,00	3191,80	-41,80	-1,31
	3187,50	3234,60	-47,10	-1,46
17<18	2675,00	2700,10	-25,10	-0,93
	2725,00	2765,90	-40,90	-1,48
	2925,00	2962,10	-37,10	-1,25
	3000,00	3026,00	-26,00	-0,86
18<19	3075,00	3099,80	-24,80	-0,80
	3225,00	3259,00	-34,00	-1,04
	3375,00	3437,80	-62,80	-1,83
19<20	3400,00	3473,60	-73,60	-2,12
	3737,50	3807,10	-69,60	-1,83
	3800,00	3847,70	-47,70	-1,24
20<21	3337,50	3380,10	-42,60	-1,26
	3600,00	3649,60	-49,60	-1,36
21<22	3512,50	3571,60	-59,10	-1,65
	3900,00	3969,50	-69,50	-1,75
22<23	3500,00	3539,30	-39,30	-1,11

ab Altersklasse 2<3:

MW	-30,42	-1,02
s	23,16	1,22
Min	-73,60	-2,84
Median	-27,05	-1,26
Max	23,16	3,81

Für die Altersklasse 0 < 1 wurde nur ein Durchschnittswert für alle 22 Individuen abgelesen (siehe Anhang 17)
Für die Altersklasse 1 < 2 wurde nur ein Durchschnittswert für alle 15 Individuen abgelesen (siehe Anhang 17)

Anhang 19: Skelettmassen für „White Ohio“.
(nach Daten von GARN (1970)

a) Männer
b) Frauen.

a)

Alter	l [mm]***	d_T [mm]*	d_M [mm]**	SM [g]***	SM_{netto}° [g]	SM -12% [g]^	SM +12% [g]^
0				0	0	0	0
1 <2	26,00	4,51	3,04	222	220	195	249
2 <4	30,60	5,12	3,26	353	363	311	395
4 <6	37,90	5,54	3,06	595	615	524	666
6 <8	44,90	6,07	3,09	944	933	831	1057
8 <10	50,20	6,60	3,17	1274	1280	1121	1427
10 <12	55,00	7,17	3,29	1716	1699	1510	1922
12 <14	60,60	7,75	3,44	2273	2224	2000	2546
14 <16	67,10	8,56	3,66	3075	3058	2706	3444
16 <18	73,20	9,11	3,82	3809	3811	3352	4266
18 <29	73,90	9,30	3,58	4139	4144	3642	4636
22		9,44	3,64				
30 <40	74,00	9,40	3,53	4288	4275	3773	4803
40 <50	74,00	9,34	3,60	4145	4183	3648	4642
50 <60	74,00	9,49	3,78	4267	4268	3755	4779
60 <70	74,00	9,68	4,37	4209	4202	3704	4714
70 <80	74,00	9,37	4,35	3886	3879	3420	4352
80	74,00	9,07	4,23	3671	3626	3230	4112

b)

Alter	l [mm]***	d_T [mm]*	d_M [mm]**	SM [g]***	SM_{netto}° [g]	SM -12% [g]^	SM+12% [g]^
0				0	0	0	0
1 <2	26,20	4,37	2,88	218	215	192	244
2 <4	31,30	4,94	3,14	343	346	302	384
4 <6	38,20	5,39	3,05	570	574	502	638
6 <8	45,60	5,77	3,02	857	839	754	960
8 <10	51,20	6,28	3,05	1171	1174	1030	1312
10 <12	56,60	6,81	3,27	1525	1537	1342	1708
12 <14	63,20	7,42	3,26	2113	2137	1859	2367
14 <16	67,40	7,80	2,93	2691	2681	2368	3014
16 <18	68,60	7,81	2,73	2799	2796	2463	3135
18 <29	67,50	7,91	2,75	2806	2826	2469	3143
22		7,96	2,65				
30 <40	67,10	7,93	2,63	2841	2858	2500	3182
40 <50	67,10	8,06	2,60	3004	2972	2644	3364
50 <60	67,10	7,93	2,69	2815	2842	2477	3153
60 <70	67,10	8,09	3,53	2724	2706	2397	3051
70 <80	67,10	8,34	4,38	2529	2572	2226	2832
80	67,10	8,29	5,00	2243	2233	1974	2512

l Länge des MC II
D_T Gesamtdurchmesser des MC II in der Diaphysenmitte
D_M Markhöhlendurchmesser des MC II in der Diaphysenmitte
SM Skelettmasse
* GARN 1970, tbl. II p. 15
** GARN 1970, tbl. VIII p. 26
*** GARN 1970, tbl. XXXIV p. 83
^ "RMS skeletal weight variability is circa 12 percent" (GARN 1970, tbl. XXXIV p. 83)
° $SM_{netto} = (d_T^2 - d_M^2) \times 0{,}7611 \times$ Länge MCII

Anhang 20: Prozentuale Entwicklung verschiedener anthropologischer Parameter zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung für Männer zwischen 0 und 40 Jahren (Literaturdaten).

Alters klasse [Jahre]	MC II						Tibia		Femur		Tibia		Körperhöhe		Körpermasse		Kalzium	
	l [mm][1]	%l_{max} [1]	f_C [mm²][1]	%f_{Cmax} [1]	SM [g][1]	%SM_{max} [1]	l [mm][2]	%l_{max} [2]	l [mm][3]	%l_{max} [3]	l [mm][3]	%l_{max} [3]	l [mm][4]	%KH_{max} [4]	[kg][4]	%KM_{max} [4]	[g][5]	%Ca_{max} [5]
1<2	26,00	35,18	8,80	14,72	222	5,36	108,7	28,60					764	43,46	10,7	16,36		
2<4	30,60	41,41	11,90	19,90	353	8,53	139,7	36,75					869	49,43	12,6	19,27		
3							163,2	42,94					1022	58,13	17,0	25,99		
4<6	37,90	51,29	16,20	27,09	595	14,38	183,3	48,22					1081	61,49	18,5	28,29		
5							201,8	53,09	255,2	55,00	202,5	55,43	1161	66,04	20,6	31,50		
6<8	44,90	60,76	21,70	36,29	944	22,81	219,2	57,67	277,4	59,78	219,2	60,01	1196	68,03	22,4	34,25		
7							235,7	62,01	296,8	63,97	234,3	64,14	1272	72,35	26,0	39,76	313	28,45
8<10	50,20	67,93	26,20	43,81	1274	30,78	252,0	66,30	318,0	68,53	250,0	68,44	1311	74,57	26,8	40,98	356	32,36
9							268,0	70,51	339,6	73,19	265,4	72,65	1377	78,33	31,3	47,86	361	32,82
10<12	55,00	74,42	32,20	53,85	1716	41,46	283,7	74,64	358,0	77,16	279,4	76,49	1440	81,91	34,8	53,21	332	30,18
11							299,0	78,66	375,0	80,82	292,0	79,93	1459	82,99	36,9	56,42	356	32,36
12<14	60,60	82,00	38,70	64,72	2273	54,92	314,2	82,66	393,1	84,72	307,2	84,10	1533	87,20	42,5	64,98	394	35,82
13							333,9	87,85	414,1	89,25	324,6	88,86	1615	91,87	48,8	74,62	386	35,09
14<16	67,10	90,80	47,30	79,10	3075	74,29	352,9	92,84	434,8	93,71	341,6	93,51	1665	94,71	55,1	84,25	520	47,27
15							366,6	96,45	453,3	97,69	358,7	98,19	1715	97,55	61,3	93,73	652	59,27
16<18	73,20	99,05	53,70	89,80	3809	92,03	375,4	98,76	462,7	99,72	365,3	100,00	1736	98,75	63,4	96,94	674	61,27
17							379,0	99,71	464,0	100,00	364,9		1758	100,00	65,4	100,00	768	69,82
18<29	73,90	100,00	57,80	96,66	4139	100,00	380,1	100,00	461,6		364,2						816	74,18
19																	857	77,91
20																	898	81,64
21<30																	1100	100,00
30<40			59,80	100,00														

1 Länge (l) des Metacarpus II (MC II), Kompakta-Fläche (f_C) des MC II und Skelettmasse (SM) nach GARN (1970)
2 Länge (l) der Tibia nach MAAT (1984)
3 Länge (l) von Tibia und Femur nach ANDERSON UND GREENLAND (1948)
4 Körperhöhe und Körpergewicht nach FLÜGEL ET AL. (1986)
5 Kalzium nach CHRISTIANSEN (1975a, b)
%(Wert) je Altersklasse vom jeweiligen Maximalwert

Anhang 21: Prozentuale Entwicklung verschiedener anthropologischer Parameter zur Beschreibung der Skelettmasse-Entwicklung für Frauen zwischen 0 und 40 Jahren (Literaturdaten).

Alters klasse [Jahre]	MC II						Tibia		Femur		Tibia		Körperhöhe		Körpermasse		Kalzium	
	l [mm][1]	%l_{max}[1]	f_C [mm²][1]	%f_{Cmax}[1]	SM [g][1]	%SM_{max}[1]	l [mm][2]	%l_{max}[2]	l [mm][3]	%l_{max}[3]	l [mm][3]	%l_{max}[3]	l [mm][4]	%KH_{max}[4]	[kg][4]	%KM_{max}[4]	[g][5]	%Ca_{max}[5]
0							70,0	20,18					518	31,60	3,4	5,86		
1<2	26,20	38,19	8,60	18,61	218	7,77	107,7	31,06					756	46,13	10,0	17,24		
2<4	31,30	45,63	11,30	24,46	343	12,22	137,5	39,65					859	52,41	12,2	21,03		
3							161,0	46,42					1013	61,81	16,3	28,10		
4<6	38,20	55,69	15,40	33,33	570	20,31	181,5	52,34					1072	65,41	17,7	30,52		
5							200,6	57,84	259,8	61,07	205,2	60,44	1151	70,23	20,9	36,03		
6<8	45,60	66,47	19,40	41,99	857	30,54	218,3	62,95	281,8	66,24	223,6	65,86	1210	73,83	22,8	39,31	237	32,20
7							235,6	67,94	303,1	71,25	240,7	70,90	1261	76,94	25,5	43,97	280	38,04
8<10	51,20	74,64	23,60	51,08	1171	41,73	252,5	72,81	321,9	75,67	254,9	75,08	1302	79,44	26,8	46,21	280	38,04
9							269,3	77,65	341,2	80,21	269,4	79,35	1372	83,71	31,1	53,62	291	39,54
10<12	56,60	82,51	27,80	60,17	1525	54,35	285,9	82,44	356,5	83,80	282,4	83,18	1427	87,07	36,9	63,62	305	41,44
11							302,6	87,25	374,4	88,01	297,5	87,63	1483	90,48	39,1	67,41	426	57,88
12<14	63,20	92,13	34,50	74,68	2113	75,30	321,8	92,79	392,0	92,15	312,4	92,02	1546	94,33	44,4	76,55	466	63,32
13							330,7	95,36	411,8	96,80	328,8	96,85	1600	97,62	51,9	89,48	496	67,39
14<16	67,40	98,25	41,20	89,18	2691	95,90	340,5	98,18	420,6	98,87	335,2	98,73	1622	98,96	52,5	90,52	534	72,55
15							345,6	99,65	424,4	99,76	338,3	99,65	1629	99,39	54,9	94,66	531	72,15
16<18	68,60	100,00	42,10	91,13	2799	99,75	346,8	100,00	425,4	100,00	339,5	100,00	1635	99,76	56,6	97,59	572	77,72
17													1639	100,00	58,0	100,00	631	85,73
18<29	67,50		42,90	92,86	2806	100,00											623	84,65
19																	685	93,07
20<30																	698	94,84
30<40			43,70	94,59													736	100,00
40<50			46,20	100,00														

1 Länge (l) des Metacarpus II (MC II), Kompakta-Fläche (f_C) des MC II und Skelettmasse (SM) nach GARN (1970)
2 Länge (l) der Tibia nach MAAT (1984)
3 Länge (l) von Tibia und Femur nach ANDERSON UND GREENLAND (1948)
4 Körperhöhe und Körpergewicht nach FLÜGEL ET AL. (1986)
5 Kalzium nach CHRISTIANSEN (1975a, b)
%(Wert) je Altersklasse vom jeweiligen Maximalwert

Anhang 22: Skelettmassen für Individen von der Geburt bis zur Mitte des dritten Lebensjahrzehnts (Literaturdaten).

lfd. Nr.		Alter [a] UG	OG	MW	Geschlecht	Rasse	Skelettmasse [g]	n	Gewichtungs-faktor	Literatur
1		0	0	0,0	1	1	82,5	9	30,00	9
2		0	0	0,0	1	1	83,5	9	30,00	2
3		0	0	0,0	1	1	85,2	9	30,00	3
4		0	0	0,0	1	2	108,3	4	20,00	9
5		0	0	0,0	1	2	109,5	4	20,00	2
6		0	0	0,0	1	3	117,3	1	10,00	3
7		0	0	0,0	5	1	89,3	11	33,17	9
8		0	0	0,0	5	1	89,9	11	33,17	2
9		0	0	0,0	5	1	94,4	8	28,28	3
10		0	0	0,0	5	2	85,1	15	38,73	9
11		0	0	0,0	5	2	85,7	15	38,73	2
12		0	0	0,0	5	3	95,7	9	30,00	3
13		0	1	0,5	1	1	110,0	4	4,00	9
14		0	1	0,5	1	1	124,6	1	2,00	6
15		0	1	0,5	1	1	150,0	6	4,90	1
16		0	1	0,5	1	2	95,8	7	5,29	9
17		0	1	0,5	1	2	150,0	8	5,66	1
18		0	1	0,5	5	1	102,3	4	4,00	9
19		0	1	0,5	5	1	150,0	5	4,47	1
20		0	1	0,5	5	1	202,6	1	2,00	6
21		0	1	0,5	5	2	71,0	3	3,46	9
22		0	1	0,5	5	2	150,0	3	3,46	1
23	**			1,0	1	2	222,0	144	12,00	5
24	**			1,0	5	2	218,0	141	11,87	5
25		1	2	1,5	1	1	225,0	8	1,89	1
26		1	2	1,5	1	1	375,0	1	0,67	1
27		1	2	1,5	1	2	225,0	3	1,15	1
28		1	2	1,5	5	1	104,0	1	0,67	6
29		1	2	1,5	5	1	225,0	2	0,94	1
30		1	2	1,5	5	1	259,8	1	0,67	6
31		1	2	1,5	5	2	225,0	2	0,94	1
32	**	0,5	3	1,8	1	1	260,2	13	2,06	9
33	**	0,5	3	1,8	1	2	315,8	5	1,28	9
34	**	0,5	3	1,8	5	1	382,3	7	1,51	9
35	**	0,5	3	1,8	5	2	268,4	4	1,14	9
36	**			2,0	1	2	368,0	174	6,60	5
37	**			2,0	5	2	363,0	164	6,40	5
38		2	3	2,5	1	1	287,5	1	0,40	1
39		2	3	2,5	1	1	437,5	1	0,40	1
40		2	3	2,5	5	1	362,5	1	0,40	1
41		2	3	2,5	5	1	462,5	1	0,40	1
42		2	3	2,5	5	2	187,5	1	0,40	1
43		2	3	2,5	5	2	537,5	1	0,40	1
44	**	2	4	3,0	1	2	353,0	25	1,67	10

Anhang 22: Skelettmassen für Individuen von der Geburt bis zur Mitte des dritten Lebensjahrzehnts (Literaturdaten, Fortsetzung).

lfd. Nr.		Alter [a] UG	OG	MW	Geschlecht	Rasse	Skelettmasse [g]	n	Gewichtungs-faktor	Literatur
45	**	2	4	3,0	5	2	343,0	25	1,67	10
46		3	4	3,5	1	1	762,5	1	0,29	1
47		3	4	3,5	1	2	712,5	1	0,29	1
48		3	4	3,5	1	2	812,5	1	0,29	1
49		3	4	3,5	5	1	550,0	1	0,29	1
50		3	4	3,5	5	1	662,5	1	0,29	1
51		3	4	3,5	5	2	600,0	1	0,29	1
52				3,5	5		640,0	1	0,29	5
53	**			4,0	1	2	632,0	164	3,20	5
54	**			4,0	5	2	603,0	160	3,16	5
55		4	5	4,5	5	1	962,5	1	0,22	1
56	x	4	5	4,5	5	1	1250,0	1	0,22	1
57				4,5	5		680,0	1	0,22	5
58	**	4	6	5,0	1	2	595,0	25	1,00	10
59				5,0	1		824,0	1	0,20	5
60	**	4	6	5,0	5	2	570,0	25	1,00	10
61		5	6	5,5	1	2	675,0	1	0,18	1
62		5	6	5,5	5	1	900,0	1	0,18	1
63		5	6	5,5	5	2	450,0	1	0,18	1
64		5	6	5,5	5		770,0	1	0,18	5
65	**			6,0	1	2	979,0	146	2,01	5
66	**			6,0	5	2	869,0	137	1,95	5
67		6	7	6,5	1	1	550,0	1	0,15	1
68		6	7	6,5	1	1	962,5	1	0,15	1
69		6	7	6,5	1	1	1437,5	1	0,15	1
70	x	6	7	6,5	1	2	350,0	1	0,15	1
71		6	7	6,5	1	2	837,5	1	0,15	1
72		6	7	6,5	1	2	950,0	1	0,15	1
73		6	7	6,5	5	1	1012,5	1	0,15	1
74		6	7	6,5	5	2	550,0	1	0,15	1
75		6	7	6,5	5	2	687,5	1	0,15	1
76		6	7	6,5	5	2	975,0	1	0,15	1
77	**	6	8	7,0	1	2	944,0	25	0,71	10
78	**	6	8	7,0	5	2	857,0	25	0,71	10
79		7	8	7,5	5	2	775,0	1	0,13	1
80		7	8	7,5	5		937,0	1	0,13	5
81	**			8,0	1	2	1315,0	133	1,44	5
82	**			8,0	5	2	1190,0	118	1,36	5
83		8	9	8,5	1	1	1437,5	1	0,12	1
84		8	9	8,5	5	1	1200,0	1	0,12	1
85		8	9	8,5	5	1	1375,0	1	0,12	1
86		8	9	8,5	5	1	1800,0	1	0,12	1
87	**	8	10	9,0	1	2	1274,0	25	0,56	10
88	**	8	10	9,0	5	2	1171,0	25	0,56	10

Anhang 22: Skelettmassen für Individuen von der Geburt bis zur Mitte des dritten Lebensjahrzehnts (Literaturdaten, Fortsetzung).

lfd. Nr.		Alter [a] UG	OG	MW	Geschlecht	Rasse	Skelettmasse [g]	n	Gewichtungs-faktor	Literatur
89		9	10	9,5	1	2	1325,0	1	0,11	1
90	**			10,0	1	2	1761,0	118	1,09	5
91	**			10,0	5	2	1536,0	109	1,04	5
92		10	11	10,5	1	1	1587,5	1	0,10	1
93		10	11	10,5	1	1	1625,0	1	0,10	1
94		10	11	10,5	1	1	2300,0	1	0,10	1
95		10	11	10,5	1		1247,0	1	0,10	5
96		10	11	10,5	5	1	1050,0	1	0,10	1
97		10	11	10,5	5	2	1987,5	1	0,10	1
98	**	10	12	11,0	1	2	1716,0	25	0,45	10
99	**	10	12	11,0	5	2	1525,0	25	0,45	10
100		11	12	11,5	1	1	2325,0	1	0,09	1
101		11	12	11,5	5	1	2000,0	1	0,09	1
102	**			12,0	1	2	2319,0	101	0,84	5
103	**			12,0	5	2	2113,0	94	0,81	5
104		12	13	12,5	1	2	1600,0	1	0,08	1
105		12	13	12,5	5	2	1337,5	1	0,08	1
106		12	13	12,5	5	2	1725,0	1	0,08	1
107		12	13	12,5	5	2	2100,0	1	0,08	1
108	**	12	14	13,0	1	2	2273,0	25	0,38	10
109	**	12	14	13,0	5	2	2113,0	25	0,38	10
110	x	13	14	13,5	5	1	1400,0	1	0,07	1
111	x	13	14	13,5	5	1	2962,5	1	0,07	1
112	**			14,0	1	2	3145,0	84	0,65	5
113	**			14,0	5	2	2685,0	81	0,64	5
114		14	15	14,5	1	1	2287,5	1	0,07	1
115		14	15	14,5	1	1	3450,0	1	0,07	1
116		14	15	14,5	5	1	2512,5	1	0,07	1
117	**	14	16	15,0	1	2	3075,0	25	0,33	10
118	**	14	16	15,0	5	2	2691,0	25	0,33	10
119	**			16,0	1	2	3831,0	70	0,52	5
120	**			16,0	5	2	2791,0	74	0,54	5
121		16	17	16,5	1	1	3525,0	1	0,06	1
122		16	17	16,5	5	1	2950,0	1	0,06	1
123		16	17	16,5	5	1	3150,0	1	0,06	1
124		16	17	16,5	5	1	3187,5	1	0,06	1
125		16	17	16,5	5	2	2237,5	1	0,06	1
126	**	16	18	17,0	1	2	3809,0	25	0,29	10
127	**	16	18	17,0	5	2	2799,0	25	0,29	10
128		17	18	17,5	1	1	2800,0	1	0,06	1
129		17	18	17,5	1	1	2875,0	1	0,06	1
130		17	18	17,5	1	1	3150,0	1	0,06	1

Anhang 22: Skelettmassen für Individuen von der Geburt bis zur Mitte des dritten Lebensjahrzehnts (Literaturdaten, Fortsetzung).

lfd. Nr.		Alter [a] UG	OG	MW	Geschlecht	Rasse	Skelettmasse [g]	n	Gewichtungs-faktor	Literatur
131		17	18	17,5	1	1	3325,0	1	0,06	1
132		17	18	17,5	1	1	3350,0	1	0,06	1
133		17	18	17,5	1	1	3862,5	1	0,06	1
134		17	18	17,5	1	1	4537,5	1	0,06	1
135		17	18	17,5	1	1	4800,0	1	0,06	1
136	x	17	18	17,5	1	2	1525,0	1	0,06	1
137		17	18	17,5	5	1	2675,0	1	0,06	1
138		17	18	17,5	5	1	2725,0	1	0,06	1
139		17	18	17,5	5	1	2925,0	1	0,06	1
140		17	18	17,5	5	1	3000,0	1	0,06	1
141	**			18,0	1	2	4140,0	65	0,45	5
142	**			18,0	5	2	2859,0	44	0,37	5
143		18	19	18,5	1	1	4237,5	1	0,05	1
144		18	19	18,5	1	1	4262,5	1	0,05	1
145		18	19	18,5	1	1	4525,0	1	0,05	1
146		18	19	18,5	1	1	4562,5	1	0,05	1
147		18	19	18,5	1	1	4762,5	1	0,05	1
148		18	19	18,5	1	1	4925,0	1	0,05	1
149	x	18	19	18,5	1	1	5587,5	1	0,05	1
150		18	19	18,5	1	2	2875,0	1	0,05	1
151		18	19	18,5	1	2	3450,0	1	0,05	1
152		18	19	18,5	1	2	4237,6	1	0,05	1
153		18	19	18,5	1	2	4587,5	1	0,05	1
154		18	19	18,5	5	1	3075,0	1	0,05	1
155		18	19	18,5	5	1	3225,0	1	0,05	1
156		18	19	18,5	5	1	3375,0	1	0,05	1
157		18	19	18,5	5	2	3025,0	1	0,05	1
158		19	20	19,5	1	1	3500,0	1	0,05	1
159		19	20	19,5	1	1	4337,5	1	0,05	1
160		19	20	19,5	1	1	4487,5	1	0,05	1
161		19	20	19,5	1	1	4587,5	1	0,05	1
162		19	20	19,5	1	2	4062,5	1	0,05	1
163		19	20	19,5	1	2	5100,0	1	0,05	1
164		19	20	19,5	5	1	3400,0	1	0,05	1
165		19	20	19,5	5	1	3737,5	1	0,05	1
166		19	20	19,5	5	1	3800,0	1	0,05	1
167		19	20	19,5	5	2	2812,5	1	0,05	1
168		20	21	20,5	1	1	4575,0	1	0,05	1
169		20	21	20,5	1	1	5450,0	1	0,05	1
170		20	21	20,5	1	2	4450,0	1	0,05	1
171		20	21	20,5	5	1	3337,5	1	0,05	1
172		20	21	20,5	5	1	3600,0	1	0,05	1
173		21	22	21,5	1	1	4087,5	1	0,05	1
174		21	22	21,5	1	1	4550,0	1	0,05	1

Anhang 22: Skelettmassen für Individuen von der Geburt bis zur Mitte des dritten Lebensjahrzehnts (Literaturdaten, Fortsetzung).

lfd. Nr.		Alter [a] UG	OG	MW	Geschlecht	Rasse	Skelettmasse [g]	n	Gewichtungs-faktor	Literatur
175		21	22	21,5	1	1	4850,0	1	0,05	1
176		21	22	21,5	1	1	5012,5	1	0,05	1
177		21	22	21,5	1	1	5162,5	1	0,05	1
178		21	22	21,5	5	1	3512,5	1	0,05	1
179		21	22	21,5	5	1	3900,0	1	0,05	1
180		22	23	22,5	1	2	5300,0	1	0,04	1
181		22	23	22,5	5	1	3500,0	1	0,04	1
182	**	16	29	22,5	5	1	3736,0	12	0,15	4
183	**	18	29	23,5	1	1	4915,0	8	0,12	4
184	**	19	28	23,5	1	1	4925,0	1	0,04	1
185	**	19	28	23,5	1	2	4375,0	1	0,04	1
186	**	18	29	23,5	1	2	4445,0	4	0,09	4
187	**	19	28	23,5	5	1	3700,0	1	0,04	1
188	**	18	30	24,0	1	2	4139,0	25	0,21	10
189	**	18	30	24,0	1	2	4140,0			5
190	**	18	30	24,0	5	2	2806,0	25	0,21	10
191	**	18	30	24,0	5	2	2859,0			5
192	**	19	30	24,5	1	2	4922,3	20	0,18	11
193	**	25	25	25,0	1	2	4290,0	95	0,39	8
194	**	26	26	26,0	1	1	4585,0	20	0,17	8

lfd. Nr.	x	auffällige Datensätze
	**	ausgeschlossene Datensätze
	168 bis 194	Datensätze siehe auch Anhang 27
Alter	UG	Untergrenze
	OG	Obergrenze
	MW	= (UG+OG)/2
Geschlecht	1	männlich
	5	weiblich
Rasse	1	negrid
	2	europid
	3	mongoloid

Gewichtungsfaktor $= \frac{\sqrt{Individuenzahl}}{Alter}$

Literatur

1 TROTTER UND PETERSON (1970)
2 TROTTER UND PETERSON (1969a)
3 TROTTER UND PETERSON (1969b)
4 MERZ ET AL. (1956)
5 GARN UND WAGNER (1969)
6 GARROW ET AL. (1965)
7 SEALE (1959)
8 BAKER UND NEWMAN (1957)
9 TROTTER UND HIXON (1974)
10 GARN (1970)
11 INGALLS (1931)

Anhang 23: Skelettmassen für 24 Altersklassen von 0 bis 22,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Altersklasse (Daten Anhang 22).

Alter [a]	Geschlecht	Skelettmasse [g]							
		n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
0	männlich	36	90,26	11,58	82,50	82,75	84,35	102,53	117,30
	weiblich	69	89,13	3,91	85,10	85,70	89,30	92,15	95,70
	Gesamt	105	89,51	7,45	82,50	85,10	85,70	92,15	117,30
0,5	männlich	26	128,28	24,77	95,80	95,80	150,00	150,00	150,00
	weiblich	16	126,55	38,12	71,00	102,30	150,00	150,00	202,60
	Gesamt	42	127,62	30,11	71,00	100,68	150,00	150,00	202,60
1,5	männlich	12	237,50	43,30	225,00	225,00	225,00	225,00	375,00
	weiblich	6	210,63	54,06	104,00	194,75	225,00	233,70	259,80
	Gesamt	18	228,54	47,36	104,00	225,00	225,00	225,00	375,00
2,5	männlich	2	362,50	106,07	287,50	287,50	362,50	437,50	437,50
	weiblich	4	387,50	151,38	187,50	231,25	412,50	518,75	537,50
	Gesamt	6	379,17	127,15	187,50	262,50	400,00	481,25	537,50
3,5	männlich	3	762,50	50,00	712,50	712,50	762,50	812,50	812,50
	weiblich	4	613,13	49,39	550,00	562,50	620,00	656,88	662,50
	Gesamt	7	677,14	91,80	550,00	600,00	662,50	762,50	812,50
4,5	weiblich	3	964,17	285,00	680,00	680,00	962,50	1250,00	1250,00
	Gesamt	3	964,17	285,00	680,00	680,00	962,50	1250,00	1250,00
5	männlich	1	824,00	.	824,00	824,00	824,00	824,00	824,00
	Gesamt	1	824,00	.	824,00	824,00	824,00	824,00	824,00
5,5	männlich	1	675,00	.	675,00	675,00	675,00	675,00	675,00
	weiblich	3	706,67	231,59	450,00	450,00	770,00	900,00	900,00
	Gesamt	4	698,75	189,75	450,00	506,25	722,50	867,50	900,00
6,5	männlich	6	847,92	376,28	350,00	500,00	893,75	1081,25	1437,50
	weiblich	4	806,25	224,19	550,00	584,38	831,25	1003,13	1012,50
	Gesamt	10	831,25	309,64	350,00	550,00	893,75	984,38	1437,50
7,5	weiblich	2	856,00	114,55	775,00	775,00	856,00	937,00	937,00
	Gesamt	2	856,00	114,55	775,00	775,00	856,00	937,00	937,00
8,5	männlich	1	1437,50	.	1437,50	1437,50	1437,50	1437,50	1437,50
	weiblich	3	1458,33	308,56	1200,00	1200,00	1375,00	1800,00	1800,00
	Gesamt	4	1453,13	252,15	1200,00	1243,75	1406,25	1709,38	1800,00
9,5	männlich	1	1325,00	.	1325,00	1325,00	1325,00	1325,00	1325,00
	Gesamt	1	1325,00	.	1325,00	1325,00	1325,00	1325,00	1325,00
10,5	männlich	4	1689,88	440,86	1247,00	1332,13	1606,25	2131,25	2300,00
	weiblich	2	1518,75	662,91	1050,00	1050,00	1518,75	1987,50	1987,50
	Gesamt	6	1632,83	460,78	1050,00	1197,75	1606,25	2065,63	2300,00

Anhang 23: Skelettmassen für 24 Altersklassen von 0 bis 22,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Altersklasse (Daten Anhang 22, Fortsetzung).

Alter		Skelettmasse [g]							
[a]	Geschlecht	n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
11,5	männlich	1	2325,00	.	2325,00	2325,00	2325,00	2325,00	2325,00
	weiblich	1	2000,00	.	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
	Gesamt	2	2162,50	229,81	2000,00	2000,00	2162,50	2325,00	2325,00
12,5	männlich	1	1600,00	.	1600,00	1600,00	1600,00	1600,00	1600,00
	weiblich	3	1720,83	381,27	1337,50	1337,50	1725,00	2100,00	2100,00
	Gesamt	4	1690,63	317,11	1337,50	1403,13	1662,50	2006,25	2100,00
13,5	weiblich	2	2181,25	1104,85	1400,00	1400,00	2181,25	2962,50	2962,50
	Gesamt	2	2181,25	1104,85	1400,00	1400,00	2181,25	2962,50	2962,50
14,5	männlich	2	2868,75	822,01	2287,50	2287,50	2868,75	3450,00	3450,00
	weiblich	1	2512,50	.	2512,50	2512,50	2512,50	2512,50	2512,50
	Gesamt	3	2750,00	616,57	2287,50	2287,50	2512,50	3450,00	3450,00
16,5	männlich	1	3525,00	.	3525,00	3525,00	3525,00	3525,00	3525,00
	weiblich	4	2881,25	441,65	2237,50	2415,63	3050,00	3178,13	3187,50
	Gesamt	5	3010,00	478,72	2237,50	2593,75	3150,00	3356,25	3525,00
17,5	männlich	9	3358,33	979,42	1525,00	2837,50	3325,00	4200,00	4800,00
	weiblich	4	2831,25	155,96	2675,00	2687,50	2825,00	2981,25	3000,00
	Gesamt	13	3196,15	842,44	1525,00	2762,50	3000,00	3606,25	4800,00
18,5	männlich	11	4364,78	719,76	2875,00	4237,50	4525,00	4762,50	5587,50
	weiblich	4	3175,00	158,11	3025,00	3037,50	3150,00	3337,50	3375,00
	Gesamt	15	4047,51	819,75	2875,00	3225,00	4237,60	4587,50	5587,50
19,5	männlich	6	4345,83	537,22	3500,00	3921,88	4412,50	4715,63	5100,00
	weiblich	4	3437,50	452,19	2812,50	2959,38	3568,75	3784,38	3800,00
	Gesamt	10	3982,50	669,71	2812,50	3475,00	3931,25	4512,50	5100,00
20,5	männlich	3	4825,00	544,86	4450,00	4450,00	4575,00	5450,00	5450,00
	weiblich	2	3468,75	185,62	3337,50	3337,50	3468,75	3600,00	3600,00
	Gesamt	5	4282,50	841,95	3337,50	3468,75	4450,00	5012,50	5450,00
21,5	männlich	5	4732,50	426,16	4087,50	4318,75	4850,00	5087,50	5162,50
	weiblich	2	3706,25	274,00	3512,50	3512,50	3706,25	3900,00	3900,00
	Gesamt	7	4439,29	619,96	3512,50	3900,00	4550,00	5012,50	5162,50
22,5	männlich	1	5300,00	.	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00
	weiblich	1	3500,00	.	3500,00	3500,00	3500,00	3500,00	3500,00
	Gesamt	2	4400,00	1272,79	3500,00	3500,00	4400,00	5300,00	5300,00

Anhang 24: Skelettmassen für 24 Altersklassen von 0 bis 22,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 22).

Alter [a]	Geschlecht	Skelettmasse [g]							
		n_{gew}	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
0	männlich	6	93,32	69,08	82,50	83,50	85,20	108,30	117,30
	weiblich	6	89,57	25,09	85,10	85,70	89,30	94,40	95,70
	Gesamt	12	91,10	50,61	82,50	85,10	89,30	94,40	117,30
0,5	männlich	5	127,22	54,55	95,80	110,00	124,60	150,00	150,00
	weiblich	5	129,35	84,91	71,00	102,30	150,00	150,00	202,60
	Gesamt	10	128,17	67,31	71,00	102,30	150,00	150,00	202,60
1,5	männlich	3	251,98	78,43	225,00	225,00	225,00	225,00	375,00
	weiblich	4	207,15	56,40	104,00	225,00	225,00	225,00	259,80
	Gesamt	7	231,14	64,94	104,00	225,00	225,00	225,00	375,00
2,5	männlich	2	362,50	67,08	287,50	287,50	362,50	437,50	437,50
	weiblich	4	387,50	95,74	187,50	275,00	412,50	500,00	537,50
	Gesamt	6	379,17	80,42	187,50	287,50	400,00	462,50	537,50
3,5	männlich	3	762,50	26,73	712,50	712,50	762,50	812,50	812,50
	weiblich	4	613,13	26,40	550,00	575,00	620,00	651,25	662,50
	Gesamt	7	677,14	49,07	550,00	600,00	662,50	762,50	812,50
4,5	weiblich	3	964,17	134,35	680,00	680,00	962,50	1250,00	1250,00
	Gesamt	3	964,17	134,35	680,00	680,00	962,50	1250,00	1250,00
5	männlich	1	824,00	.	824,00	824,00	824,00	824,00	824,00
	Gesamt	1	824,00	.	824,00	824,00	824,00	824,00	824,00
5,5	männlich	1	675,00	.	675,00	675,00	675,00	675,00	675,00
	weiblich	3	706,67	98,75	450,00	450,00	770,00	900,00	900,00
	Gesamt	4	698,75	80,91	450,00	562,50	722,50	835,00	900,00
6,5	männlich	6	847,92	147,59	350,00	550,00	893,75	962,50	1437,50
	weiblich	4	806,25	87,93	550,00	618,75	831,25	993,75	1012,50
	Gesamt	10	831,25	121,45	350,00	550,00	893,75	975,00	1437,50
7,5	weiblich	2	856,00	41,83	775,00	775,00	856,00	937,00	937,00
	Gesamt	2	856,00	41,83	775,00	775,00	856,00	937,00	937,00
8,5	männlich	1	1437,50	.	1437,50	1437,50	1437,50	1437,50	1437,50
	weiblich	3	1458,33	105,83	1200,00	1200,00	1375,00	1800,00	1800,00
	Gesamt	4	1453,13	86,49	1200,00	1287,50	1406,25	1618,75	1800,00
9,5	männlich	1	1325,00	.	1325,00	1325,00	1325,00	1325,00	1325,00
	Gesamt	1	1325,00	.	1325,00	1325,00	1325,00	1325,00	1325,00
10,5	männlich	4	1689,87	136,05	1247,00	1417,25	1606,25	1962,50	2300,00
	weiblich	2	1518,75	204,58	1050,00	1050,00	1518,75	1987,50	1987,50
	Gesamt	6	1632,83	142,20	1050,00	1247,00	1606,25	1987,50	2300,00

Anhang 24: Skelettmassen für 24 Altersklassen von 0 bis 22,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 22, Fortsetzung).

Alter [a]	Geschlecht	Skelettmasse [g]							
		n_{gew}	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
11,5	männlich	1	2325,00	.	2325,00	2325,00	2325,00	2325,00	2325,00
	weiblich	1	2000,00	.	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
	Gesamt	2	2162,50	67,77	2000,00	2000,00	2162,50	2325,00	2325,00
12,5	männlich	1	1600,00	.	1600,00	1600,00	1600,00	1600,00	1600,00
	weiblich	3	1720,83	107,84	1337,50	1337,50	1725,00	2100,00	2100,00
	Gesamt	4	1690,63	89,69	1337,50	1468,75	1662,50	1912,50	2100,00
13,5	weiblich	2	2181,25	300,70	1400,00	1400,00	2181,25	2962,50	2962,50
	Gesamt	2	2181,25	300,70	1400,00	1400,00	2181,25	2962,50	2962,50
14,5	männlich	2	2868,75	215,87	2287,50	2287,50	2868,75	3450,00	3450,00
	weiblich	1	2512,50	.	2512,50	2512,50	2512,50	2512,50	2512,50
	Gesamt	3	2750,00	161,92	2287,50	2287,50	2512,50	3450,00	3450,00
16,5	männlich	1	3525,00	.	3525,00	3525,00	3525,00	3525,00	3525,00
	weiblich	4	2881,25	108,73	2237,50	2593,75	3050,00	3168,75	3187,50
	Gesamt	5	3010,00	117,85	2237,50	2950,00	3150,00	3187,50	3525,00
17,5	männlich	9	3358,33	234,13	1525,00	2875,00	3325,00	3862,50	4800,00
	weiblich	4	2831,25	37,28	2675,00	2700,00	2825,00	2962,50	3000,00
	Gesamt	13	3196,15	201,38	1525,00	2800,00	3000,00	3350,00	4800,00
18,5	männlich	11	4364,78	167,34	2875,00	4237,50	4525,00	4762,50	5587,50
	weiblich	4	3175,00	36,76	3025,00	3050,00	3150,00	3300,00	3375,00
	Gesamt	15	4047,51	190,59	2875,00	3225,00	4237,60	4587,50	5587,50
19,5	männlich	6	4345,83	121,66	3500,00	4062,50	4412,50	4587,50	5100,00
	weiblich	4	3437,50	102,40	2812,50	3106,25	3568,75	3768,75	3800,00
	Gesamt	10	3982,50	151,66	2812,50	3500,00	3931,25	4487,50	5100,00
20,5	männlich	3	4825,00	120,34	4450,00	4450,00	4575,00	5450,00	5450,00
	weiblich	2	3468,75	41,00	3337,50	3337,50	3468,75	3600,00	3600,00
	Gesamt	5	4282,50	185,96	3337,50	3600,00	4450,00	4575,00	5450,00
21,5	männlich	5	4732,50	91,91	4087,50	4550,00	4850,00	5012,50	5162,50
	weiblich	2	3706,25	59,09	3512,50	3512,50	3706,25	3900,00	3900,00
	Gesamt	7	4439,29	133,70	3512,50	3900,00	4550,00	5012,50	5162,50
22,5	männlich	1	5300,00	.	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00
	weiblich	1	3500,00	.	3500,00	3500,00	3500,00	3500,00	3500,00
	Gesamt	2	4400,00	268,33	3500,00	3500,00	4400,00	5300,00	5300,00

n_{gew}: Gewichtungsfaktor $= \frac{\sqrt{Individuenzahl}}{Alter}$

Anhang 25: Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 22,5 Jahren (Daten Anhang 22).

								Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
1	82,5	9	30,00	0,0	0,00	0,00	0,00	76,82	5,68	92,38	-9,88	92,15	-9,65	90,21	-7,71
2	83,5	9	30,00	0,0	0,00	0,00	0,00	76,82	6,68	92,38	-8,88	92,15	-8,65	90,21	-6,71
3	85,2	9	30,00	0,0	0,00	0,00	0,00	76,82	8,38	92,38	-7,18	92,15	-6,95	90,21	-5,01
4	108,3	4	20,00	0,0	0,00	0,00	0,00	76,82	31,48	92,38	15,92	92,15	16,15	90,21	18,09
5	109,5	4	20,00	0,0	0,00	0,00	0,00	76,82	32,68	92,38	17,12	92,15	17,35	90,21	19,29
6	117,3	1	10,00	0,0	0,00	0,00	0,00	76,82	40,48	92,38	24,92	92,15	25,15	90,21	27,09
13	110,0	4	4,00	0,5	0,25	0,13	0,06	177,67	-67,67	139,74	-29,74	140,68	-30,68	151,33	-41,33
14	124,6	1	2,00	0,5	0,25	0,13	0,06	177,67	-53,07	139,74	-15,14	140,68	-16,08	151,33	-26,73
15	150,0	6	4,90	0,5	0,25	0,13	0,06	177,67	-27,67	139,74	10,26	140,68	9,32	151,33	-1,33
16	95,8	7	5,29	0,5	0,25	0,13	0,06	177,67	-81,87	139,74	-43,94	140,68	-44,88	151,33	-55,53
17	150,0	8	5,66	0,5	0,25	0,13	0,06	177,67	-27,67	139,74	10,26	140,68	9,32	151,33	-1,33
25	225,0	8	1,89	1,5	2,25	3,38	5,06	379,37	-154,37	244,12	-19,12	246,70	-21,70	268,69	-43,69
26	375,0	1	0,67	1,5	2,25	3,38	5,06	379,37	-4,37	244,12	130,88	246,70	128,30	268,69	106,31
27	225,0	3	1,15	1,5	2,25	3,38	5,06	379,37	-154,37	244,12	-19,12	246,70	-21,70	268,69	-43,69
38	287,5	1	0,40	2,5	6,25	15,63	39,06	581,06	-293,56	361,38	-73,88	364,80	-77,30	384,06	-96,56
39	437,5	1	0,40	2,5	6,25	15,63	39,06	581,06	-143,56	361,38	76,12	364,80	72,70	384,06	53,44
46	762,5	1	0,29	3,5	12,25	42,88	150,06	782,76	-20,26	491,53	270,97	495,07	267,43	502,34	260,16
47	712,5	1	0,29	3,5	12,25	42,88	150,06	782,76	-70,26	491,53	220,97	495,07	217,43	502,34	210,16
48	812,5	1	0,29	3,5	12,25	42,88	150,06	782,76	29,74	491,53	320,97	495,07	317,43	502,34	310,16
59	824,0	1	0,20	5,0	25,00	125,00	625,00	1085,31	-261,31	710,89	113,11	713,54	110,46	694,43	129,57
61	675,0	1	0,18	5,5	30,25	166,38	915,06	1186,16	-511,16	790,45	-115,45	792,58	-117,58	764,15	-89,15
67	550,0	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1387,85	-837,85	959,22	-409,22	960,04	-410,04	914,32	-364,32
68	962,5	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1387,85	-425,35	959,22	3,28	960,04	2,46	914,32	48,18
69	1437,5	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1387,85	49,65	959,22	478,28	960,04	477,46	914,32	523,18

Anhang 25: Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 22,5 Jahren (Daten Anhang 22, Fortsetzung).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
								SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
70	350,0	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1387,85	-1037,85	959,22	-609,22	960,04	-610,04	914,32	-564,32
71	837,5	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1387,85	-550,35	959,22	-121,72	960,04	-122,54	914,32	-76,82
72	950,0	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1387,85	-437,85	959,22	-9,22	960,04	-10,04	914,32	35,68
83	1437,5	1	0,12	8,5	72,25	614,13	5220,06	1791,25	-353,75	1335,42	102,08	1332,95	104,55	1265,16	172,34
89	1325,0	1	0,11	9,5	90,25	857,38	8145,06	1992,95	-667,95	1542,83	-217,83	1538,62	-213,62	1468,70	-143,70
92	1587,5	1	0,10	10,5	110,25	1157,63	12155,06	2194,65	-607,15	1763,13	-175,63	1757,24	-169,74	1691,87	-104,37
93	1625,0	1	0,10	10,5	110,25	1157,63	12155,06	2194,65	-569,65	1763,13	-138,13	1757,24	-132,24	1691,87	-66,87
94	2300,0	1	0,10	10,5	110,25	1157,63	12155,06	2194,65	105,35	1763,13	536,87	1757,24	542,76	1691,87	608,13
95	1247,0	1	0,10	10,5	110,25	1157,63	12155,06	2194,65	-947,65	1763,13	-516,13	1757,24	-510,24	1691,87	-444,87
100	2325,0	1	0,09	11,5	132,25	1520,88	17490,06	2396,34	-71,34	1996,30	328,70	1988,93	336,07	1934,53	390,47
104	1600,0	1	0,08	12,5	156,25	1953,13	24414,06	2598,04	-998,04	2242,35	-642,35	2233,80	-633,80	2195,93	-595,93
114	2287,5	1	0,07	14,5	210,25	3048,63	44205,06	3001,44	-713,94	2773,09	-485,59	2763,53	-476,03	2768,74	-481,24
115	3450,0	1	0,07	14,5	210,25	3048,63	44205,06	3001,44	448,56	2773,09	676,91	2763,53	686,47	2768,74	681,26
121	3525,0	1	0,06	16,5	272,25	4492,13	74120,06	3404,83	120,17	3355,35	169,65	3347,32	177,68	3391,62	133,38
128	2800,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	3606,53	-806,53	3665,79	-865,79	3659,77	-859,77	3713,25	-913,25
129	2875,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	3606,53	-731,53	3665,79	-790,79	3659,77	-784,77	3713,25	-838,25
130	3150,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	3606,53	-456,53	3665,79	-515,79	3659,77	-509,77	3713,25	-563,25
131	3325,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	3606,53	-281,53	3665,79	-340,79	3659,77	-334,77	3713,25	-388,25
132	3350,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	3606,53	-256,53	3665,79	-315,79	3659,77	-309,77	3713,25	-363,25
133	3862,5	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	3606,53	255,97	3665,79	196,71	3659,77	202,73	3713,25	149,25
134	4537,5	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	3606,53	930,97	3665,79	871,71	3659,77	877,73	3713,25	824,25
135	4800,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	3606,53	1193,47	3665,79	1134,21	3659,77	1140,23	3713,25	1086,75
136	1525,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	3606,53	-2081,53	3665,79	-2140,79	3659,77	-2134,77	3713,25	-2188,25
143	4237,5	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	429,27	3989,12	248,38	3986,06	251,44	4035,83	201,67

Anhang 25: Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 22,5 Jahren (Daten Anhang 22, Fortsetzung).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	Polynom 2. Grades SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	Polynom 3. Grades SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	Polynom 4. Grades SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
144	4262,5	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	454,27	3989,12	273,38	3986,06	276,44	4035,83	226,67
145	4525,0	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	716,77	3989,12	535,88	3986,06	538,94	4035,83	489,17
146	4562,5	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	754,27	3989,12	573,38	3986,06	576,44	4035,83	526,67
147	4762,5	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	954,27	3989,12	773,38	3986,06	776,44	4035,83	726,67
148	4925,0	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	1116,77	3989,12	935,88	3986,06	938,94	4035,83	889,17
149	5587,5	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	1779,27	3989,12	1598,38	3986,06	1601,44	4035,83	1551,67
150	2875,0	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	-933,23	3989,12	-1114,12	3986,06	-1111,06	4035,83	-1160,83
151	3450,0	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	-358,23	3989,12	-539,12	3986,06	-536,06	4035,83	-585,83
152	4237,6	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	429,37	3989,12	248,48	3986,06	251,54	4035,83	201,77
153	4587,5	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	3808,23	779,27	3989,12	598,38	3986,06	601,44	4035,83	551,67
158	3500,0	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	4009,93	-509,93	4325,32	-825,32	4326,32	-826,32	4354,20	-854,20
159	4337,5	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	4009,93	327,57	4325,32	12,18	4326,32	11,18	4354,20	-16,70
160	4487,5	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	4009,93	477,57	4325,32	162,18	4326,32	161,18	4354,20	133,30
161	4587,5	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	4009,93	577,57	4325,32	262,18	4326,32	261,18	4354,20	233,30
162	4062,5	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	4009,93	52,57	4325,32	-262,82	4326,32	-263,82	4354,20	-291,70
163	5100,0	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	4009,93	1090,07	4325,32	774,68	4326,32	773,68	4354,20	745,80
168	4575,0	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	4211,62	363,38	4674,40	-99,40	4680,65	-105,65	4662,57	-87,57
169	5450,0	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	4211,62	1238,38	4674,40	775,60	4680,65	769,35	4662,57	787,43
170	4450,0	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	4211,62	238,38	4674,40	-224,40	4680,65	-230,65	4662,57	-212,57
173	4087,5	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4413,32	-325,82	5036,37	-948,87	5049,16	-961,66	4954,50	-867,00
174	4550,0	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4413,32	136,68	5036,37	-486,37	5049,16	-499,16	4954,50	-404,50
175	4850,0	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4413,32	436,68	5036,37	-186,37	5049,16	-199,16	4954,50	-104,50
176	5012,5	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4413,32	599,18	5036,37	-23,87	5049,16	-36,66	4954,50	58,00
177	5162,5	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4413,32	749,18	5036,37	126,13	5049,16	113,34	4954,50	208,00

Anhang 25: Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 22,5 Jahren (Daten Anhang 22, Fortsetzung).

								Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4 Grades	
lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
180	5300,0	1	0,04	22,5	506,25	11390,63	256289,06	4615,02	684,98	5411,21	-111,21	5431,97	-131,97	5222,95	77,05

SM: Skelettmasse, gemessen
n: Anzahl Beobachtungen je Datensatz
GF: Gewichtungsfaktor= $\sqrt{Individuenzahl} \,/\, Alter$
Alter: Durchschnittsalter aus ($Untergrenze_{Alter}$ + $Obergrenze_{Alter}$)/2
SM_b Skelettmasse, berechnet
Differenz =SM - SM_b („Residuum“)

Polynom 1. Grades: $SM_b(1) = 76{,}81900 + 201{,}69780 \times Alter$
Polynom 2. Grades: $SM_b(2) = 92{,}37562 + 91{,}50506 \times Alter + 6{,}43944 \times Alter^2$
Polynom 3. Grades: $SM_b(3) = 92{,}15003 + 94{,}07193 \times Alter + 5{,}94830 \times Alter^2 + 0{,}01860 \times Alter^3$
Polynom 4. Grades: $SM_b(4) = 90{,}20765 + 124{,}61570 \times Alter - 5{,}23447 \times Alter^2 + 1{,}02716 \times Alter^3 - 0{,}02622 \times Alter^4$

Anhang 26: Skelettmasse für Frauen im Alter von 0 bis 22,5 Jahren (Daten Anhang 22).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
								SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
7	89,3	11	33,17	0,0	0,00	0,00	0,00	83,66	5,64	87,79	1,51	88,44	0,86	88,00	1,30
8	89,9	11	33,17	0,0	0,00	0,00	0,00	83,66	6,24	87,79	2,11	88,44	1,46	88,00	1,90
9	94,4	8	28,28	0,0	0,00	0,00	0,00	83,66	10,74	87,79	6,61	88,44	5,96	88,00	6,40
10	85,1	15	38,73	0,0	0,00	0,00	0,00	83,66	1,44	87,79	-2,69	88,44	-3,34	88,00	-2,90
11	85,7	15	38,73	0,0	0,00	0,00	0,00	83,66	2,04	87,79	-2,09	88,44	-2,74	88,00	-2,30
12	95,7	9	30,00	0,0	0,00	0,00	0,00	83,66	12,04	87,79	7,91	88,44	7,26	88,00	7,70
18	102,3	4	4,00	0,5	0,25	0,13	0,06	161,32	-59,02	146,80	-44,50	142,48	-40,18	146,66	-44,36
19	150,0	5	4,47	0,5	0,25	0,13	0,06	161,32	-11,32	146,80	3,20	142,48	7,52	146,66	3,34
20	202,6	1	2,00	0,5	0,25	0,13	0,06	161,32	41,28	146,80	55,80	142,48	60,12	146,66	55,94
21	71,0	3	3,46	0,5	0,25	0,13	0,06	161,32	-90,32	146,80	-75,80	142,48	-71,48	146,66	-75,66
22	150,0	3	3,46	0,5	0,25	0,13	0,06	161,32	-11,32	146,80	3,20	142,48	7,52	146,66	3,34
28	104,0	1	0,67	1,5	2,25	3,38	5,06	316,65	-212,65	268,60	-164,60	257,45	-153,45	265,71	-161,71
29	225,0	2	0,94	1,5	2,25	3,38	5,06	316,65	-91,65	268,60	-43,60	257,45	-32,45	265,71	-40,71
30	259,8	1	0,67	1,5	2,25	3,38	5,06	316,65	-56,85	268,60	-8,80	257,45	2,35	265,71	-5,91
31	225,0	2	0,94	1,5	2,25	3,38	5,06	316,65	-91,65	268,60	-43,60	257,45	-32,45	265,71	-40,71
40	362,5	1	0,40	2,5	6,25	15,63	39,06	471,97	-109,47	395,47	-32,97	381,17	-18,67	388,35	-25,85
41	462,5	1	0,40	2,5	6,25	15,63	39,06	471,97	-9,47	395,47	67,03	381,17	81,33	388,35	74,15
42	187,5	1	0,40	2,5	6,25	15,63	39,06	471,97	-284,47	395,47	-207,97	381,17	-193,67	388,35	-200,85
43	537,5	1	0,40	2,5	6,25	15,63	39,06	471,97	65,53	395,47	142,03	381,17	156,33	388,35	149,15
49	550,0	1	0,29	3,5	12,25	42,88	150,06	627,30	-77,30	527,41	22,59	513,12	36,88	515,89	34,11
50	662,5	1	0,29	3,5	12,25	42,88	150,06	627,30	35,20	527,41	135,09	513,12	149,38	515,89	146,61
51	600,0	1	0,29	3,5	12,25	42,88	150,06	627,30	-27,30	527,41	72,59	513,12	86,88	515,89	84,11

Anhang 26: Skelettmasse für Frauen im Alter von 0 bis 22,5 Jahren (Daten Anhang 22, Fortsetzung).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter^4 [a^4]	Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
								SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
52	640,0	1	0,29	3,5	12,25	42,88	150,06	627,30	12,70	527,41	112,59	513,12	126,88	515,89	124,11
55	962,5	1	0,22	4,5	20,25	91,13	410,06	782,62	179,88	664,42	298,08	652,76	309,74	649,39	313,11
56	1250,0	1	0,22	4,5	20,25	91,13	410,06	782,62	467,38	664,42	585,58	652,76	597,24	649,39	600,61
57	680,0	1	0,22	4,5	20,25	91,13	410,06	782,62	-102,62	664,42	15,58	652,76	27,24	649,39	30,61
62	900,0	1	0,18	5,5	30,25	166,38	915,06	937,95	-37,95	806,50	93,50	799,58	100,42	789,66	110,34
63	450,0	1	0,18	5,5	30,25	166,38	915,06	937,95	-487,95	806,50	-356,50	799,58	-349,58	789,66	-339,66
64	770,0	1	0,18	5,5	30,25	166,38	915,06	937,95	-167,95	806,50	-36,50	799,58	-29,58	789,66	-19,66
73	1012,5	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1093,27	-80,77	953,64	58,86	953,05	59,45	937,27	75,23
74	550,0	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1093,27	-543,27	953,64	-403,64	953,05	-403,05	937,27	-387,27
75	687,5	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1093,27	-405,77	953,64	-266,14	953,05	-265,55	937,27	-249,77
76	975,0	1	0,15	6,5	42,25	274,63	1785,06	1093,27	-118,27	953,64	21,36	953,05	21,95	937,27	37,73
79	775,0	1	0,13	7,5	56,25	421,88	3164,06	1248,60	-473,60	1105,86	-330,86	1112,63	-337,63	1092,51	-317,51
80	937,0	1	0,13	7,5	56,25	421,88	3164,06	1248,60	-311,60	1105,86	-168,86	1112,63	-175,63	1092,51	-155,51
84	1200,0	1	0,12	8,5	72,25	614,13	5220,06	1403,92	-203,92	1263,14	-63,14	1277,82	-77,82	1255,47	-55,47
85	1375,0	1	0,12	8,5	72,25	614,13	5220,06	1403,92	-28,92	1263,14	111,86	1277,82	97,18	1255,47	119,53
86	1800,0	1	0,12	8,5	72,25	614,13	5220,06	1403,92	396,08	1263,14	536,86	1277,82	522,18	1255,47	544,53
96	1050,0	1	0,10	10,5	110,25	1157,63	12155,06	1714,57	-664,57	1592,91	-542,91	1622,87	-572,87	1603,52	-553,52
97	1987,5	1	0,10	10,5	110,25	1157,63	12155,06	1714,57	272,93	1592,91	394,59	1622,87	364,63	1603,52	383,98
101	2000,0	1	0,09	11,5	132,25	1520,88	17490,06	1869,90	130,10	1765,39	234,61	1801,68	198,32	1787,50	212,50
105	1337,5	1	0,08	12,5	156,25	1953,13	24414,06	2025,22	-687,72	1942,95	-605,45	1983,99	-646,49	1976,97	-639,47
106	1725,0	1	0,08	12,5	156,25	1953,13	24414,06	2025,22	-300,22	1942,95	-217,95	1983,99	-258,99	1976,97	-251,97
107	2100,0	1	0,08	12,5	156,25	1953,13	24414,06	2025,22	74,78	1942,95	157,05	1983,99	116,01	1976,97	123,03
110	1400,0	1	0,07	13,5	182,25	2460,38	33215,06	2180,55	-780,55	2125,57	-725,57	2169,27	-769,27	2170,73	-770,73
111	2962,5	1	0,07	13,5	182,25	2460,38	33215,06	2180,55	781,95	2125,57	836,93	2169,27	793,23	2170,73	791,77
116	2512,5	1	0,07	14,5	210,25	3048,63	44205,06	2335,87	176,63	2313,26	199,24	2356,98	155,52	2367,37	145,13

Anhang 26: Skelettmasse für Frauen im Alter von 0 bis 22,.5 Jahren (Daten Anhang 22, Fortsetzung).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	Polynom 2. Grades SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	Polynom 3. Grades SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	Polynom 4. Grades SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
122	2950,0	1	0,06	16,5	272,25	4492,13	74120,06	2646,53	303,47	2703,85	246,15	2737,64	212,36	2762,32	187,68
123	3150,0	1	0,06	16,5	272,25	4492,13	74120,06	2646,53	503,47	2703,85	446,15	2737,64	412,36	2762,32	387,68
124	3187,5	1	0,06	16,5	272,25	4492,13	74120,06	2646,53	540,97	2703,85	483,65	2737,64	449,86	2762,32	425,18
125	2237,5	1	0,06	16,5	272,25	4492,13	74120,06	2646,53	-409,03	2703,85	-466,35	2737,64	-500,14	2762,32	-524,82
137	2675,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	2801,85	-126,85	2906,74	-231,74	2929,52	-254,52	2956,53	-281,53
138	2725,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	2801,85	-76,85	2906,74	-181,74	2929,52	-204,52	2956,53	-231,53
139	2925,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	2801,85	123,15	2906,74	18,26	2929,52	-4,52	2956,53	-31,53
140	3000,0	1	0,06	17,5	306,25	5359,38	93789,06	2801,85	198,15	2906,74	93,26	2929,52	70,48	2956,53	43,47
154	3075,0	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	2957,18	117,82	3114,71	-39,71	3121,75	-46,75	3145,41	-70,41
155	3225,0	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	2957,18	267,82	3114,71	110,29	3121,75	103,25	3145,41	79,59
156	3375,0	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	2957,18	417,82	3114,71	260,29	3121,75	253,25	3145,41	229,59
157	3025,0	1	0,05	18,5	342,25	6331,63	117135,06	2957,18	67,82	3114,71	-89,71	3121,75	-96,75	3145,41	-120,41
164	3400,0	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	3112,50	287,50	3327,74	72,26	3313,78	86,22	3326,31	73,69
165	3737,5	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	3112,50	625,00	3327,74	409,76	3313,78	423,72	3326,31	411,19
166	3800,0	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	3112,50	687,50	3327,74	472,26	3313,78	486,22	3326,31	473,69
167	2812,5	1	0,05	19,5	380,25	7414,88	144590,06	3112,50	-300,00	3327,74	-515,24	3313,78	-501,28	3326,31	-513,81
171	3337,5	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	3267,83	69,67	3545,84	-208,34	3505,11	-167,61	3496,28	-158,78
172	3600,0	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	3267,83	332,17	3545,84	54,16	3505,11	94,89	3496,28	103,72
178	3512,5	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	3423,15	89,35	3769,01	-256,51	3695,19	-182,69	3652,18	-139,68
179	3900,0	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	3423,15	476,85	3769,01	130,99	3695,19	204,81	3652,18	247,82
181	3500,0	1	0,04	22,5	506,25	11390,63	256289,06	3578,48	-78,48	3997,24	-497,24	3883,51	-383,51	3790,58	-290,58

Anhang 26: Skelettmasse für Frauen im Alter von 0 bis 22,.5 Jahren (Daten Anhang 22, Fortsetzung).

SM:	Skelettmasse, gemessen
n:	Anzahl Beobachtungen je Datensatz
GF:	Gewichtungsfaktor= $\sqrt{Individuenzahl}\,/\,Alter$
Alter:	Durchschnittsalter aus (Untergrenze$_{Alter}$ + Obergrenze$_{Alter}$)/2
SM_b	Skelettmasse, berechnet
Differenz	=SM - SM_b („Residuum“)
Polynom 1. Grades:	$SM_b(1) = 83{,}65774 + 155{,}32532 \times Alter$
Polynom 2. Grades:	$SM_b(2) = 87{,}79401 + 116{,}73614 \times Alter + 2{,}53409 \times Alter^2$
Polynom 3. Grades:	$SM_b(3) = 88{,}44097 + 105{,}71691 \times Alter + 4{,}76951 \times Alter^2 - 0{,}.08763 \times Alter^3$
Polynom 4. Grades:	$SM_b(4) = 88{,}00312 + 116{,}94054 \times Alter + 0{,}59208 \times Alter^2 + 0{,}30088 \times Alter^3 - 0{,}01036 \times Alter^4$

Anhang 27: Skelettmassen für Individuen ab dem dritten Lebensjahrzehnt (Literaturdaten).

lfd. Nr.		Alter [a] UG	OG	MW	Geschlecht	Rasse	Skelettmasse [g]	n	Gewichtungs-faktor	Literatur
168		20	21	20,5	1	1	4575,0	1	0,05	1
169		20	21	20,5	1	1	5450,0	1	0,05	1
170		20	21	20,5	1	2	4450,0	1	0,05	1
171		20	21	20,5	5	1	3337,5	1	0,05	1
172		20	21	20,5	5	1	3600,0	1	0,05	1
173		21	22	21,5	1	1	4087,5	1	0,05	1
174		21	22	21,5	1	1	4550,0	1	0,05	1
175		21	22	21,5	1	1	4850,0	1	0,05	1
176		21	22	21,5	1	1	5012,5	1	0,05	1
177		21	22	21,5	1	1	5162,5	1	0,05	1
178		21	22	21,5	5	1	3512,5	1	0,05	1
179		21	22	21,5	5	1	3900,0	1	0,05	1
180		22	23	22,5	1	2	5300,0	1	0,04	1
181		22	23	22,5	5	1	3500,0	1	0,04	1
182		16	29	22,5	5	1	3736,0	12	0,15	4
183		18	29	23,5	1	1	4915,0	8	0,12	4
184		19	28	23,5	1	1	4925,0	1	0,04	1
185		19	28	23,5	1	2	4375,0	1	0,04	1
186		18	29	23,5	1	2	4445,0	4	0,09	4
187		19	28	23,5	5	1	3700,0	1	0,04	1
188		18	30	24,0	1	2	4139,0	25	0,21	10
189	**	18	30	24,0	1	2	4140,0			5
190		18	30	24,0	5	2	2806,0	25	0,21	10
191	**	18	30	24,0	5	2	2859,0			5
192		19	30	24,5	1	2	4922,3	20	0,18	11
193		25	25	25,0	1	2	4290,0	95	0,39	8
194		26	26	26,0	1	1	4585,0	20	0,17	8
195		17	39	28,0	5	2	3197,0	7	0,09	4
196		29	38	33,5	1	1	5575,0	1	0,03	1
197		29	38	33,5	1	2	4200,0	1	0,03	1
198		29	38	33,5	5	1	3975,0	1	0,03	1
199		29	38	33,5	5	2	3150,0	1	0,03	1
200		30	39	34,5	1	1	5621,0	8	0,08	4
201		30	39	34,5	1	2	4245,0	8	0,08	4
202		30	39	34,5	5	1	4030,0	7	0,08	4
203		25	45	35,0	1	1	3910,1	2	0,04	9
204		30	40	35,0	1	2	4288,0	25	0,14	10
205	**	30	40	35,0	1	2	4289,0			5
206		25	45	35,0	1	2	5425,2	1	0,03	9
207		25	45	35,0	5	1	3127,1	9	0,09	9
208		25	45	35,0	5	2	3084,4	2	0,04	9

Anhang 27: Skelettmassen für Individuen ab dem dritten Lebensjahrzehnt (Literaturdaten, Fortsetzung).

lfd. Nr.		Alter [a]			Geschlecht	Rasse	Skelettmasse [g]	n	Gewichtungs-faktor	Literatur
		UG	OG	MW						
209		30	40	35,0	5	2	2841,0	25	0,14	10
210	**	30	40	35,0	5	2	2926,0			5
211		31	40	35,5	1	2	5031,4	20	0,13	11
212		39	48	43,5	1	1	4787,5	1	0,02	1
213		39	48	43,5	1	2	4775,0	1	0,02	1
214		39	48	43,5	5	1	3862,5	1	0,02	1
215		39	48	43,5	5	2	2962,5	1	0,02	1
216		40	49	44,5	1	1	4882,0	9	0,07	4
217		40	49	44,5	1	2	4860,0	9	0,07	4
218		40	49	44,5	5	1	3920,0	8	0,06	4
219		40	49	44,5	5	2	3002,0	4	0,04	4
220		40	50	45,0	1	2	4145,0	25	0,11	10
221	**	40	50	45,0	1	2	4247,0			5
222	**	40	50	45,0	5	2	2998,0			5
223		40	50	45,0	5	2	3004,0	25	0,11	10
224		41	49	45,0	1	2	4942,1	20	0,10	11
225		18	87	52,5	1	2	4417,0	55	0,14	4
226		17	89	53,0	5	2	2989,0	39	0,12	4
227		16	91	53,5	5	1	3659,0	55	0,14	4
228		45	64	54,5	1	1	3973,2	15	0,07	9
229		50	59	54,5	1	1	4976,0	8	0,05	4
230		18	91	54,5	1	1	5069,0	54	0,13	4
231		45	64	54,5	1	2	3538,4	11	0,06	9
232		50	59	54,5	1	2	4369,0	9	0,06	4
233		45	64	54,5	5	1	3005,2	7	0,05	9
234		50	59	54,5	5	1	3388,0	8	0,05	4
235		45	64	54,5	5	2	2336,2	13	0,07	9
236		50	59	54,5	5	2	3320,0	7	0,05	4
237		50	59	54,5	1	2	5046,2	20	0,08	11
238		50	60	55,0	1	2	4267,0	25	0,09	10
239		50	60	55,0	5	2	2815,0	25	0,09	10
240		40	79	59,5	1	2	3418,7	25	0,08	7
241		(25)	(80)	61,0	1	1	3941,0	30	0,09	9
242		(30)	(95)	61,0	5	1	2878,0	30	0,09	9
243		25	99	62,0	1	2	3852,7	25	0,08	7
244		25	99	62,0	5	1	2828,2	25	0,08	7
245		25	99	62,0	5	2	2302,5	25	0,08	7
246		60	69	64,5	1	1	4988,0	8	0,04	4
247		60	69	64,5	1	2	4432,0	9	0,05	4
248		60	69	64,5	5	1	3827,0	6	0,04	4

Anhang 27: Skelettmassen für Individuen ab dem dritten Lebensjahrzehnt (Literaturdaten, Fortsetzung).

lfd. Nr.		Alter [a] UG	OG	MW	Geschlecht	Rasse	Skelettmasse [g]	n	Gewichtungs-faktor	Literatur
249		60	69	64.5	5	2	2984.0	8	0.04	4
250		60	70	65.0	1	2	4209.0	25	0.08	10
251		60	70	65.0	5	2	2724.0	25	0.08	10
252		(30)	(85)	66.0	1	2	3410.0	30	0.08	9
253		(25)	(90)	66.0	5	2	2297.0	30	0.08	9
254		60	78	69.0	1	2	4843.0	20	0.06	11
255		70	79	74.5	1	1	5340.0	8	0.04	4
256		70	79	74.5	1	2	4575.0	8	0.04	4
257		70	79	74.5	5	1	3373.0	9	0.04	4
258		70	79	74.5	5	2	3022.0	8	0.04	4
259		70	80	75.0	1	2	3886.0	25	0.07	10
260		70	80	75.0	5	2	2529.0	25	0.07	10
261		65	99	82.0	1	1	3852.4	13	0.04	9
262		65	99	82.0	1	2	3184.7	18	0.05	9
263		65	99	82.0	5	1	2620.5	14	0.05	9
264		65	99	82.0	5	2	2130.0	15	0.05	9
265		80	87	83.5	1	2	3955.0	8	0.03	4
266		80	89	84.5	5	2	2182.0	5	0.03	4
267		80	91	85.5	1	1	4611.0	5	0.03	4
268	**	80	91	85.5	5	1	3286.0	5	0.03	4
269	**	80			1	2	3671.0	25		10
270	**	80			5	2	2243.0	25		10

lfd. Nr.	**	ausgeschlossene Datensätze
	168 bis 194	Datensätze siehe auch Anhang 22
Alter	UG	Untergrenze (UG nicht bekannt, MW war berechnet)
	OG	Obergrenze (OG nicht bekannt; MW war berechnet)
	MW	= (UG+OG)/2
Geschlecht	1	männlich
	5	weiblich
Rasse	1	negrid
	2	europid
	3	mongoloid

Gewichtungsfaktor $= \frac{\sqrt{Individuenzahl}}{Alter}$

Literatur
1 TROTTER UND PETERSON (1970)
2 TROTTER UND PETERSON (1969a)
3 TROTTER UND PETERSON (1969b)
4 MERZ ET AL. (1956)
5 GARN UND WAGNER (1969)
6 GARROW ET AL. (1965)
7 SEALE (1959)
8 BAKER UND NEWMAN (1957)
9 TROTTER UND HIXON (1974)
10 GARN (1970)
11 INGALLS (1931)

Anhang 28: Skelettmassen für 33 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Altersklasse (Daten Anhang 27).

Alter [a]	Geschlecht	Skelettmasse [g]							
		n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
20,5	männlich	3	4825,00	544,86	4450,00	4450,00	4575,00	5450,00	5450,00
	weiblich	2	3468,75	185,62	3337,50	3337,50	3468,75	3600,00	3600,00
	Gesamt	5	4282,50	841,95	3337,50	3468,75	4450,00	5012,50	5450,00
21,5	männlich	5	4732,50	426,16	4087,50	4318,75	4850,00	5087,50	5162,50
	weiblich	2	3706,25	274,00	3512,50	3512,50	3706,25	3900,00	3900,00
	Gesamt	7	4439,29	619,96	3512,50	3900,00	4550,00	5012,50	5162,50
22,5	männlich	1	5300,00	.	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00
	weiblich	13	3717,85	65,45	3500,00	3736,00	3736,00	3736,00	3736,00
	Gesamt	14	3830,86	427,50	3500,00	3736,00	3736,00	3736,00	5300,00
23,5	männlich	14	4742,86	241,86	4375,00	4445,00	4915,00	4915,00	4925,00
	weiblich	1	3700,00	.	3700,00	3700,00	3700,00	3700,00	3700,00
	Gesamt	15	4673,33	356,12	3700,00	4445,00	4915,00	4915,00	4925,00
24	männlich	25	4139,00	0,00	4139,00	4139,00	4139,00	4139,00	4139,00
	weiblich	25	2806,00	0,00	2806,00	2806,00	2806,00	2806,00	2806,00
	Gesamt	50	3472,50	673,27	2806,00	2806,00	3472,50	4139,00	4139,00
24,5	männlich	20	4922,30	0,00	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30
	Gesamt	20	4922,30	0,00	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30
25	männlich	95	4290,00	0,00	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00
	Gesamt	95	4290,00	0,00	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00
26	männlich	20	4585,00	0,00	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00
	Gesamt	20	4585,00	0,00	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00
28	weiblich	7	3197,00	0,00	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00
	Gesamt	7	3197,00	0,00	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00
33,5	männlich	2	4887,50	972,27	4200,00	4200,00	4887,50	5575,00	5575,00
	weiblich	2	3562,50	583,36	3150,00	3150,00	3562,50	3975,00	3975,00
	Gesamt	4	4225,00	1006,85	3150,00	3356,25	4087,50	5231,25	5575,00
34,5	männlich	16	4933,00	710,56	4245,00	4245,00	4933,00	5621,00	5621,00
	weiblich	7	4030,00	0,00	4030,00	4030,00	4030,00	4030,00	4030,00
	Gesamt	23	4658,17	724,39	4030,00	4030,00	4245,00	5621,00	5621,00
35	männlich	28	4301,62	241,42	3910,10	4288,00	4288,00	4288,00	5425,20
	weiblich	36	2926,05	130,36	2841,00	2841,00	2841,00	3116,43	3127,10
	Gesamt	64	3527,86	712,37	2841,00	2841,00	3127,10	4288,00	5425,20
35,5	männlich	20	5031,36	0,00	5031,36	5031,36	5031,36	5031,36	5031,36
	Gesamt	20	5031,36	0,00	5031,36	5031,36	5031,36	5031,36	5031,36

Anhang 28: Skelettmassen für 33 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Altersklasse (Daten Anhang 27, Fortsetzung).

Alter [a]	Geschlecht	Skelettmasse [g]							
		n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
43,5	männlich	2	4781,25	8,84	4775,00	4775,00	4781,25	4787,50	4787,50
	weiblich	2	3412,50	636,40	2962,50	2962,50	3412,50	3862,50	3862,50
	Gesamt	4	4096,88	871,50	2962,50	3187,50	4318,75	4784,38	4787,50
44,5	männlich	18	4871,00	11,32	4860,00	4860,00	4871,00	4882,00	4882,00
	weiblich	12	3614,00	451,99	3002,00	3002,00	3920,00	3920,00	3920,00
	Gesamt	30	4368,20	685,46	3002,00	3920,00	4860,00	4882,00	4882,00
45	männlich	45	4499,28	400,57	4145,00	4145,00	4145,00	4942,13	4942,13
	weiblich	25	3004,00	0,00	3004,00	3004,00	3004,00	3004,00	3004,00
	Gesamt	70	3965,25	789,36	3004,00	3004,00	4145,00	4942,13	4942,13
52,5	männlich	55	4417,00	0,00	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00
	Gesamt	55	4417,00	0,00	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00
53	weiblich	39	2989,00	0,00	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00
	Gesamt	39	2989,00	0,00	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00
53,5	weiblich	55	3659,00	0,00	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00
	Gesamt	55	3659,00	0,00	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00
54,5	männlich	117	4720,51	541,89	3538,40	4369,00	5046,23	5069,00	5069,00
	weiblich	35	2907,17	464,88	2336,20	2336,20	3005,20	3320,00	3388,00
	Gesamt	152	4302,97	927,85	2336,20	3538,40	4976,00	5069,00	5069,00
55	männlich	25	4267,00	0,00	4267,00	4267,00	4267,00	4267,00	4267,00
	weiblich	25	2815,00	0,00	2815,00	2815,00	2815,00	2815,00	2815,00
	Gesamt	50	3541,00	733,37	2815,00	2815,00	3541,00	4267,00	4267,00
59,5	männlich	25	3418,70	0,00	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70
	Gesamt	25	3418,70	0,00	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70
61	männlich	30	3941,00	0,00	3941,00	3941,00	3941,00	3941,00	3941,00
	weiblich	30	2878,00	0,00	2878,00	2878,00	2878,00	2878,00	2878,00
	Gesamt	60	3409,50	535,99	2878,00	2878,00	3409,50	3941,00	3941,00
62	männlich	25	3852,70	0,00	3852,70	3852,70	3852,70	3852,70	3852,70
	weiblich	50	2565,35	265,52	2302,50	2302,50	2565,35	2828,20	2828,20
	Gesamt	75	2994,47	648,03	2302,50	2302,50	2828,20	3852,70	3852,70
64,5	männlich	17	4693,65	286,06	4432,00	4432,00	4432,00	4988,00	4988,00
	weiblich	14	3345,29	432,92	2984,00	2984,00	2984,00	3827,00	3827,00
	Gesamt	31	4084,71	768,20	2984,00	2984,00	4432,00	4988,00	4988,00

Anhang 28: Skelettmassen für 33 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung der Individuenzahl je Altersklasse (Daten Anhang 27, Fortsetzung).

Alter [a]	Geschlecht	Skelettmasse [g]							
		n	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
65	männlich	25	4209,00	0,00	4209,00	4209,00	4209,00	4209,00	4209,00
	weiblich	25	2724,00	0,00	2724,00	2724,00	2724,00	2724,00	2724,00
	Gesamt	50	3466,50	750,04	2724,00	2724,00	3466,50	4209,00	4209,00
66	männlich	30	3410,00	0,00	3410,00	3410,00	3410,00	3410,00	3410,00
	weiblich	30	2297,00	0,00	2297,00	2297,00	2297,00	2297,00	2297,00
	Gesamt	60	2853,50	561,20	2297,00	2297,00	2853,50	3410,00	3410,00
69	männlich	20	4842,99	0,00	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99
	Gesamt	20	4842,99	0,00	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99
74,5	männlich	16	4957,50	395,04	4575,00	4575,00	4957,50	5340,00	5340,00
	weiblich	17	3207,82	180,59	3022,00	3022,00	3373,00	3373,00	3373,00
	Gesamt	33	4056,15	937,01	3022,00	3197,50	3373,00	4957,50	5340,00
75	männlich	25	3886,00	0,00	3886,00	3886,00	3886,00	3886,00	3886,00
	weiblich	25	2529,00	0,00	2529,00	2529,00	2529,00	2529,00	2529,00
	Gesamt	50	3207,50	685,39	2529,00	2529,00	3207,50	3886,00	3886,00
	Gesamt	60	2934,05	626,65	2130,00	2252,63	3184,70	3184,70	3852,40
82	männlich	31	3464,70	334,93	3184,70	3184,70	3184,70	3852,40	3852,40
	weiblich	29	2366,79	249,44	2130,00	2130,00	2130,00	2620,50	2620,50
83,5	männlich	8	3955,00	0,00	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00
	Gesamt	8	3955,00	0,00	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00
84,5	weiblich	5	2182,00	0,00	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00
	Gesamt	5	2182,00	0,00	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00

Anhang 29: Skelettmassen für 33 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 27).

Alter		Skelettmasse[g]							
[a]	Geschlecht	n_{gew}	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
20,5	männlich	3	4825,00	120,34	4450,00	4450,00	4575,00	5450,00	5450,00
	weiblich	2	3468,75	41,00	3337,50	3337,50	3468,75	3600,00	3600,00
	Gesamt	5	4282,50	185,96	3337,50	3600,00	4450,00	4575,00	5450,00
21,5	männlich	5	4732,50	91,91	4087,50	4550,00	4850,00	5012,50	5162,50
	weiblich	2	3706,25	59,09	3512,50	3512,50	3706,25	3900,00	3900,00
	Gesamt	7	4439,29	133,70	3512,50	3900,00	4550,00	5012,50	5162,50
22,5	männlich	1	5300,00	.	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00
	weiblich	2	3683,13	43,83	3500,00	3736,00	3736,00	3736,00	3736,00
	Gesamt	3	3979,04	220,05	3500,00	3736,00	3736,00	3736,00	5300,00
23,5	männlich	4	4699,72	76,91	4375,00	4445,00	4915,00	4915,00	4925,00
	weiblich	1	3700,00	.	3700,00	3700,00	3700,00	3700,00	3700,00
	Gesamt	5	4572,02	117,09	3700,00	4375,00	4445,00	4915,00	4925,00
24	männlich	1	4139,00	.	4139,00	4139,00	4139,00	4139,00	4139,00
	weiblich	1	2806,00	.	2806,00	2806,00	2806,00	2806,00	2806,00
	Gesamt	2	3472,50	430,22	2806,00	2806,00	3472,50	4139,00	4139,00
24,5	männlich	1	4922,30	.	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30
	Gesamt	1	4922,30	.	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30
25	männlich	1	4290,00	.	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00
	Gesamt	1	4290,00	.	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00
26	männlich	1	4585,00	.	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00
	Gesamt	1	4585,00	.	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00
28	weiblich	1	3197,00	.	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00
	Gesamt	1	3197,00	.	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00
33,5	männlich	2	4887,50	167,98	4200,00	4200,00	4887,50	5575,00	5575,00
	weiblich	2	3562,50	100,79	3150,00	3150,00	3562,50	3975,00	3975,00
	Gesamt	4	4225,00	173,96	3150,00	3562,50	4087,50	4887,50	5575,00
34,5	männlich	2	4933,00	278,59	4245,00	4245,00	4933,00	5621,00	5621,00
	weiblich	1	4030,00	.	4030,00	4030,00	4030,00	4030,00	4030,00
	Gesamt	3	4645,25	245,17	4030,00	4030,00	4245,00	5621,00	5621,00
35	männlich	3	4369,30	143,73	3910,10	4288,00	4288,00	4288,00	5425,20
	weiblich	3	2968,73	50,11	2841,00	2841,00	2841,00	3127,10	3127,10
	Gesamt	6	3585,79	236,13	2841,00	2841,00	3127,10	4288,00	5425,20

Anhang 29: Skelettmassen für 33 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 27, Fortsetzung).

Alter		Skelettmasse [g]							
[a]	Geschlecht	n_{gew}	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
44,5	männlich	2	4871,00	4,04	4860,00	4860,00	4871,00	4882,00	4882,00
	weiblich	2	3539,75	148,95	3002,00	3002,00	3920,00	3920,00	3920,00
	Gesamt	4	4277,39	207,17	3002,00	3920,00	4860,00	4882,00	4882,00
45	männlich	2	4521,35	182,57	4145,00	4145,00	4145,00	4942,13	4942,13
	weiblich	1	3004,00	.	3004,00	3004,00	3004,00	3004,00	3004,00
	Gesamt	3	3997,12	316,83	3004,00	3004,00	4145,00	4942,13	4942,13
52,5	männlich	1	4417,00	.	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00
	Gesamt	1	4417,00	.	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00
53	weiblich	1	2989,00	.	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00
	Gesamt	1	2989,00	.	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00
53,5	weiblich	1	3659,00	.	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00
	Gesamt	1	3659,00	.	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00
54,5	männlich	6	4594,52	174,79	3538,40	3973,20	4976,00	5069,00	5069,00
	weiblich	4	2962,86	117,81	2336,20	2336,20	3005,20	3320,00	3388,00
	Gesamt	10	4071,28	254,63	2336,20	3388,00	3973,20	5046,23	5069,00
55	männlich	1	4267,00	.	4267,00	4267,00	4267,00	4267,00	4267,00
	weiblich	1	2815,00	.	2815,00	2815,00	2815,00	2815,00	2815,00
	Gesamt	2	3541,00	309,57	2815,00	2815,00	3541,00	4267,00	4267,00
59,5	männlich	1	3418,70	.	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70
	Gesamt	1	3418,70	.	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70
61	männlich	1	3941,00	.	3941,00	3941,00	3941,00	3941,00	3941,00
	weiblich	1	2878,00	.	2878,00	2878,00	2878,00	2878,00	2878,00
	Gesamt	2	3409,50	225,23	2878,00	2878,00	3409,50	3941,00	3941,00
62	männlich	1	3852,70	.	3852,70	3852,70	3852,70	3852,70	3852,70
	weiblich	2	2565,35	105,56	2302,50	2302,50	2565,35	2828,20	2828,20
	Gesamt	3	2994,47	223,88	2302,50	2302,50	2828,20	3852,70	3852,70
64,5	männlich	2	4701,82	83,53	4432,00	4432,00	4432,00	4988,00	4988,00
	weiblich	2	3375,24	120,26	2984,00	2984,00	2984,00	3827,00	3827,00
	Gesamt	4	4071,40	179,82	2984,00	2984,00	4432,00	4988,00	4988,00

Anhang 29: Skelettmassen für 33 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 27, Fortsetzung).

Alter		Skelettmasse [g]							
[a]	Geschlecht	n_{gew}	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
65	männlich	1	4209,00	.	4209,00	4209,00	4209,00	4209,00	4209,00
	weiblich	1	2724,00	.	2724,00	2724,00	2724,00	2724,00	2724,00
	Gesamt	2	3466,50	291,23	2724,00	2724,00	3466,50	4209,00	4209,00
66	männlich	1	3410,00	.	3410,00	3410,00	3410,00	3410,00	3410,00
	weiblich	1	2297,00	.	2297,00	2297,00	2297,00	2297,00	2297,00
	Gesamt	2	2853,50	226,72	2297,00	2297,00	2853,50	3410,00	3410,00
69	männlich	1	4842,99	.	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99
	Gesamt	1	4842,99	.	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99
74,5	männlich	2	4957,50	105,40	4575,00	4575,00	4957,50	5340,00	5340,00
	weiblich	2	3202,67	49,07	3022,00	3022,00	3373,00	3373,00	3373,00
	Gesamt	4	4066,98	209,90	3022,00	3373,00	3373,00	4575,00	5340,00
75	männlich	1	3886,00	.	3886,00	3886,00	3886,00	3886,00	3886,00
	weiblich	1	2529,00	.	2529,00	2529,00	2529,00	2529,00	2529,00
	Gesamt	2	3207,50	247,75	2529,00	2529,00	3207,50	3886,00	3886,00
82	männlich	2	3491,45	102,94	3184,70	3184,70	3184,70	3852,40	3852,40
	weiblich	2	2371,02	74,72	2130,00	2130,00	2130,00	2620,50	2620,50
	Gesamt	4	2939,70	158,48	2130,00	2130,00	3184,70	3184,70	3852,40
83,5	männlich	1	3955,00	.	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00
	Gesamt	1	3955,00	.	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00
84,5	weiblich	1	2182,00	.	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00
	Gesamt	1	2182,00	.	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00

n_{gew}: Gewichtungsfaktor $= \frac{\sqrt{Individuenzahl}}{Alter}$

Anhang 30: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahren (Daten Anhang 27).

								Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
168	4575,0	1	0,05	20,50	420,25	8615,13	176610,06	4700,87	-125,87	4604,01	-29,01	4571,96	3,04	4593,28	-18,28
169	5450,0	1	0,05	20,50	420,25	8615,13	176610,06	4700,87	749,13	4604,01	845,99	4571,96	878,04	4593,28	856,72
170	4450,0	1	0,05	20,50	420,25	8615,13	176610,06	4700,87	-250,87	4604,01	-154,01	4571,96	-121,96	4593,28	-143,28
173	4087,5	1	0,05	21,50	462,25	9938,38	213675,06	4690,68	-603,18	4609,27	-521,77	4586,43	-498,93	4599,09	-511,59
174	4550,0	1	0,05	21,50	462,25	9938,38	213675,06	4690,68	-140,68	4609,27	-59,27	4586,43	-36,43	4599,09	-49,09
175	4850,0	1	0,05	21,50	462,25	9938,38	213675,06	4690,68	159,32	4609,27	240,73	4586,43	263,57	4599,09	250,91
176	5012,5	1	0,05	21,50	462,25	9938,38	213675,06	4690,68	321,82	4609,27	403,23	4586,43	426,07	4599,09	413,41
177	5162,5	1	0,05	21,50	462,25	9938,38	213675,06	4690,68	471,82	4609,27	553,23	4586,43	576,07	4599,09	563,41
180	5300,0	1	0,04	22,50	506,25	11390,63	256289,06	4680,50	619,50	4613,92	686,08	4599,46	700,54	4604,85	695,15
183	4915,0	8	0,12	23,50	552,25	12977,88	304980,06	4670,31	244,69	4617,95	297,05	4611,08	303,92	4610,50	304,50
184	4925,0	1	0,04	23,50	552,25	12977,88	304980,06	4670,31	254,69	4617,95	307,05	4611,08	313,92	4610,50	314,50
185	4375,0	1	0,04	23,50	552,25	12977,88	304980,06	4670,31	-295,31	4617,95	-242,95	4611,08	-236,08	4610,50	-235,50
186	4445,0	4	0,09	23,50	552,25	12977,88	304980,06	4670,31	-225,31	4617,95	-172,95	4611,08	-166,08	4610,50	-165,50
188	4139,0	25	0,21	24,00	576,00	13824,00	331776,00	4665,22	-526,22	4619,74	-480,74	4616,37	-477,37	4613,25	-474,25
192	4922,3	20	0,18	24,50	600,25	14706,13	360300,06	4660,12	262,18	4621,38	300,93	4621,32	300,98	4615,94	306,36
193	4290,0	95	0,39	25,00	625,00	15625,00	390625,00	4655,03	-365,03	4622,86	-332,86	4625,93	-335,93	4618,55	-328,55
194	4585,0	20	0,17	26,00	676,00	17576,00	456976,00	4644,84	-59,84	4625,36	-40,36	4634,15	-49,15	4623,54	-38,54
196	5575,0	1	0,03	33,50	1122,25	37595,38	1259445,06	4568,43	1006,57	4624,59	950,41	4656,01	918,99	4643,98	931,02
197	4200.0	1	0.03	33.50	1122.25	37595.38	1259445.06	4568.43	-368.43	4624.59	-424.59	4656.01	-456.01	4643.98	-443.98
200	5621.0	8	0.08	34.50	1190.25	41063.63	1416695.06	4558.25	1062.75	4621.88	999.12	4654.00	967.00	4643.71	977.29
201	4245,0	8	0,08	34,50	1190,25	41063,63	1416695,06	4558,25	-313,25	4621,88	-376,88	4654,00	-409,00	4643,71	-398,71
203	3910,1	2	0,04	35,00	1225,00	42875,00	1500625,00	4553,15	-643,05	4620,30	-710,20	4652,60	-742,50	4643,26	-733,16

Anhang 30: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahren (Daten Anhang 27, Fortsetzung).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
								SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
204	4288,0	25	0,14	35,00	1225,00	42875,00	1500625,00	4553,15	-265,15	4620,30	-332,30	4652,60	-364,60	4643,26	-355,26
206	5425,2	1	0,03	35,00	1225,00	42875,00	1500625,00	4553,15	872,05	4620,30	804,90	4652,60	772,60	4643,26	781,94
211	5031,4	20	0,13	35,50	1260,25	44738,88	1588230,06	4548,06	483,30	4618,56	412,79	4650,94	380,42	4642,59	388,76
212	4787,5	1	0,02	43,50	1892,25	82312,88	3580610,06	4466,56	320,94	4569,93	217,57	4591,44	196,06	4599,86	187,64
213	4775,0	1	0,02	43,50	1892,25	82312,88	3580610,06	4466,56	308,44	4569,93	205,07	4591,44	183,56	4599,86	175,14
216	4882,0	9	0,07	44,50	1980,25	88121,13	3921390,06	4456,37	425,63	4561,09	320,91	4580,06	301,94	4590,06	291,94
217	4860,0	9	0,07	44,50	1980,25	88121,13	3921390,06	4456,37	403,63	4561,09	298,91	4580,06	279,94	4590,06	269,94
220	4145,0	25	0,11	45,00	2025,00	91125,00	4100625,00	4451,28	-306,28	4556,44	-411,44	4574,08	-429,08	4584,78	-439,78
224	4942,1	20	0,10	45,00	2025,00	91125,00	4100625,00	4451,28	490,85	4556,44	385,68	4574,08	368,05	4584,78	357,35
225	4417,0	55	0,14	52,50	2756,25	144703,13	7596914,06	4374,87	42,13	4468,33	-51,33	4463,42	-46,42	4476,37	-59,37
228	3973,2	15	0,07	54,50	2970,25	161878,63	8822385,06	4354,49	-381,29	4439,01	-465,81	4428,18	-454,98	4438,93	-465,73
229	4976,0	8	0,05	54,50	2970,25	161878,63	8822385,06	4354,49	621,51	4439,01	536,99	4428,18	547,82	4438,93	537,07
230	5069,0	54	0,13	54,50	2970,25	161878,63	8822385,06	4354,49	714,51	4439,01	629,99	4428,18	640,82	4438,93	630,07
231	3538,4	11	0,06	54,50	2970,25	161878,63	8822385,06	4354,49	-816,09	4439,01	-900,61	4428,18	-889,78	4438,93	-900,53
232	4369,0	9	0,06	54,50	2970,25	161878,63	8822385,06	4354,49	14,51	4439,01	-70,01	4428,18	-59,18	4438,93	-69,93
237	5046,2	20	0,08	54,50	2970,25	161878,63	8822385,06	4354,49	691,73	4439,01	607,22	4428,18	618,04	4438,93	607,30
238	4267,0	25	0,09	55,00	3025,00	166375,00	9150625,00	4349,40	-82,40	4431,30	-164,30	4419,06	-152,06	4429,07	-162,07
240	3418,7	25	0,08	59,50	3540,25	210644,88	12533370,06	4303,56	-884,86	4354,98	-936,28	4331,98	-913,28	4332,80	-914,10
241	3941,0	30	0,09	61,00	3721,00	226981,00	13845841,00	4288,27	-347,27	4326,78	-385,78	4301,26	-360,26	4298,21	-357,21
243	3852,7	25	0,08	62,00	3844,00	238328,00	14776336,00	4278,09	-425,39	4307,22	-454,52	4280,39	-427,69	4274,65	-421,95
246	4988,0	8	0,04	64,50	4160,25	268336,13	17307680,06	4252,62	735,38	4255,63	732,37	4227,06	760,94	4214,52	773,48
247	4432,0	9	0,05	64,50	4160,25	268336,13	17307680,06	4252,62	179,38	4255,63	176,37	4227,06	204,94	4214,52	217,48
250	4209,0	25	0,08	65,00	4225,00	274625,00	17850625,00	4247,52	-38,52	4244,85	-35,85	4216,22	-7,22	4202,36	6,64

Anhang 30: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahren (Daten Anhang 27, Fortsetzung).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	Polynom 2. Grades SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	Polynom 3. Grades SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	Polynom 4. Grades SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
252	3410,0	30	0,08	66,00	4356,00	287496,00	18974736,00	4237,34	-827,34	4222,84	-812,84	4194,41	-784,41	4177,99	-767,99
254	4843,0	20	0,06	69,00	4761,00	328509,00	22667121,00	4206,77	636,22	4153,11	689,88	4128,13	714,86	4105,32	737,67
255	5340,0	8	0,04	74,50	5550,25	413493,63	30805275,06	4150,74	1189,26	4010,95	1329,05	4005,37	1334,63	3981,27	1358,73
256	4575,0	8	0,04	74,50	5550,25	413493,63	30805275,06	4150,74	424,26	4010,95	564,05	4005,37	569,63	3981,27	593,73
259	3886,0	25	0,07	75,00	5625,00	421875,00	31640625,00	4145,65	-259,65	3997,11	-111,11	3994,26	-108,26	3971,08	-85,08
261	3852,4	13	0,04	82,00	6724,00	551368,00	45212176,00	4074,34	-221,94	3787,22	65,18	3842,87	9,53	3862,00	-9,60
262	3184,7	18	0,05	82,00	6724,00	551368,00	45212176,00	4074,34	-889,64	3787,22	-602,52	3842,87	-658,17	3862,00	-677,30
265	3955,0	8	0,03	83,50	6972,25	582182,88	48612270,06	4059,05	-104,05	3738,34	216,66	3811,99	143,01	3849,48	105,52

SM: Skelettmasse, gemessen
n: Anzahl Beobachtungen je Datensatz
GF: Gewichtungsfaktor= $\sqrt{Individuenzahl} \,/\, Alter$
Alter: Durchschnittsalter aus (Untergrenze$_{Alter}$ + Obergrenze$_{Alter}$)/2
SM_b: Skelettmasse, berechnet
Differenz =SM - SM_b („Residuum“)

Polynom 1. Grades: $SM_b(1) = 4909{,}71752 - 10{,}18759 \times Alter$
Polynom 2. Grades: $SM_b(2) = 4361{,}08429 + 18{,}13280 \times Alter - 0{,}30648 \times Alter^2$
Polynom 3. Grades: $SM_b(3) = 3910{,}75980 + 51{,}31890 * Alter - 1{,}02802 * Alter^2 + 0{,}00478 * Alter^3$
Polynom 4. Grades: $SM_b(4) = 4648{,}06028 - 20{,}50623 \times Alter + 1{,}39742 \times Alter^2 - 0{,}02917 \times Alter^3 + 0{,}00016768 \times Alter^4$

Anhang 31: Skelettmasse für Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahren (Daten Anhang 27).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
								SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
171	3337,5	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	3460,06	-122,56	3385,60	-48,10	3408,16	-70,66	3478,42	-140,92
172	3600,0	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	3460,06	139,94	3385,60	214,40	3408,16	191,84	3478,42	121,58
178	3512,5	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	3446,00	66,50	3381,42	131,08	3397,70	114,80	3435,86	76,64
179	3900,0	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	3446,00	454,00	3381,42	518,58	3397,70	502,30	3435,86	464,14
181	3500,0	1	0,04	22,5	506,25	11390,63	256289,06	3431,93	68,07	3376,86	123,14	3387,41	112,59	3398,65	101,35
182	3736,0	12	0,15	22,5	506,25	11390,63	256289,06	3431,93	304,07	3376,86	359,14	3387,41	348,59	3398,65	337,35
187	3700,0	1	0,04	23,5	552,25	12977,88	304980,06	3417,86	282,14	3371,93	328,07	3377,28	322,72	3366,35	333,65
190	2806,0	25	0,21	24,0	576,00	13824,00	331776,00	3410,83	-604,83	3369,33	-563,33	3372,26	-566,26	3351,92	-545,92
195	3197,0	7	0,09	28,0	784,00	21952,00	614656,00	3354,56	-157,56	3345,16	-148,16	3333,14	-136,14	3270,83	-73,83
198	3975,0	1	0,03	33,5	1122,25	37595,38	1259445,06	3277,18	697,82	3302,21	672,79	3280,57	694,43	3227,66	747,34
199	3150,0	1	0,03	33,5	1122,25	37595,38	1259445,06	3277,18	-127,18	3302,21	-152,21	3280,57	-130,57	3227,66	-77,66
202	4030,0	7	0,08	34,5	1190,25	41063,63	1416695,06	3263,12	766,88	3293,19	736,81	3270,95	759,05	3224,64	805,36
207	3127,1	9	0,09	35,0	1225,00	42875,00	1500625,00	3256,08	-128,98	3288,54	-161,44	3266,12	-139,02	3223,44	-96,34
208	3084,4	2	0,04	35,0	1225,00	42875,00	1500625,00	3256,08	-171,68	3288,54	-204,14	3266,12	-181,72	3223,44	-139,04
209	2841,0	25	0,14	35,0	1225,00	42875,00	1500625,00	3256,08	-415,08	3288,54	-447,54	3266,12	-425,12	3223,44	-382,44
214	3862,5	1	0,02	43,5	1892,25	82312,88	3580610,06	3136,51	725,99	3195,31	667,19	3179,19	683,31	3205,72	656,78
215	2962,5	1	0,02	43,5	1892,25	82312,88	3580610,06	3136,51	-174,01	3195,31	-232,81	3179,19	-216,69	3205,72	-243,22
218	3920,0	8	0,06	44,5	1980,25	88121,13	3921390,06	3122,44	797,56	3182,58	737,42	3168,07	751,93	3201,00	719,00
219	3002,0	4	0,04	44,5	1980,25	88121,13	3921390,06	3122,44	-120,44	3182,58	-180,58	3168,07	-166,07	3201,00	-199,00
223	3004,0	25	0,11	45,0	2025,00	91125,00	4100625,00	3115,41	-111,41	3176,07	-172,07	3162,42	-158,42	3198,26	-194,26
226	2989,0	39	0,12	53,0	2809,00	148877,00	7890481,00	3002,86	-13,86	3059,33	-70,33	3061,54	-72,54	3109,57	-120,57
227	3659,0	55	0,14	53,5	2862,25	153130,38	8192475,06	2995,83	663,17	3051,24	607,76	3054,46	604,54	3100,93	558,07
233	3005,2	7	0,05	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	2981,76	23,44	3034,79	-29,59	3039,98	-34,78	3082,54	-77,34
234	3388,0	8	0,05	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	2981,76	406,24	3034,79	353,21	3039,98	348,02	3082,54	305,46
235	2336,2	13	0,07	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	2981,76	-645,56	3034,79	-698,59	3039,98	-703,78	3082,54	-746,34

Anhang 31: Skelettmasse für Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahren (Daten Anhang 27, Fortsetzung).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
								SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
236	3320,0	7	0,05	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	2981,76	338,24	3034,79	285,21	3039,98	280,02	3082,54	237,46
239	2815,0	25	0,09	55,0	3025,00	166375,00	9150625,00	2974,73	-159,73	3026,43	-211,43	3032,58	-217,58	3072,78	-257,78
242	2878,0	30	0,09	61,0	3721,00	226981,00	13845841,00	2890,32	-12,32	2918,80	-40,80	2934,36	-56,36	2929,58	-51,58
244	2828,2	25	0,08	62,0	3844,00	238328,00	14776336,00	2876,26	-48,06	2899,56	-71,36	2916,14	-87,94	2901,75	-73,55
245	2302,5	25	0,08	62,0	3844,00	238328,00	14776336,00	2876,26	-573,76	2899,56	-597,06	2916,14	-613,64	2901,75	-599,25
248	3827,0	6	0,04	64,5	4160,25	268336,13	17307680,06	2841,09	985,91	2849,83	977,17	2868,01	958,99	2828,91	998,09
249	2984,0	8	0,04	64,5	4160,25	268336,13	17307680,06	2841,09	142,91	2849,83	134,17	2868,01	115,99	2828,91	155,09
251	2724,0	25	0,08	65,0	4225,00	274625,00	17850625,00	2834,05	-110,05	2839,61	-115,61	2857,92	-133,92	2813,94	-89,94
253	2297,0	30	0,08	66,0	4356,00	287496,00	18974736,00	2819,99	-522,99	2818,88	-521,88	2837,27	-540,27	2783,77	-486,77
257	3373,0	9	0,04	74,5	5550,25	413493,63	30805275,06	2700,41	672,59	2627,70	745,30	2633,49	739,51	2544,60	828,40
258	3022,0	8	0,04	74,5	5550,25	413493,63	30805275,06	2700,41	321,59	2627,70	394,30	2633,49	388,51	2544,60	477,40
260	2529,0	25	0,07	75,0	5625,00	421875,00	31640625,00	2693,38	-164,38	2615,62	-86,62	2619,78	-90,78	2533,43	-4,43
263	2620,5	14	0,05	82,0	6724,00	551368,00	45212176,00	2594,90	25,60	2436,71	183,79	2405,32	215,18	2455,72	164,78
264	2130,0	15	0,05	82,0	6724,00	551368,00	45212176,00	2594,90	-464,90	2436,71	-306,71	2405,32	-275,32	2455,72	-325,72
266	2182,0	5	0,03	84,5	7140,25	603351,13	50983170,06	2559,73	-377,73	2368,40	-186,40	2317,75	-135,75	2478,84	-296,84

SM: Skelettmasse, gemessen
n: Anzahl Beobachtungen je Datensatz
GF: Gewichtungsfaktor= $\sqrt{Individuenzahl} \,/\, Alter$
Alter: Durchschnittsalter aus ($Untergrenze_{Alter}$ + $Obergrenze_{Alter}$)/2
SM_b Skelettmasse, berechnet
Differenz =SM - SM_b („Residuum“)

Polynom 1. Grades: $SM_b(1) = 3748{,}45050 - 14{,}06765 \times Alter$
Polynom 2. Grades: $SM_b(2) = 3389{,}46585 + 3{,}62173 \times Alter - 0{,}18586 \times Alter^2$
Polynom 3. Grades: $SM_b(3) = 3692{,}65261 - 18{,}50013 \times Alter + 0{,}28928 \times Alter^2 - 0{,}00311 \times Alter^3$
Polynom 4. Grades: $SM_b(4) = 6396{,}28365 - 281{,}90563 \times Alter + 9{,}14129 \times Alter^2 - 0{,}12617 \times Alter^3 + 0{,}00060328 \times Alter^4$

Anhang 32: Skelettmassen für 29 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 27 nach Ausschluss von 12 Datensätzen bzw. 300 Individuen von GARN 1970).

Alter [a]	Geschlecht	Skelettmasse [g]							
		n_{gew}	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
20,5	männlich	3	4825,00	120,34	4450,00	4450,00	4575,00	5450,00	5450,00
	weiblich	2	3468,75	41,00	3337,50	3337,50	3468,75	3600,00	3600,00
	Gesamt	5	4282,50	185,96	3337,50	3600,00	4450,00	4575,00	5450,00
21,5	männlich	5	4732,50	91,91	4087,50	4550,00	4850,00	5012,50	5162,50
	weiblich	2	3706,25	59,09	3512,50	3512,50	3706,25	3900,00	3900,00
	Gesamt	7	4439,29	133,70	3512,50	3900,00	4550,00	5012,50	5162,50
22,5	männlich	1	5300,00	.	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00	5300,00
	weiblich	2	3683,13	43,83	3500,00	3736,00	3736,00	3736,00	3736,00
	Gesamt	3	3979,04	220,05	3500,00	3736,00	3736,00	3736,00	5300,00
23,5	männlich	4	4699,72	76,91	4375,00	4445,00	4915,00	4915,00	4925,00
	weiblich	1	3700,00	.	3700,00	3700,00	3700,00	3700,00	3700,00
	Gesamt	5	4572,02	117,09	3700,00	4375,00	4445,00	4915,00	4925,00
24,5	männlich	1	4922,30	.	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30
	Gesamt	1	4922,30	.	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30	4922,30
25	männlich	1	4290,00	.	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00
	Gesamt	1	4290,00	.	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00	4290,00
26	männlich	1	4585,00	.	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00
	Gesamt	1	4585,00	.	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00	4585,00
28	weiblich	1	3197,00	.	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00
	Gesamt	1	3197,00	.	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00	3197,00
33,5	männlich	2	4887,50	167,98	4200,00	4200,00	4887,50	5575,00	5575,00
	weiblich	2	3562,50	100,79	3150,00	3150,00	3562,50	3975,00	3975,00
	Gesamt	4	4225,00	173,96	3150,00	3562,50	4087,50	4887,50	5575,00
34,5	männlich	2	4933,00	278,59	4245,00	4245,00	4933,00	5621,00	5621,00
	weiblich	1	4030,00	.	4030,00	4030,00	4030,00	4030,00	4030,00
	Gesamt	3	4645,25	245,17	4030,00	4030,00	4245,00	5621,00	5621,00
35	männlich	2	4537,67	196,01	3910,10	3910,10	3910,10	5425,20	5425,20
	weiblich	2	3113,42	7,08	3084,40	3084,40	3127,10	3127,10	3127,10
	Gesamt	4	3616,97	207,30	3084,40	3127,10	3127,10	3910,10	5425,20

Anhang 32: Skelettmassen für 29 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 27 nach Ausschluss von 12 Datensätzen bzw. 300 Individuen von GARN 1970, Fortsetzung).

Alter		Skelettmasse [g]							
[a]	Geschlecht	n_{gew}	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
35,5	männlich	1	5031,36	.	5031,36	5031,36	5031,36	5031,36	5031,36
	Gesamt	1	5031,36	.	5031,36	5031,36	5031,36	5031,36	5031,36
43,5	männlich	2	4781,25	1,34	4775,00	4775,00	4781,25	4787,50	4787,50
	weiblich	2	3412,50	96,49	2962,50	2962,50	3412,50	3862,50	3862,50
	Gesamt	4	4096,88	132,14	2962,50	3412,50	4318,75	4781,25	4787,50
44,5	männlich	2	4871,00	4,04	4860,00	4860,00	4871,00	4882,00	4882,00
	weiblich	2	3539,75	148,95	3002,00	3002,00	3920,00	3920,00	3920,00
	Gesamt	4	4277,39	207,17	3002,00	3920,00	4860,00	4882,00	4882,00
45	männlich	1	4942,13	.	4942,13	4942,13	4942,13	4942,13	4942,13
	Gesamt	1	4942,13	.	4942,13	4942,13	4942,13	4942,13	4942,13
52,5	männlich	1	4417,00	.	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00
	Gesamt	1	4417,00	.	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00	4417,00
53	weiblich	1	2989,00	.	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00
	Gesamt	1	2989,00	.	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00	2989,00
53,5	weiblich	1	3659,00	.	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00
	Gesamt	1	3659,00	.	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00	3659,00
54,5	männlich	6	4594,52	174,79	3538,40	3973,20	4976,00	5069,00	5069,00
	weiblich	4	2962,86	117,81	2336,20	2336,20	3005,20	3320,00	3388,00
	Gesamt	10	4071,28	254,63	2336,20	3388,00	3973,20	5046,23	5069,00
59,5	männlich	1	3418,70	.	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70
	Gesamt	1	3418,70	.	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70	3418,70
61	männlich	1	3941,00	.	3941,00	3941,00	3941,00	3941,00	3941,00
	weiblich	1	2878,00	.	2878,00	2878,00	2878,00	2878,00	2878,00
	Gesamt	2	3409,50	225,23	2878,00	2878,00	3409,50	3941,00	3941,00
62	männlich	1	3852,70	.	3852,70	3852,70	3852,70	3852,70	3852,70
	weiblich	2	2565,35	105,56	2302,50	2302,50	2565,35	2828,20	2828,20
	Gesamt	3	2994,47	223,88	2302,50	2302,50	2828,20	3852,70	3852,70
64,5	männlich	2	4701,82	83,53	4432,00	4432,00	4432,00	4988,00	4988,00
	weiblich	2	3375,24	120,26	2984,00	2984,00	2984,00	3827,00	3827,00
	Gesamt	4	4071,40	179,82	2984,00	2984,00	4432,00	4988,00	4988,00

Anhang 32: Skelettmassen für 29 Altersklassen von 20,5 bis 84,5 Jahre für beide Geschlechter und unter Berücksichtigung gewichteter Datensätze (Daten Anhang 27 nach Ausschluss von 12 Datensätzen bzw. 300 Individuen von GARN 1970, Fortsetzung).

Alter [a]	Geschlecht	Skelettmasse [g]							
		n_{gew}	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
66	männlich	1	3410,00	.	3410,00	3410,00	3410,00	3410,00	3410,00
	weiblich	1	2297,00	.	2297,00	2297,00	2297,00	2297,00	2297,00
	Gesamt	2	2853,50	226,72	2297,00	2297,00	2853,50	3410,00	3410,00
69	männlich	1	4842,99	.	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99
	Gesamt	1	4842,99	.	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99	4842,99
74,5	männlich	2	4957,50	105,40	4575,00	4575,00	4957,50	5340,00	5340,00
	weiblich	2	3202,67	49,07	3022,00	3022,00	3373,00	3373,00	3373,00
	Gesamt	4	4066,98	209,90	3022,00	3373,00	3373,00	4575,00	5340,00
82	männlich	2	3491,45	102,94	3184,70	3184,70	3184,70	3852,40	3852,40
	weiblich	2	2371,02	74,72	2130,00	2130,00	2130,00	2620,50	2620,50
	Gesamt	4	2939,70	158,48	2130,00	2130,00	3184,70	3184,70	3852,40
83,5	männlich	1	3955,00	.	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00
	Gesamt	1	3955,00	.	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00	3955,00
84,5	weiblich	1	2182,00	.	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00
	Gesamt	1	2182,00	.	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00	2182,00

n_{gew}: Gewichtungsfaktor $= \frac{\sqrt{Individuenzahl}}{Alter}$

Anhang 33: Skelettmasse für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahren (Daten Anhang 32).

								Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
168	4575,0	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	4782,97	-207,97	4676,05	-101,05	4601,65	-26,65	4611,01	-36,01
169	5450,0	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	4782,97	667,03	4676,05	773,95	4601,65	848,35	4611,01	838,99
170	4450,0	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	4782,97	-332,97	4676,05	-226,05	4601,65	-151,65	4611,01	-161,01
173	4087,5	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4771,73	-684,23	4682,55	-595,05	4630,36	-542,86	4635,75	-548,25
174	4550,0	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4771,73	-221,73	4682,55	-132,55	4630,36	-80,36	4635,75	-85,75
175	4850,0	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4771,73	78,27	4682,55	167,45	4630,36	219,64	4635,75	214,25
176	5012,5	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4771,73	240,77	4682,55	329,95	4630,36	382,14	4635,75	376,75
177	5162,5	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	4771,73	390,77	4682,55	479,95	4630,36	532,14	4635,75	526,75
180	5300,0	1	0,04	22,5	506,25	11390,63	256289,06	4760,49	539,51	4688,35	611,65	4656,38	643,62	4658,46	641,54
183	4915,0	8	0,12	23,5	552,25	12977,88	304980,06	4749,26	165,74	4693,44	221,56	4679,79	235,21	4679,16	235,84
184	4925,0	1	0,04	23,5	552,25	12977,88	304980,06	4749,26	175,74	4693,44	231,56	4679,79	245,21	4679,16	245,84
185	4375,0	1	0,04	23,5	552,25	12977,88	304980,06	4749,26	-374,26	4693,44	-318,44	4679,79	-304,79	4679,16	-304,16
186	4445,0	4	0,09	23,5	552,25	12977,88	304980,06	4749,26	-304,26	4693,44	-248,44	4679,79	-234,79	4679,16	-234,16
192	4922,3	20	0,18	24,5	600,25	14706,13	360300,06	4738,02	184,28	4697,82	224,48	4700,65	221,65	4697,85	224,45
193	4290,0	95	0,39	25,0	625,00	15625,00	390625,00	4732,40	-442,40	4699,74	-409,74	4710,15	-420,15	4706,45	-416,45
194	4585,0	20	0,17	26,0	676,00	17576,00	456976,00	4721,16	-136,16	4703,06	-118,06	4727,32	-142,32	4722,18	-137,18
196	5575,0	1	0,03	33,5	1122,25	37595,38	1259445,06	4636,88	938,12	4705,42	869,58	4784,97	790,03	4779,59	795,41
197	4200,0	1	0,03	33,5	1122,25	37595,38	1259445,06	4636,88	-436,88	4705,42	-505,42	4784,97	-584,97	4779,59	-579,59
200	5621,0	8	0,08	34,5	1190,25	41063,63	1416695,06	4625,65	995,35	4702,72	918,28	4784,08	836,92	4779,55	841,45
201	4245,0	8	0,08	34,5	1190,25	41063,63	1416695,06	4625,65	-380,65	4702,72	-457,72	4784,08	-539,08	4779,55	-534,55
203	3910,1	2	0,04	35,0	1225,00	42875,00	1500625,00	4620,03	-709,93	4701,11	-791,01	4782,96	-872,86	4778,89	-868,79
206	5425,2	1	0,03	35,0	1225,00	42875,00	1500625,00	4620,03	805,17	4701,11	724,09	4782,96	642,24	4778,89	646,31

Anhang 33: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahren (Daten Anhang 32, Fortsetzung).

								Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
211	5031,4	20	0,13	35,5	1260,25	44738,88	1588230,06	4614,41	416,95	4699,32	332,03	4781,39	249,96	4777,80	253,55
212	4787,5	1	0,02	43,5	1892,25	82312,88	3580610,06	4524,51	262,99	4646,65	140,85	4703,11	84,39	4707,43	80,07
213	4775,0	1	0,02	43,5	1892,25	82312,88	3580610,06	4524,51	250,49	4646,65	128,35	4703,11	71,89	4707,43	67,57
216	4882,0	9	0,07	44,5	1980,25	88121,13	3921390,06	4513,27	368,73	4636,88	245,12	4687,24	194,76	4692,28	189,72
217	4860,0	9	0,07	44,5	1980,25	88121,13	3921390,06	4513,27	346,73	4636,88	223,12	4687,24	172,76	4692,28	167,72
224	4942,1	20	0,10	45,0	2025,00	91125,00	4100625,00	4507,65	434,48	4631,73	310,40	4678,88	263,25	4684,24	257,89
225	4417,0	55	0,14	52,5	2756,25	144703,13	7596914,06	4423,37	-6,37	4533,27	-116,27	4525,42	-108,42	4531,56	-114,56
228	3973,2	15	0,07	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	4400,90	-427,70	4500,29	-527,09	4477,76	-504,56	4482,75	-509,55
229	4976,0	8	0,05	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	4400,90	575,10	4500,29	475,71	4477,76	498,24	4482,75	493,25
230	5069,0	54	0,13	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	4400,90	668,10	4500,29	568,71	4477,76	591,24	4482,75	586,25
231	3538,4	11	0,06	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	4400,90	-862,50	4500,29	-961,89	4477,76	-939,36	4482,75	-944,35
232	4369,0	9	0,06	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	4400,90	-31,90	4500,29	-131,29	4477,76	-108,76	4482,75	-113,75
237	5046,2	20	0,08	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	4400,90	645,33	4500,29	545,93	4477,76	568,46	4482,75	563,47
240	3418,7	25	0,08	59,5	3540,25	210644,88	12533370,06	4344,71	-926,01	4405,47	-986,77	4351,93	-933,23	4351,90	-933,20
241	3941,0	30	0,09	61,0	3721,00	226981,00	13845841,00	4327,86	-386,86	4373,57	-432,57	4313,25	-372,25	4311,29	-370,29
243	3852,7	25	0,08	62,0	3844,00	238328,00	14776336,00	4316,62	-463,92	4351,43	-498,73	4287,43	-434,73	4284,13	-431,43
246	4988,0	8	0,04	64,5	4160,25	268336,13	17307680,06	4288,53	699,47	4292,96	695,04	4223,30	764,70	4216,57	771,43
247	4432,0	9	0,05	64,5	4160,25	268336,13	17307680,06	4288,53	143,47	4292,96	139,04	4223,30	208,70	4216,57	215,43
252	3410,0	30	0,08	66,0	4356,00	287496,00	18974736,00	4271,67	-861,67	4255,76	-845,76	4185,43	-775,43	4176,74	-766,74
254	4843,0	20	0,06	69,0	4761,00	328509,00	22667121,00	4237,96	605,03	4176,58	666,41	4112,13	730,86	4100,15	742,84
255	5340,0	8	0,04	74,5	5550,25	413493,63	30805275,06	4176,15	1163,85	4014,88	1325,12	3991,48	1348,52	3978,30	1361,70

Anhang 33: Zusammenhang zwischen Alter und Skelettmasse für Männer im Alter von 20,5 bis 83,5 Jahren (Daten anhang 32, Fortsetzung).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	Polynom 2. Grades SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	Polynom 3. Grades SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	Polynom 4. Grades SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
256	4575,0	8	0,04	74,5	5550,25	413493,63	30805275,06	4176,15	398,85	4014,88	560,12	3991,48	583,52	3978,30	596,70
261	3852,4	13	0,04	82,0	6724,00	551368,00	45212176,00	4091,87	-239,47	3759,90	92,50	3873,17	-20,77	3879,45	-27,05
262	3184,7	18	0,05	82,0	6724,00	551368,00	45212176,00	4091,87	-907,17	3759,90	-575,20	3873,17	-688,47	3879,45	-694,75
265	3955,0	8	0,03	83,5	6972,25	582182,88	48612270,06	4075,02	-120,02	3704,13	250,87	3858,12	96,88	3872,85	82,15

SM: Skelettmasse, gemessen
n: Anzahl Beobachtungen je Datensatz
GF: Gewichtungsfaktor= $\sqrt{Individuenzahl}\,/\,Alter$
Alter: Durchschnittsalter aus (Untergrenze$_{Alter}$ + Obergrenze$_{Alter}$)/2
SM_b: Skelettmasse, berechnet
Differenz =SM - SM_b („Residuum“)

Polynom 1. Grades: $SM_b(1) = 5013{,}33334 - 11{,}23734 \times Alter$
Polynom 2. Grades: $SM_b(2) = 4386{,}82018 + 21{,}36010 \times Alter - 0{,}35373 \times Alter^2$
Polynom 3. Grades: $SM_b(3) = 3310{,}33348 + 100{,}65104 \times Alter - 2{,}06817 \times Alter^2 + 0{,}01127 \times Alter^3$
Polynom 4. Grades: $SM_b(4) = 3652{,}60174 + 67{,}13628 \times Alter - 0{,}93158 \times Alter^2 - 0{,}00468 \times Alter^3 + 0{,}00007887 \times Alter^4$

Anhang 34: Skelettmasse für Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahren (Daten Anhang 32).

								Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
171	3337,5	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	3691,74	-354,24	3625,78	-288,28	3593,98	-256,48	3594,53	-257,03
172	3600,0	1	0,05	20,5	420,25	8615,13	176610,06	3691,74	-91,74	3625,78	-25,78	3593,98	6,02	3594,53	5,47
178	3512,5	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	3673,24	-160,74	3616,09	-103,59	3594,00	-81,50	3594,26	-81,76
179	3900,0	1	0,05	21,5	462,25	9938,38	213675,06	3673,24	226,76	3616,09	283,91	3594,00	306,00	3594,26	305,74
181	3500,0	1	0,04	22,5	506,25	11390,63	256289,06	3654,74	-154,74	3606,07	-106,07	3592,86	-92,86	3592,86	-92,86
182	3736,0	12	0,15	22,5	506,25	11390,63	256289,06	3654,74	81,26	3606,07	129,93	3592,86	143,14	3592,86	143,14
187	3700,0	1	0,04	23,5	552,25	12977,88	304980,06	3636,23	63,77	3595,73	104,27	3590,57	109,43	3590,37	109,63
195	3197,0	7	0,09	28,0	784,00	21952,00	614656,00	3552,97	-355,97	3545,07	-348,07	3566,87	-369,87	3566,21	-369,21
198	3975,0	1	0,03	33,5	1122,25	37595,38	1259445,06	3451,21	523,79	3474,08	500,92	3510,98	464,02	3510,45	464,55
199	3150,0	1	0,03	33,5	1122,25	37595,38	1259445,06	3451,21	-301,21	3474,08	-324,08	3510,98	-360,98	3510,45	-360,45
202	4030,0	7	0,08	34,5	1190,25	41063,63	1416695,06	3432,71	597,29	3460,10	569,90	3497,97	532,03	3497,51	532,49
207	3127,1	9	0,09	35,0	1225,00	42875,00	1500625,00	3423,46	-296,36	3452,99	-325,89	3491,16	-364,06	3490,74	-363,64
208	3084,4	2	0,04	35,0	1225,00	42875,00	1500625,00	3423,46	-339,06	3452,99	-368,59	3491,16	-406,76	3490,74	-406,34
214	3862,5	1	0,02	43,5	1892,25	82312,88	3580610,06	3266,19	596,31	3319,44	543,06	3348,00	514,50	3348,26	514,24
215	2962,5	1	0,02	43,5	1892,25	82312,88	3580610,06	3266,19	-303,69	3319,44	-356,94	3348,00	-385,50	3348,26	-385,76
218	3920,0	8	0,06	44,5	1980,25	88121,13	3921390,06	3247,69	672,31	3302,16	617,84	3328,19	591,81	3328,52	591,48
219	3002,0	4	0,04	44,5	1980,25	88121,13	3921390,06	3247,69	-245,69	3302,16	-300,16	3328,19	-326,19	3328,52	-326,52
226	2989,0	39	0,12	53,0	2809,00	148877,00	7890481,00	3090,42	-101,42	3141,95	-152,95	3141,50	-152,50	3141,96	-152,96
227	3659,0	55	0,14	53,5	2862,25	153130,38	8192475,06	3081,16	577,84	3131,79	527,21	3129,70	529,30	3130,15	528,85
233	3005,2	7	0,05	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	3062,66	-57,46	3111,21	-106,01	3105,91	-100,71	3106,32	-101,12
234	3388,0	8	0,05	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	3062,66	325,34	3111,21	276,79	3105,91	282,09	3106,32	281,68
235	2336,2	13	0,07	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	3062,66	-726,46	3111,21	-775,01	3105,91	-769,71	3106,32	-770,12
236	3320,0	7	0,05	54,5	2970,25	161878,63	8822385,06	3062,66	257,34	3111,21	208,79	3105,91	214,09	3106,32	213,68

Anhang 34: Skelettmasse für Frauen im Alter von 20,5 bis 84,5 Jahren (Daten Anhang 32, Fortsetzung).

lfd. Nr.	SM [g]	n	GF	Alter [a]	Alter² [a²]	Alter³ [a³]	Alter⁴ [a⁴]	Polynom 1. Grades		Polynom 2. Grades		Polynom 3. Grades		Polynom 4. Grades	
								SM_b (1) [g]	Differenz (1) [g]	SM_b (2) [g]	Differenz (2) [g]	SM_b (3) [g]	Differenz (3) [g]	SM_b (4) [g]	Differenz (4) [g]
242	2878,0	30	0,09	61,0	3721,00	226981,00	13845841,00	2942,40	-64,40	2969,39	-91,39	2946,59	-68,59	2946,51	-68,51
244	2828,2	25	0,08	62,0	3844,00	238328,00	14776336,00	2923,90	-95,70	2946,33	-118,13	2921,65	-93,45	2921,47	-93,27
245	2302,5	25	0,08	62,0	3844,00	238328,00	14776336,00	2923,90	-621,40	2946,33	-643,83	2921,65	-619,15	2921,47	-618,97
248	3827,0	6	0,04	64,5	4160,25	268336,13	17307680,06	2877,64	949,36	2887,25	939,75	2859,23	967,77	2858,80	968,20
249	2984,0	8	0,04	64,5	4160,25	268336,13	17307680,06	2877,64	106,36	2887,25	96,75	2859,23	124,77	2858,80	125,20
253	2297,0	30	0,08	66,0	4356,00	287496,00	18974736,00	2849,89	-552,89	2850,81	-553,81	2821,86	-524,86	2821,27	-524,27
257	3373,0	9	0,04	74,5	5550,25	413493,63	30805275,06	2692,62	680,38	2630,29	742,71	2616,23	756,77	2615,23	757,77
258	3022,0	8	0,04	74,5	5550,25	413493,63	30805275,06	2692,62	329,38	2630,29	391,71	2616,23	405,77	2615,23	406,77
263	2620,5	14	0,05	82,0	6724,00	551368,00	45212176,00	2553,85	66,65	2415,91	204,59	2453,30	167,20	2453,56	166,94
264	2130,0	15	0,05	82,0	6724,00	551368,00	45212176,00	2553,85	-423,85	2415,91	-285,91	2453,30	-323,30	2453,56	-323,56
266	2182,0	5	0,03	84,5	7140,25	603351,13	50983170,06	2507,59	-325,59	2340,32	-158,32	2405,01	-223,01	2406,31	-224,31

SM: Skelettmasse, gemessen
n: Anzahl Beobachtungen je Datensatz
GF: Gewichtungsfaktor= $\sqrt{Individuenzahl} \,/\, Alter$
Alter: Durchschnittsalter aus ($Untergrenze_{Alter}$ + $Obergrenze_{Alter}$)/2
SM_b: Skelettmasse, berechnet
Differenz =SM - SM_b („Residuum“)

Polynom 1. Grades: $SM_b(1) = 4071{,}03945 - 18{,}50233 \times Alter$
Polynom 2. Grades: $SM_b(2) = 3751{,}66896 - 2{,}75787 \times Alter - 0{,}16502 \times Alter^2$
Polynom 3. Grades: $SM_b(3) = 3288{,}96897 + 31{,}10570 \times Alter - 0{,}88755 \times Alter^2 + 0{,}00468 \times Alter^3$
Polynom 4. Grades: $SM_b(4) = 3314{,}66208 + 28{,}57971 \times Alter - 0{,}80222 \times Alter^2 + 0{,}00349 \times Alter^3 + 0{,}00000583 \times Alter^4$

Anhang 35: Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 83 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32).

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz für ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	1-2	2-3
0	1					92,3	97,94	0,4854	0,5146						
1	2					190,32	110,82	0,6320	0,3680						
2	3					301,14	123,70	0,7088	0,2912						
3	4					424,85	136,58	0,7567	0,2433						
4	5					561,43	149,46	0,7898	0,2102						
5	6					710,89	162,34	0,8141	0,1859						
6	7					873,23	175,22	0,8329	0,1671						
7	8					1048,44	188,10	0,8479	0,1521						
8	9					1236,54	200,98	0,8602	0,1398						
9	10					1437,52	213,85	0,8705	0,1295						
10	11					1651,37	226,73	0,8793	0,1207						
11	12					1878,10	239,61	0,8869	0,1131						
12	13					2117,72	252,49	0,8935	0,1065						
13	14					2370,21	265,37	0,8993	0,1007						
14	15					2635,58	278,25	0,9045	0,0955						
15	16					2913,83	291,13	0,9092	0,0908						
16	17					3204,95	304,01	0,9134	0,0866						
17	18					3508,96	316,89	0,9172	0,0828						
18	19					3825,85	329,76	0,9206	0,0794						
19	20					4155,61	342,64	0,9238	0,0762						
20	21		279,10	0,9416	0,0584	4498,25	181,13	0,9613	0,0387		118,09	0,9744	0,0256	0,0197	0,0131
21	22	4777,35	-11,24	1,0024	-0,0024	4679,39	6,15	0,9987	0,0013	4616,34	27,35	0,9941	0,0059	-0,0037	-0,0046
22	23	4766,11	-11,24	1,0024	-0,0024	4685,54	5,44	0,9988	0,0012	4643,70	24,71	0,9947	0,0053	-0,0035	-0,0041

Anhang 35: Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 83 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32, Fortsetzung).

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz für ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	1-2	2-3
23	24	4754,87	-11,24	1,0024	-0,0024	4690,98	4,73	0,9990	0,0010	4668,40	22,12	0,9953	0,0047	-0,0034	-0,0037
24	25	4743,64	-11,24	1,0024	-0,0024	4695,71	4,03	0,9991	0,0009	4690,53	19,61	0,9958	0,0042	-0,0032	-0,0033
25	26	4732,40	-11,24	1,0024	-0,0024	4699,74	3,32	0,9993	0,0007	4710,14	17,17	0,9964	0,0036	-0,0031	-0,0029
26	27	4721,16	-11,24	1,0024	-0,0024	4703,06	2,61	0,9994	0,0006	4727,31	14,79	0,9969	0,0031	-0,0029	-0,0026
27	28	4709,93	-11,24	1,0024	-0,0024	4705,67	1,90	0,9996	0,0004	4742,09	12,48	0,9974	0,0026	-0,0028	-0,0022
28	29	4698,69	-11,24	1,0024	-0,0024	4707,58	1,20	0,9997	0,0003	4754,57	10,23	0,9979	0,0021	-0,0027	-0,0019
29	30	4687,45	-11,24	1,0024	-0,0024	4708,78	0,49	0,9999	0,0001	4764,81	8,06	0,9983	0,0017	-0,0025	-0,0016
30	31	4676,21	-11,24	1,0024	-0,0024	4709,27	-0,22	1,0000	0,0000	4772,86	5,95	0,9988	0,0012	-0,0024	-0,0013
31	32	4664,98	-11,24	1,0024	-0,0024	4709,05	-0,92	1,0002	-0,0002	4778,82	3,91	0,9992	0,0008	-0,0022	-0,0010
32	33	4653,74	-11,24	1,0024	-0,0024	4708,12	-1,63	1,0003	-0,0003	4782,73	1,94	0,9996	0,0004	-0,0021	-0,0008
33	34	4642,50	-11,24	1,0024	-0,0024	4706,49	-2,34	1,0005	-0,0005	4784,67	0,03	1,0000	0,0000	-0,0019	-0,0005
34	35	4631,26	-11,24	1,0024	-0,0024	4704,15	-3,05	1,0006	-0,0006	4784,70	-1,80	1,0004	-0,0004	-0,0018	-0,0003
35	36	4620,03	-11,24	1,0024	-0,0024	4701,10	-3,75	1,0008	-0,0008	4782,90	-3,57	1,0007	-0,0007	-0,0016	-0,0001
36	37	4608,79	-11,24	1,0024	-0,0024	4697,35	-4,46	1,0010	-0,0010	4779,33	-5,27	1,0011	-0,0011	-0,0015	0,0002
37	38	4597,55	-11,24	1,0025	-0,0025	4692,89	-5,17	1,0011	-0,0011	4774,05	-6,91	1,0014	-0,0014	-0,0013	0,0003
38	39	4586,31	-11,24	1,0025	-0,0025	4687,72	-5,88	1,0013	-0,0013	4767,14	-8,47	1,0018	-0,0018	-0,0012	0,0005
39	40	4575,08	-11,24	1,0025	-0,0025	4681,84	-6,58	1,0014	-0,0014	4758,67	-9,97	1,0021	-0,0021	-0,0011	0,0007
40	41	4563,84	-11,24	1,0025	-0,0025	4675,26	-7,29	1,0016	-0,0016	4748,70	-11,41	1,0024	-0,0024	-0,0009	0,0008
41	42	4552,60	-11,24	1,0025	-0,0025	4667,96	-8,00	1,0017	-0,0017	4737,29	-12,77	1,0027	-0,0027	-0,0008	0,0010
42	43	4541,37	-11,24	1,0025	-0,0025	4659,96	-8,71	1,0019	-0,0019	4724,52	-14,07	1,0030	-0,0030	-0,0006	0,0011
43	44	4530,13	-11,24	1,0025	-0,0025	4651,26	-9,41	1,0020	-0,0020	4710,46	-15,29	1,0033	-0,0033	-0,0005	0,0012
44	45	4518,89	-11,24	1,0025	-0,0025	4641,84	-10,12	1,0022	-0,0022	4695,16	-16,45	1,0035	-0,0035	-0,0003	0,0013
45	46	4507,65	-11,24	1,0025	-0,0025	4631,72	-10,83	1,0023	-0,0023	4678,71	-17,55	1,0038	-0,0038	-0,0002	0,0014
46	47	4496,42	-11,24	1,0025	-0,0025	4620,89	-11,54	1,0025	-0,0025	4661,16	-18,57	1,0040	-0,0040	0,0000	0,0015

Anhang 35: Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 83 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32, Fortsetzung).

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz für ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	1-2	2-3
47	48	4485,18	-11,24	1,0025	-0,0025	4609,36	-12,24	1,0027	-0,0027	4642,58	-19,53	1,0042	-0,0042	0,0002	0,0016
48	49	4473,94	-11,24	1,0025	-0,0025	4597,11	-12,95	1,0028	-0,0028	4623,05	-20,42	1,0044	-0,0044	0,0003	0,0016
49	50	4462,70	-11,24	1,0025	-0,0025	4584,16	-13,66	1,0030	-0,0030	4602,63	-21,25	1,0046	-0,0046	0,0005	0,0016
50	51	4451,47	-11,24	1,0025	-0,0025	4570,50	-14,37	1,0032	-0,0032	4581,39	-22,00	1,0048	-0,0048	0,0006	0,0017
51	52	4440,23	-11,24	1,0025	-0,0025	4556,13	-15,07	1,0033	-0,0033	4559,39	-22,69	1,0050	-0,0050	0,0008	0,0017
52	53	4428,99	-11,24	1,0025	-0,0025	4541,06	-15,78	1,0035	-0,0035	4536,70	-23,31	1,0052	-0,0052	0,0009	0,0017
53	54	4417,75	-11,24	1,0026	-0,0026	4525,28	-16,49	1,0037	-0,0037	4513,39	-23,86	1,0053	-0,0053	0,0011	0,0017
54	55	4406,52	-11,24	1,0026	-0,0026	4508,79	-17,20	1,0038	-0,0038	4489,53	-24,34	1,0055	-0,0055	0,0013	0,0016
55	56	4395,28	-11,24	1,0026	-0,0026	4491,59	-17,90	1,0040	-0,0040	4465,18	-24,76	1,0056	-0,0056	0,0014	0,0016
56	57	4384,04	-11,24	1,0026	-0,0026	4473,69	-18,61	1,0042	-0,0042	4440,42	-25,11	1,0057	-0,0057	0,0016	0,0015
57	58	4372,80	-11,24	1,0026	-0,0026	4455,08	-19,32	1,0044	-0,0044	4415,31	-25,39	1,0058	-0,0058	0,0018	0,0014
58	59	4361,57	-11,24	1,0026	-0,0026	4435,76	-20,03	1,0045	-0,0045	4389,92	-25,61	1,0059	-0,0059	0,0020	0,0013
59	60	4350,33	-11,24	1,0026	-0,0026	4415,73	-20,73	1,0047	-0,0047	4364,31	-25,75	1,0059	-0,0059	0,0021	0,0012
60	61	4339,09	-11,24	1,0026	-0,0026	4395,00	-21,44	1,0049	-0,0049	4338,56	-25,83	1,0060	-0,0060	0,0023	0,0011
61	62	4327,86	-11,24	1,0026	-0,0026	4373,56	-22,15	1,0051	-0,0051	4312,72	-25,84	1,0060	-0,0060	0,0025	0,0009
62	63	4316,62	-11,24	1,0026	-0,0026	4351,41	-22,86	1,0053	-0,0053	4286,88	-25,79	1,0061	-0,0061	0,0027	0,0008
63	64	4305,38	-11,24	1,0026	-0,0026	4328,55	-23,56	1,0055	-0,0055	4261,09	-25,66	1,0061	-0,0061	0,0029	0,0006
64	65	4294,14	-11,24	1,0026	-0,0026	4304,99	-24,27	1,0057	-0,0057	4235,43	-25,47	1,0061	-0,0061	0,0030	0,0004
65	66	4282,91	-11,24	1,0026	-0,0026	4280,72	-24,98	1,0059	-0,0059	4209,95	-25,21	1,0060	-0,0060	0,0032	0,0002
66	67	4271,67	-11,24	1,0026	-0,0026	4255,74	-25,69	1,0061	-0,0061	4184,74	-24,89	1,0060	-0,0060	0,0034	-0,0001
67	68	4260,43	-11,24	1,0026	-0,0026	4230,05	-26,39	1,0063	-0,0063	4159,85	-24,49	1,0059	-0,0059	0,0036	-0,0004
68	69	4249,19	-11,24	1,0027	-0,0027	4203,66	-27,10	1,0065	-0,0065	4135,36	-24,03	1,0058	-0,0058	0,0038	-0,0006
69	70	4237,96	-11,24	1,0027	-0,0027	4176,56	-27,81	1,0067	-0,0067	4111,33	-23,50	1,0057	-0,0057	0,0040	-0,0010
70	71	4226,72	-11,24	1,0027	-0,0027	4148,75	-28,52	1,0069	-0,0069	4087,83	-22,90	1,0056	-0,0056	0,0043	-0,0013
71	72	4215,48	-11,24	1,0027	-0,0027	4120,23	-29,22	1,0071	-0,0071	4064,92	-22,24	1,0055	-0,0055	0,0045	-0,0016

Anhang 35: Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 83 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32, Fortsetzung).

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz für ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	1-2	2-3
72	73	4204,24	-11,24	1,0027	-0,0027	4091,01	-29,93	1,0074	-0,0074	4042,68	-21,51	1,0053	-0,0053	0,0047	-0,0020
73	74	4193,01	-11,24	1,0027	-0,0027	4061,08	-30,64	1,0076	-0,0076	4021,18	-20,71	1,0052	-0,0052	0,0049	-0,0024
74	75	4181,77	-11,24	1,0027	-0,0027	4030,44	-31,35	1,0078	-0,0078	4000,47	-19,84	1,0050	-0,0050	0,0051	-0,0029
75	76	4170,53	-11,24	1,0027	-0,0027	3999,10	-32,05	1,0081	-0,0081	3980,63	-18,90	1,0048	-0,0048	0,0054	-0,0033
76	77	4159,30	-11,24	1,0027	-0,0027	3967,04	-32,76	1,0083	-0,0083	3961,73	-17,90	1,0045	-0,0045	0,0056	-0,0038
77	78	4148,06	-11,24	1,0027	-0,0027	3934,28	-33,47	1,0086	-0,0086	3943,83	-16,83	1,0043	-0,0043	0,0059	-0,0043
78	79	4136,82	-11,24	1,0027	-0,0027	3900,81	-34,18	1,0088	-0,0088	3927,00	-15,69	1,0040	-0,0040	0,0061	-0,0048
79	80	4125,58	-11,24	1,0027	-0,0027	3866,64	-34,88	1,0091	-0,0091	3911,30	-14,49	1,0037	-0,0037	0,0064	-0,0054
80	81	4114,35	-11,24	1,0027	-0,0027	3831,76	-35,59	1,0094	-0,0094	3896,82	-13,21	1,0034	-0,0034	0,0066	-0,0060
81	82	4103,11	-11,24	1,0027	-0,0027	3796,17	-36,30	1,0097	-0,0097	3883,60	-11,87	1,0031	-0,0031	0,0069	-0,0066
82	83	4091,87	-11,24	1,0028	-0,0028	3759,87	-37,01	1,0099	-0,0099	3871,73	-10,46	1,0027	-0,0027	0,0072	-0,0072
83	84	4080,63	-11,24	1,0028	-0,0028	3722,86	-37,71	1,0102	-0,0102	3861,27	-8,99	1,0023	-0,0023	0,0075	-0,0079
84	85	4069,40	-11,24	1,0028	-0,0028	3685,15	-38,42	1,0105	-0,0105	3852,28	-7,44	1,0019	-0,0019	0,0078	-0,0086
85	86	4058,16	-11,24	1,0028	-0,0028	3646,73	-39,13	1,0108	-0,0108	3844,84	-5,83	1,0015	-0,0015	0,0081	-0,0093
86	87	4046,92	-11,24	1,0028	-0,0028	3607,60	-39,84	1,0112	-0,0112	3839,01	-4,15	1,0011	-0,0011	0,0084	-0,0101
87	88	4035,68	-11,24	1,0028	-0,0028	3567,77	-40,54	1,0115	-0,0115	3834,85	-2,41	1,0006	-0,0006	0,0087	-0,0109
88	89	4024,45	-11,24	1,0028	-0,0028	3527,22	-41,25	1,0118	-0,0118	3832,45	-0,59	1,0002	-0,0002	0,0090	-0,0117
89	90	4013,21	-11,24	1,0028	-0,0028	3485,97	-41,96	1,0122	-0,0122	3831,86	1,29	0,9997	0,0003	0,0094	-0,0125
90	91	4001,97	-11,24	1,0028	-0,0028	3444,02	-42,67	1,0125	-0,0125	3833,15	3,24	0,9992	0,0008	0,0097	-0,0134
91	92	3990,74	-11,24	1,0028	-0,0028	3401,35	-43,37	1,0129	-0,0129	3836,39	5,26	0,9986	0,0014	0,0101	-0,0143
92	93	3979,50	-11,24	1,0028	-0,0028	3357,98	-44,08	1,0133	-0,0133	3841,64	7,34	0,9981	0,0019	0,0105	-0,0152
93	94	3968,26	-11,24	1,0028	-0,0028	3313,90	-44,79	1,0137	-0,0137	3848,99	9,49	0,9975	0,0025	0,0109	-0,0162
94	95	3957,02	-11,24	1,0028	-0,0028	3269,11	-45,49	1,0141	-0,0141	3858,48	11,71	0,9970	0,0030	0,0113	-0,0171
95	96	3945,79	-11,24	1,0029	-0,0029	3223,62	-46,20	1,0145	-0,0145	3870,20	14,00	0,9964	0,0036	0,0117	-0,0181

Anhang 35: Skelettmasse für Männer im Alter von 0 bis 83 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32, Fortsetzung)

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz für ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	1-2	2-3
96	97	3934,55	-11,24	1,0029	-0,0029	3177,41	-46,91	1,0150	-0,0150	3884,20	16,36	0,9958	0,0042	0,0121	-0,0192
97	98	3923,31	-11,24	1,0029	-0,0029	3130,50	-47,62	1,0154	-0,0154	3900,56	18,78	0,9952	0,0048	0,0126	-0,0202
98	99	3912,07	-11,24	1,0029	-0,0029	3082,89	-48,32	1,0159	-0,0159	3919,34	21,27	0,9946	0,0054	0,0130	-0,0213
99	100	3900,84	-11,24	1,0029	-0,0029	3034,56	-49,03	1,0164	-0,0164	3940,61	23,83	0,9940	0,0060	0,0135	-0,0224

a: für Alter, a = {0,1,2,.....,99}
Lj: Lebensjahr = Alter + 1, Zeitspanne von $Alter_a$ bis $Alter_{a+1}$
SM_b: Skelettmasse, berechnet
SM_{a+1} - SM_a: absolute Skelettmasse-Änderung in einem Lebensjahr
SM_a/SM_{a+1}: relativer Anteil vorhandener Skelettmasse zu Beginn eines Lebensjahres im Verhältnis zur Skelettmasse am Ende des Lebenjahres
ΔSM: relative Skelettmasse-Änderung, die in einem Lebensjahr erreicht wird (= 1 - SM_a/SM_{a+1})
Differenz für ΔSM: 1-2=Polynom 1 $_{\Delta SM}$ - Polynom 2 $_{\Delta SM}$
2-3=Polynom 2 $_{\Delta SM}$ - Polynom 3 $_{\Delta SM}$

Bis zu einem Alter von 20 Jahren:
Polynom 2. Grades: SM_b = 92,37562 + 91,50506 x Alter + 6,43944 x Alter²

Ab einem Alter von 21 Jahren:
Polynom 1. Grades: SM_b = 5013,33334 – 11,23734 x Alter
Polynom 2. Grades: SM_b = 4386,82018 + 21,36010 x Alter – 0,35373 x Alter²
Polynom 3. Grades: SM_b = 3310,33348 + 100,65104 x Alter – 2,06817 x Alter² + 0,01127 x Alter³

Dunkelgrau hinterlegte Datensätze ab dem 84. Lebensjahr werden extrapoliert

Anhang 36: Skelettmasse für Frauen im Alter von 0 bis 84 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32).

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz für ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	1-2	2-3
0	1					87,79	119,27	0,4240	0,5760						
1	2					207,06	124,34	0,6248	0,3752						
2	3					331,40	129,41	0,7192	0,2808						
3	4					460,81	134,47	0,7741	0,2259						
4	5					595,28	139,54	0,8101	0,1899						
5	6					734,83	144,61	0,8356	0,1644						
6	7					879,44	149,68	0,8546	0,1454						
7	8					1029,12	154,75	0,8693	0,1307						
8	9					1183,86	159,82	0,8811	0,1189						
9	10					1343,68	164,88	0,8907	0,1093						
10	11					1508,56	169,95	0,8987	0,1013						
11	12					1678,51	175,02	0,9056	0,0944						
12	13					1853,53	180,09	0,9114	0,0886						
13	14					2033,62	185,16	0,9166	0,0834						
14	15					2218,78	190,22	0,9210	0,0790						
15	16					2409,00	195,29	0,9250	0,0750						
16	17					2604,29	200,36	0,9286	0,0714						
17	18					2804,65	205,43	0,9318	0,0682						
18	19					3010,08	210,50	0,9346	0,0654						
19	20					3220,58	215,56	0,9373	0,0627						
20	21		246,35	0,9331	0,0669	3436,14	184,84	0,9490	0,0510		157,98	0,9560	0,0440	0,0159	0,0071
21	22	3682,49	-18,50	1,0050	-0,0050	3620,98	-9,85	1,0027	-0,0027	3594,12	-0,57	1,0002	-0,0002	-0,0023	-0,0026
22	23	3663,99	-18,50	1,0051	-0,0051	3611,13	-10,18	1,0028	-0,0028	3593,55	-1,73	1,0005	-0,0005	-0,0022	-0,0023

Anhang 36: Skelettmasse für Frauen im Alter von 0 bis 84 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32, Fortsetzung).

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz für ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	1-2	2-3
23	24	3645,49	-18,50	1,0051	-0,0051	3600,94	-10,51	1,0029	-0,0029	3591,83	-2,85	1,0008	-0,0008	-0,0022	-0,0021
24	25	3626,98	-18,50	1,0051	-0,0051	3590,43	-10,84	1,0030	-0,0030	3588,97	-3,96	1,0011	-0,0011	-0,0021	-0,0019
25	26	3608,48	-18,50	1,0052	-0,0052	3579,58	-11,17	1,0031	-0,0031	3585,02	-5,03	1,0014	-0,0014	-0,0020	-0,0017
26	27	3589,98	-18,50	1,0052	-0,0052	3568,41	-11,50	1,0032	-0,0032	3579,99	-6,07	1,0017	-0,0017	-0,0019	-0,0015
27	28	3571,48	-18,50	1,0052	-0,0052	3556,91	-11,83	1,0033	-0,0033	3573,92	-7,09	1,0020	-0,0020	-0,0019	-0,0014
28	29	3552,97	-18,50	1,0052	-0,0052	3545,07	-12,16	1,0034	-0,0034	3566,82	-8,08	1,0023	-0,0023	-0,0018	-0,0012
29	30	3534,47	-18,50	1,0053	-0,0053	3532,91	-12,49	1,0035	-0,0035	3558,75	-9,04	1,0025	-0,0025	-0,0017	-0,0010
30	31	3515,97	-18,50	1,0053	-0,0053	3520,41	-12,82	1,0037	-0,0037	3549,70	-9,97	1,0028	-0,0028	-0,0016	-0,0008
31	32	3497,47	-18,50	1,0053	-0,0053	3507,59	-13,15	1,0038	-0,0038	3539,73	-10,88	1,0031	-0,0031	-0,0016	-0,0007
32	33	3478,96	-18,50	1,0053	-0,0053	3494,44	-13,48	1,0039	-0,0039	3528,85	-11,75	1,0033	-0,0033	-0,0015	-0,0005
33	34	3460,46	-18,50	1,0054	-0,0054	3480,95	-13,81	1,0040	-0,0040	3517,10	-12,60	1,0036	-0,0036	-0,0014	-0,0004
34	35	3441,96	-18,50	1,0054	-0,0054	3467,14	-14,14	1,0041	-0,0041	3504,50	-13,42	1,0038	-0,0038	-0,0013	-0,0003
35	36	3423,46	-18,50	1,0054	-0,0054	3452,99	-14,47	1,0042	-0,0042	3491,07	-14,22	1,0041	-0,0041	-0,0012	-0,0001
36	37	3404,96	-18,50	1,0055	-0,0055	3438,52	-14,80	1,0043	-0,0043	3476,86	-14,98	1,0043	-0,0043	-0,0011	0,0000
37	38	3386,45	-18,50	1,0055	-0,0055	3423,72	-15,13	1,0044	-0,0044	3461,88	-15,72	1,0046	-0,0046	-0,0011	0,0001
38	39	3367,95	-18,50	1,0055	-0,0055	3408,58	-15,46	1,0046	-0,0046	3446,16	-16,42	1,0048	-0,0048	-0,0010	0,0002
39	40	3349,45	-18,50	1,0056	-0,0056	3393,12	-15,79	1,0047	-0,0047	3429,74	-17,10	1,0050	-0,0050	-0,0009	0,0003
40	41	3330,95	-18,50	1,0056	-0,0056	3377,32	-16,12	1,0048	-0,0048	3412,64	-17,76	1,0052	-0,0052	-0,0008	0,0004
41	42	3312,44	-18,50	1,0056	-0,0056	3361,20	-16,45	1,0049	-0,0049	3394,88	-18,38	1,0054	-0,0054	-0,0007	0,0005
42	43	3293,94	-18,50	1,0056	-0,0056	3344,74	-16,78	1,0050	-0,0050	3376,50	-18,98	1,0057	-0,0057	-0,0006	0,0006
43	44	3275,44	-18,50	1,0057	-0,0057	3327,96	-17,11	1,0052	-0,0052	3357,53	-19,54	1,0059	-0,0059	-0,0005	0,0007
44	45	3256,94	-18,50	1,0057	-0,0057	3310,84	-17,44	1,0053	-0,0053	3337,98	-20,08	1,0061	-0,0061	-0,0004	0,0008
45	46	3238,43	-18,50	1,0057	-0,0057	3293,40	-17,77	1,0054	-0,0054	3317,90	-20,59	1,0062	-0,0062	-0,0003	0,0008

Anhang 36: Skelettmasse für Frauen im Alter von 0 bis 84 (99) Jahre (Daten Anhang 22 und 32, Fortsetzung).

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz für ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	1-2	2-3
46	47	3219,93	-18,50	1,0058	-0,0058	3275,62	-18,10	1,0056	-0,0056	3297,31	-21,08	1,0064	-0,0064	-0,0002	0,0009
47	48	3201,43	-18,50	1,0058	-0,0058	3257,52	-18,43	1,0057	-0,0057	3276,23	-21,53	1,0066	-0,0066	-0,0001	0,0009
48	49	3182,93	-18,50	1,0058	-0,0058	3239,09	-18,76	1,0058	-0,0058	3254,70	-21,96	1,0068	-0,0068	0,0000	0,0010
49	50	3164,43	-18,50	1,0059	-0,0059	3220,32	-19,09	1,0060	-0,0060	3232,74	-22,36	1,0070	-0,0070	0,0001	0,0010
50	51	3145,92	-18,50	1,0059	-0,0059	3201,23	-19,42	1,0061	-0,0061	3210,38	-22,73	1,0071	-0,0071	0,0002	0,0010
51	52	3127,42	-18,50	1,0060	-0,0060	3181,80	-19,75	1,0062	-0,0062	3187,65	-23,07	1,0073	-0,0073	0,0003	0,0010
52	53	3108,92	-18,50	1,0060	-0,0060	3162,05	-20,08	1,0064	-0,0064	3164,58	-23,39	1,0074	-0,0074	0,0004	0,0011
53	54	3090,42	-18,50	1,0060	-0,0060	3141,96	-20,42	1,0065	-0,0065	3141,19	-23,67	1,0076	-0,0076	0,0005	0,0011
54	55	3071,91	-18,50	1,0061	-0,0061	3121,55	-20,75	1,0067	-0,0067	3117,51	-23,93	1,0077	-0,0077	0,0006	0,0010
55	56	3053,41	-18,50	1,0061	-0,0061	3100,80	-21,08	1,0068	-0,0068	3093,58	-24,16	1,0079	-0,0079	0,0007	0,0010
56	57	3034,91	-18,50	1,0061	-0,0061	3079,73	-21,41	1,0070	-0,0070	3069,41	-24,37	1,0080	-0,0080	0,0009	0,0010
57	58	3016,41	-18,50	1,0062	-0,0062	3058,32	-21,74	1,0072	-0,0072	3045,05	-24,54	1,0081	-0,0081	0,0010	0,0010
58	59	2997,90	-18,50	1,0062	-0,0062	3036,59	-22,07	1,0073	-0,0073	3020,51	-24,69	1,0082	-0,0082	0,0011	0,0009
59	60	2979,40	-18,50	1,0062	-0,0062	3014,52	-22,40	1,0075	-0,0075	2995,82	-24,81	1,0083	-0,0083	0,0012	0,0009
60	61	2960,90	-18,50	1,0063	-0,0063	2992,12	-22,73	1,0077	-0,0077	2971,01	-24,90	1,0085	-0,0085	0,0014	0,0008
61	62	2942,40	-18,50	1,0063	-0,0063	2969,40	-23,06	1,0078	-0,0078	2946,11	-24,96	1,0085	-0,0085	0,0015	0,0007
62	63	2923,89	-18,50	1,0064	-0,0064	2946,34	-23,39	1,0080	-0,0080	2921,16	-24,99	1,0086	-0,0086	0,0016	0,0006
63	64	2905,39	-18,50	1,0064	-0,0064	2922,96	-23,72	1,0082	-0,0082	2896,16	-25,00	1,0087	-0,0087	0,0018	0,0005
64	65	2886,89	-18,50	1,0065	-0,0065	2899,24	-24,05	1,0084	-0,0084	2871,16	-24,98	1,0088	-0,0088	0,0019	0,0004
65	66	2868,39	-18,50	1,0065	-0,0065	2875,20	-24,38	1,0086	-0,0086	2846,19	-24,93	1,0088	-0,0088	0,0021	0,0003
66	67	2849,89	-18,50	1,0065	-0,0065	2850,82	-24,71	1,0087	-0,0087	2821,26	-24,85	1,0089	-0,0089	0,0022	0,0001
67	68	2831,38	-18,50	1,0066	-0,0066	2826,12	-25,04	1,0089	-0,0089	2796,41	-24,74	1,0089	-0,0089	0,0024	0,0000
68	69	2812,88	-18,50	1,0066	-0,0066	2801,08	-25,37	1,0091	-0,0091	2771,67	-24,61	1,0090	-0,0090	0,0025	-0,0002

Anhang 36: Die Skelettmasse in Abhängigkeit vom Alter für Frauen im Alter von 0 bis 84 (99) Jahre (Fortsetzung).

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz für ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	1-2	2-3
69	70	2794,38	-18,50	1,0067	-0,0067	2775,72	-25,70	1,0093	-0,0093	2747,06	-24,45	1,0090	-0,0090	0,0027	-0,0004
70	71	2775,88	-18,50	1,0067	-0,0067	2750,02	-26,03	1,0096	-0,0096	2722,61	-24,26	1,0090	-0,0090	0,0028	-0,0006
71	72	2757,37	-18,50	1,0068	-0,0068	2723,99	-26,36	1,0098	-0,0098	2698,36	-24,04	1,0090	-0,0090	0,0030	-0,0008
72	73	2738,87	-18,50	1,0068	-0,0068	2697,64	-26,69	1,0100	-0,0100	2674,32	-23,79	1,0090	-0,0090	0,0032	-0,0010
73	74	2720,37	-18,50	1,0068	-0,0068	2670,95	-27,02	1,0102	-0,0102	2650,53	-23,52	1,0090	-0,0090	0,0034	-0,0013
74	75	2701,87	-18,50	1,0069	-0,0069	2643,94	-27,35	1,0105	-0,0105	2627,02	-23,21	1,0089	-0,0089	0,0036	-0,0015
75	76	2683,36	-18,50	1,0069	-0,0069	2616,59	-27,68	1,0107	-0,0107	2603,80	-22,88	1,0089	-0,0089	0,0037	-0,0018
76	77	2664,86	-18,50	1,0070	-0,0070	2588,92	-28,01	1,0109	-0,0109	2580,92	-22,52	1,0088	-0,0088	0,0039	-0,0021
77	78	2646,36	-18,50	1,0070	-0,0070	2560,91	-28,34	1,0112	-0,0112	2558,40	-22,14	1,0087	-0,0087	0,0041	-0,0025
78	79	2627,86	-18,50	1,0071	-0,0071	2532,57	-28,67	1,0114	-0,0114	2536,26	-21,72	1,0086	-0,0086	0,0044	-0,0028
79	80	2609,36	-18,50	1,0071	-0,0071	2503,91	-29,00	1,0117	-0,0117	2514,54	-21,28	1,0085	-0,0085	0,0046	-0,0032
80	81	2590,85	-18,50	1,0072	-0,0072	2474,91	-29,33	1,0120	-0,0120	2493,26	-20,81	1,0084	-0,0084	0,0048	-0,0036
81	82	2572,35	-18,50	1,0072	-0,0072	2445,59	-29,66	1,0123	-0,0123	2472,46	-20,31	1,0083	-0,0083	0,0050	-0,0040
82	83	2553,85	-18,50	1,0073	-0,0073	2415,93	-29,99	1,0126	-0,0126	2452,15	-19,78	1,0081	-0,0081	0,0053	-0,0044
83	84	2535,35	-18,50	1,0074	-0,0074	2385,94	-30,32	1,0129	-0,0129	2432,37	-19,22	1,0080	-0,0080	0,0055	-0,0049
84	85	2516,84	-18,50	1,0074	-0,0074	2355,63	-30,65	1,0132	-0,0132	2413,15	-18,64	1,0078	-0,0078	0,0058	-0,0054
85	86	2498,34	-18,50	1,0075	-0,0075	2324,98	-30,98	1,0135	-0,0135	2394,51	-18,03	1,0076	-0,0076	0,0060	-0,0059
86	87	2479,84	-18,50	1,0075	-0,0075	2294,00	-31,31	1,0138	-0,0138	2376,48	-17,39	1,0074	-0,0074	0,0063	-0,0065
87	88	2461,34	-18,50	1,0076	-0,0076	2262,70	-31,64	1,0142	-0,0142	2359,09	-16,72	1,0071	-0,0071	0,0066	-0,0070
88	89	2442,83	-18,50	1,0076	-0,0076	2231,06	-31,97	1,0145	-0,0145	2342,37	-16,02	1,0069	-0,0069	0,0069	-0,0076
89	90	2424,33	-18,50	1,0077	-0,0077	2199,10	-32,30	1,0149	-0,0149	2326,35	-15,30	1,0066	-0,0066	0,0072	-0,0083
90	91	2405,83	-18,50	1,0078	-0,0078	2166,80	-32,63	1,0153	-0,0153	2311,05	-14,55	1,0063	-0,0063	0,0075	-0,0090
91	92	2387,33	-18,50	1,0078	-0,0078	2134,17	-32,96	1,0157	-0,0157	2296,50	-13,77	1,0060	-0,0060	0,0079	-0,0097

Anhang 36: Die Skelettmasse in Abhängigkeit vom Alter für Frauen im Alter von 0 bis 84 (99) Jahre (Fortsetzung).

Alter [a]	Lj [a]	Polynom 1. Grades				Polynom 2. Grades				Polynom 3. Grades				Differenz ΔSM	
		SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM	SM_b [g]	SM_{a+1}-SM_a [g]	SM_a/SM_{a+1}	ΔSM_1	1-2	2-3
92	93	2368,83	-18,50	1,0079	-0,0079	2101,22	-33,29	1,0161	-0,0161	2282,73	-12,96	1,0057	-0,0057	0,0082	-0,0104
93	94	2350,32	-18,50	1,0079	-0,0079	2067,93	-33,62	1,0165	-0,0165	2269,77	-12,12	1,0054	-0,0054	0,0086	-0,0112
94	95	2331,82	-18,50	1,0080	-0,0080	2034,31	-33,95	1,0170	-0,0170	2257,65	-11,26	1,0050	-0,0050	0,0090	-0,0120
95	96	2313,32	-18,50	1,0081	-0,0081	2000,37	-34,28	1,0174	-0,0174	2246,39	-10,37	1,0046	-0,0046	0,0094	-0,0128
96	97	2294,82	-18,50	1,0081	-0,0081	1966,09	-34,61	1,0179	-0,0179	2236,02	-9,45	1,0042	-0,0042	0,0098	-0,0137
97	98	2276,31	-18,50	1,0082	-0,0082	1931,48	-34,94	1,0184	-0,0184	2226,57	-8,50	1,0038	-0,0038	0,0102	-0,0146
98	99	2257,81	-18,50	1,0083	-0,0083	1896,55	-35,27	1,0189	-0,0189	2218,08	-7,52	1,0034	-0,0034	0,0107	-0,0155
99	100	2239,31	-18,50	1,0083	-0,0083	1861,28	-35,60	1,0195	-0,0195	2210,56	-6,52	1,0030	-0,0030	0,0112	-0,0165

a: für Alter, a = {0,1,2,.....,99}
Lj: Lebensjahr = Alter + 1, Zeitspanne von $Alter_a$ bis $Alter_{a+1}$
SM_b: Skelettmasse, berechnet
$SM_{a+1} - SM_a$: absolute Skelettmasse-Änderung in einem Lebensjahr
SM_a/SM_{a+1}: relativer Anteil vorhandener Skelettmasse zu Beginn eines Lebensjahres im Verhältnis zur Skelettmasse am Ende des Lebenjahres
ΔSM: relative Skelettmasse-Änderung, die in einem Lebensjahr erreicht wird (= 1 - SM_a/SM_{a+1})
Differenz für ΔSM: 1-2=Polynom 1 $_{\Delta SM}$ - Polynom 2 $_{\Delta SM}$
2-3=Polynom 2 $_{\Delta SM}$ - Polynom 3 $_{\Delta SM}$

Bis zu einem Alter von 20 Jahren:
Polynom 2. Grades: SM_b = 87,79401 + 116,73614 x Alter + 2,53409 x Alter²

Ab einem Alter von 21 Jahren:
Polynom 1. Grades: SM_b = 4071,03945 – 18,50233 x Alter
Polynom 2. Grades: SM_b = 3751,66896 – 2,75787 x Alter – 0,16502 x Alter²
Polynom 3. Grades: SM_b = 3288,96897 + 31,10570 x Alter – 0,88755 x Alter² + 0,00468 x Alter³

Dunkelgrau hinterlegte Datensätze ab dem 85. Lebensjahr werden extrapoliert

Anahng 37: Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten für 74 Proben (66 Individuen) für beide Geschlechter und 13 Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1 und 7 %.

a) Männer (53 Proben von 48 Individuen).

Parameter		n im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
$^{14}C_{gemessen}$			122,86	12,52	105,50	112,85	119,10	132,95	151,00
s von $^{14}C_{gemessen}$			0,97	0,39	0,40	0,80	0,90	1,15	2,70
1,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	16	118,72	15,02	99,46	105,79	109,87	133,28	144,60
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	16	4,13	7,65	-9,82	-1,68	4,16	8,45	30,08
1,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	24	120,30	13,43	99,92	109,07	113,62	133,81	144,29
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	24	2,56	6,68	-8,97	-2,35	1,49	6,17	26,29
2,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	26	121,68	12,06	100,37	112,16	116,77	134,38	143,99
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	26	1,17	6,22	-8,16	-3,41	-0,72	4,68	22,83
2,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	20	122,90	10,88	100,81	115,05	119,53	133,91	144,54
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	20	-0,05	6,22	-10,09	-4,89	-1,10	4,55	19,66
3,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	18	123,98	9,88	101,25	117,77	121,73	133,39	145,16
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	18	-1,12	6,55	-12,00	-6,23	-2,73	4,16	16,78
3,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	19	124,92	9,05	101,68	120,25	123,45	132,43	145,72
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	19	-2,06	7,10	-13,47	-7,92	-3,23	2,45	14,80
4,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	19	125,75	8,37	102,10	121,29	125,05	131,47	146,20
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	19	-2,90	7,76	-14,59	-9,43	-4,08	1,42	15,93
4,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	19	126,49	7,84	102,51	121,68	126,20	130,58	146,64
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	19	-3,63	8,47	-16,33	-10,77	-4,80	1,46	17,00
5,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	17	127,13	7,45	102,92	121,87	126,94	130,57	147,01
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	17	-4,28	9,21	-18,16	-11,80	-4,33	1,37	18,03
5,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	16	127,70	7,20	103,32	123,22	127,69	131,03	147,34
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	16	-4,85	9,94	-19,79	-13,16	-5,08	1,39	19,01
6,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	17	128,21	7,08	103,71	124,31	127,20	131,34	147,62
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	17	-5,36	10,65	-21,24	-14,44	-6,84	1,80	19,95
6,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	16	128,66	7,07	104,10	124,68	127,38	131,43	147,86
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	16	-5,80	11,35	-22,51	-15,09	-7,86	2,15	20,83
7,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	15	129,06	7,16	104,48	125,46	128,38	131,73	148,06
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	15	-6,20	12,03	-23,64	-15,58	-9,32	2,06	21,67

Anhang 37: Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten für 74 Proben (66 Individuen) für beide Geschlechter und 13 Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1 und 7 % (Fortsetzung).

b) Frauen (21 Proben von 18 Individuen).

Parameter		n im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
$^{14}C_{gemessen}$			118,58	8,74	99,20	114,15	118,40	125,60	132,80
s von $^{14}C_{gemessen}$			0,87	0,32	0,40	0,60	0,80	1,05	1,60
1,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	7	109,86	10,38	99,35	103,74	104,38	114,87	134.34
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	7	8,73	9,17	-8,84	0,25	10,44	14,38	24.27
1,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	6	111,95	9,77	99,30	105,92	106,73	117,96	133.33
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	6	6,63	8,42	-7,83	-0,41	8,17	12,14	20.37
2,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	5	113,89	9,24	99,26	108,01	109,02	120,44	132.40
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	5	4,69	7,81	-6,92	-1,79	5,88	9,96	16.94
2,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	5	115,69	8,77	99,22	110,07	111,26	122,55	132.60
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	5	2,89	7,31	-9,16	-3,48	3,64	7,84	14.44
3,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	7	117,36	8,35	99,18	112,10	113,43	124,41	133.84
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	7	1,22	6,93	-11,33	-4,87	1,47	5,78	12.27
3,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	9	118,92	8,00	99,14	114,09	115,54	125,81	135.04
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	9	-0,34	6,67	-13,44	-5,08	0,06	3,79	10.16
4,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	10	120,38	7,71	99,10	116,01	117,57	126,73	136.20
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	10	-1,80	6,54	-15,47	-5,13	-1,00	1,85	8.13
4,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	9	121,74	7,48	99,07	117,88	119,54	127,54	137.32
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	9	-3,16	6,52	-17,44	-5,97	-2,87	0,38	6.16
5,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	7	123,02	7,34	99,04	119,69	121,44	128,32	138.41
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	7	-4,44	6,62	-19,34	-6,91	-4,21	-0,29	4.26
5,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	7	124,21	7,28	99,01	121,45	123,28	127,94	139.46
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	7	-5,63	6,82	-21,18	-8,75	-4,28	-0,22	2.67
6,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	8	125,34	7,30	98,98	123,14	125,04	127,73	140.48
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	8	-6,76	7,11	-22,94	-10,52	-5,95	-0,73	1.63
6,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	8	126,40	7,40	98,95	124,79	126,74	128,16	141.46
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	8	-7,82	7,48	-24,64	-12,00	-6,27	-1,06	0.76
7,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	7	127,40	7,58	98,92	126,26	128,36	128,69	142.42
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	7	-8,82	7,91	-26,28	-13,30	-7,86	-2,59	0.28

Anhang 37: Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten ^{14}C-Werten für 74 Proben (66 Individuen) für beide Geschlechter und 13 Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1 und 7 % (Fortsetzung).

a) Männer und Frauen gemeinsam (74 Proben von 66 Individuen).

Parameter		n im Intervall von $^{14}C_{gemessen} \pm 4$ s	MW	s	Min	Q1	Median	Q3	Max
$^{14}C_{gemessen}$			121,64	11,68	99,20	113,38	119,00	127,13	151,00
s von $^{14}C_{gemessen}$			0,94	0,38	0,40	0,70	0,90	1,10	2,70
1,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	23	116,21	14,37	99,35	103,87	108,87	129,15	144,60
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	23	5,43	8,31	-9,82	-1,25	4,47	10,57	30,08
1,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	30	117,93	13,00	99,30	106,47	112,84	129,95	144,29
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	30	3,71	7,39	-8,97	-1,49	1,91	8,51	26,29
2,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	31	119,47	11,81	99,26	108,94	116,10	129,60	143,99
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	31	2,17	6,84	-8,16	-3,23	-0,05	6,87	22,83
2,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	25	120,86	10,78	99,22	111,20	118,89	128,81	144,54
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	25	0,79	6,63	-10,09	-4,60	-0,82	5,58	19,66
3,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	25	122,10	9,89	99,18	113,38	121,32	128,27	145,16
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	25	-0,46	6,70	-12,00	-5,87	-1,44	4,38	16,78
3,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	28	123,22	9,12	99,14	115,50	123,15	128,29	145,72
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	28	-1,58	6,98	-13,47	-7,51	-2,04	2,73	14,80
4,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	29	124,23	8,49	99,10	117,55	123,99	128,25	146,20
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	29	-2,58	7,41	-15,47	-8,89	-2,68	1,33	15,93
4,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	28	125,14	7,98	99,07	119,52	125,19	128,55	146,64
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	28	-3,50	7,93	-17,44	-9,90	-3,31	0,70	17,00
5,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	24	125,96	7,60	99,04	121,38	125,83	129,19	147,01
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	24	-4,32	8,51	-19,34	-11,29	-4,26	0,90	18,03
5,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	23	126,71	7,35	99,01	123,22	125,92	130,30	147,34
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	23	-5,07	9,12	-21,18	-12,29	-4,86	1,10	19,01
6,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	25	127,40	7,21	98,98	123,67	126,29	130,46	147,62
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	25	-5,75	9,75	-22,94	-13,30	-6,11	0,77	19,95
6,5 %	$^{14}C_{berechnet}$	24	128,02	7,19	98,95	124,68	126,74	130,37	147,86
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	24	-6,38	10,39	-24,64	-14,16	-7,71	0,76	20,83
7,0 %	$^{14}C_{berechnet}$	22	128,59	7,27	98,92	126,11	128,36	130,58	148,06
	$^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$	22	-6,94	11,03	-26,28	-15,22	-9,22	0,79	21,67

Anhang 38 : **ID 3**: Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 97,8 ± 0,60 pMC; gestorben im 39. Lj. ± 8 Jahre, 1993 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
1915	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1,0	-1,2	-1,5	-1,8
1916	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-1,0	-1,2	-1,4	-1,8	
1917	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-1,0	-1,2	-1,4	-1,8		
1918	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,9	-1,2	-1,4	-1,8			
1919	-0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0	-0,1	-0,4	-0,5	-0,7	-0,9	-1,1	-1,4	-1,7				
1920	-0,1	-0,0	-0,0	0,0	-0,1	-0,4	-0,5	-0,6	-0,9	-1,1	-1,3	-1,7					
1921	-0,0	0,0	-0,0	-0,1	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-1,1	-1,3	-1,7	-2,4					
1922	-0,0	0,0	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,8	-1,0	-1,3	-1,6	-2,3						
1923	0,0	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	-0,8	-1,0	-1,2	-1,6	-2,3							
1924	-0,1	-0,3	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9	-1,2	-1,6	-2,3								
1925	-0,2	-0,3	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2									
1926	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2										
1927	-0,4	-0,6	-0,8	-1,1	-1,5	-2,2											
1928	-0,6	-0,8	-1,1	-1,4	-2,1												
1929	-0,8	-1,0	-1,4	-2,1													
1930	-1,0	-1,4	-2,1														
1931	-1,3	-2,0															
1932	-2,0																

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
1915	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	1,1	1,3	1,7	2,1	2,4	3,1
1916	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,7	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	3,0	
1917	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3	0,7	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	3,0		
1918	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3	0,7	0,9	1,2	1,6	1,9	2,3	2,9			
1919	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,7	0,9	1,1	1,5	1,9	2,3	2,9				
1920	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,8	1,0	1,4	1,8	2,2	2,8					
1921	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,8	1,0	1,4	1,8	2,2	2,8	4,0					
1922	0,0	0,0	0,2	0,6	0,7	0,9	1,3	1,7	2,1	2,7	3,9						
1923	0,0	0,1	0,5	0,6	0,8	1,3	1,6	2,0	2,6	3,8							
1924	0,1	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	2,0	2,6	3,8								
1925	0,4	0,5	0,7	1,1	1,5	1,9	2,5	3,7									
1926	0,4	0,7	1,1	1,4	1,8	2,5	3,7										
1927	0,6	1,0	1,4	1,8	2,4	3,6											
1928	1,0	1,4	1,8	2,4	3,6												
1929	1,3	1,7	2,3	3,5													
1930	1,6	2,3	3,5														
1931	2,2	3,4															
1932	3,3																

Anhang 38: **ID 3:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 97,8 ± 0,60 pMC; gestorben im 39. Lj. ± 8 Jahre, 1993 aufgefunden.)

c) Austauschraten zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert vorliegt.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
1915	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1916	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	4,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
1917	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	4,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
1918	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	4,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
1919	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	4,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
1920	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	3,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1921	6,0	6,0	5,5	6,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1922	5,5	5,5	6,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1923	5,0	6,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0							
1924	6,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0								
1925	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0									
1926	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0										
1927	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0											
1928	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0												
1929	1,0	1,0	1,0	1,0													
1930	1,0	1,0	1,0														
1931	1,0	1,0															
1932	1,0																

Anhang 39 : **ID 4:** Simulierte Liegezeitbestimmung
(^{14}C: 97,5 ± 0,80 pMC; gestorben im 43. Lj. ± 8 Jahre, 1990 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
1915	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9	-1,1	-1,3	-1,5	-1,8	-2,1	-2,8		
1916	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9	-1,0	-1,3	-1,5	-1,7	-2,1	-2,8			
1917	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9	-1,0	-1,3	-1,5	-1,7	-2,1	-2,8				
1918	-0,4	-0,3	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9	-1,0	-1,2	-1,5	-1,7	-2,1	-2,8					
1919	-0,3	-0,3	-0,4	-0,7	-0,8	-1,0	-1,2	-1,4	-1,7	-2,0	-2,8						
1920	-0,3	-0,4	-0,7	-0,8	-0,9	-1,2	-1,4	-1,6	-2,0	-2,7							
1921	-0,4	-0,7	-0,8	-0,9	-1,1	-1,4	-1,6	-2,0	-2,7								
1922	-0,6	-0,7	-0,9	-1,1	-1,3	-1,6	-1,9	-2,6									
1923	-0,7	-0,8	-1,1	-1,3	-1,5	-1,9	-2,6										
1924	-0,8	-1,0	-1,2	-1,5	-1,9	-2,6											
1925	-1,0	-1,2	-1,4	-1,8	-2,5												
1926	-1,2	-1,4	-1,8	-2,5													
1927	-1,4	-1,8	-2,5														
1928	-1,7	-2,4															
1929	-2,4																

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
1915	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	0,9	1,2	1,3	1,6	1,9	2,2	2,7	3,6		
1916	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	0,9	1,1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,6	3,5			
1917	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	0,9	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1	2,6	3,5				
1918	0,4	0,4	0,4	0,6	0,9	1,1	1,2	1,5	1,8	2,1	2,6	3,5					
1919	0,4	0,4	0,6	0,9	1,0	1,2	1,5	1,8	2,1	2,6	3,4						
1920	0,4	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,5	3,4							
1921	0,5	0,8	0,9	1,1	1,4	1,7	2,0	2,5	3,3								
1922	0,8	0,9	1,1	1,4	1,7	2,0	2,4	3,3									
1923	0,8	1,0	1,3	1,6	1,9	2,4	3,3										
1924	1,0	1,3	1,6	1,8	2,3	3,2											
1925	1,2	1,5	1,8	2,3	3,2												
1926	1,5	1,7	2,2	3,1													
1927	1,7	2,2	3,1														
1928	2,2	3,1															
1929	3,0																

c) Austauschraten zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorliegt

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
1915	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
1916	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	4,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
1917	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	4,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
1918	6,0	6,0	6,0	6,0	4,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1919	6,0	6,0	6,0	4,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1920	6,0	6,0	3,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0							
1921	6,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0								
1922	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0									
1923	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0										
1924	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0											
1925	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0												
1926	1,0	1,0	1,0	1,0													
1927	1,0	1,0	1,0														
1928	1,0	1,0															
1929	1,0																

Anhang 40: **ID 5:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 98,3 ±1,10 pMC; gestorben im 45. Lj. ± 8 Jahre, 1986 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
1918	0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,7	-0,9	-1,3	-2,0	-2,8	-3,6	-4,2				
1919	0,1	0,0	-0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,2	-2,0	-2,8	-3,5	-4,2					
1920	0,1	-0,0	-0,1	-0,4	-0,6	-0,8	-1,2	-1,9	-2,7	-3,5	-4,2						
1921	-0,0	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8	-1,2	-1,9	-2,7	-3,5	-4,1							
1922	-0,1	-0,3	-0,5	-0,8	-1,1	-1,8	-2,7	-3,4	-4,1								
1923	-0,3	-0,5	-0,7	-1,1	-1,8	-2,6	-3,4	-4,1									
1924	-0,4	-0,7	-1,1	-1,8	-2,6	-3,3	-4,0										
1925	-0,6	-1,0	-1,7	-2,6	-3,3	-4,0											
1926	-1,0	-1,7	-2,5	-3,3	-3,9												
1927	-1,7	-2,5	-3,3	-3,9													
1928	-2,5	-3,2	-3,9														
1929	-3,2	-3,9															
1930	-3,8																

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
1918	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1	1,8	2,6	3,2	3,8				
1919	0,1	0,0	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1	1,8	2,5	3,2	3,8					
1920	0,1	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,1	1,7	2,5	3,2	3,8						
1921	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,1	1,7	2,5	3,1	3,8							
1922	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	1,7	2,4	3,1	3,7								
1923	0,2	0,4	0,6	1,0	1,6	2,4	3,1	3,7									
1924	0,4	0,6	1,0	1,6	2,4	3,0	3,7										
1925	0,6	0,9	1,6	2,3	3,0	3,6											
1926	0,9	1,5	2,3	3,0	3,6												
1927	1,5	2,3	3,0	3,6													
1928	2,3	2,9	3,5														
1929	2,9	3,5															
1930	3,5																

c) Austauschraten zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorliegt.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
1918	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
1919	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1920	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1921	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0							
1922	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0								
1923	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0									
1924	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0										
1925	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0											
1926	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0												
1927	1,0	1,0	1,0	1,0													
1928	1,0	1,0	1,0														
1929	1,0	1,0															
1930	1,0																

Anhang 41: **ID 12:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 98,8 ± 0,70 pMC; gestorben nach dem 60. Lj., 1994 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																			
Jahr	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
1865	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0
1866	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0
1867	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0
1868	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0
1869	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0
1870	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0
1871	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0
1872	-0,1	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0
1873	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,1
1874	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,0
1875	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0
1876	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,0
1877	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,1	-0,0	-0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,1
1878	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,1	0,0
1879	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,1	0,0	0,0
1880	0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,4
1881	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7
1882	0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,1	-0,0	-0,0	0,0	0,1	0,1	-0,1	0,1	-0,0	-0,0	-0,4	-0,7	-1,0
1883	-0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,0	-0,0	0,0	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-1,0	-1,2
1884	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,0	-0,0	0,0	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,2	-1,5
1885	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,2	-1,5	-2,2
1886	-0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,2	-1,5	-2,2	
1887	0,0	0,0	-0,1	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,2	-1,5	-2,2		
1888	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2			
1889	-0,0	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2				
1890	-0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2					
1891	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2						
1892	0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	-0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2							
1893	-0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,1	-0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2								
1894	-0,0	0,0	-0,0	-0,1	-0,0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,1	-1,4	-2,2									
1895	0,0	-0,0	-0,1	-0,0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,1	-1,4	-2,1										
1896	0,0	-0,0	0,0	-0,3	-0,6	-0,8	-1,1	-1,4	-2,1											
1897	-0,0	0,0	-0,3	-0,6	-0,8	-1,0	-1,4	-2,1												
1898	0,0	-0,3	-0,6	-0,8	-1,0	-1,4	-2,1													
1899	-0,3	-0,5	-0,8	-1,0	-1,3	-2,1														
1900	-0,5	-0,7	-1,0	-1,3	-2,0															
1901	-0,7	-0,9	-1,3	-2,0																
1902	-0,9	-1,3	-2,0	-2,8																
1903	-1,2	-1,9	-2,8																	
1904	-1,9	-2,7																		
1905	-2,7																			

Anhang 41: **ID 12:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 98,8 ± 0,70 pMC; gestorben nach dem 60. Lj., 1994 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten (Fortsetzung).

Geburts-	Lebensjahr																			
Jahr	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
1865	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,0	-0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2
1866	0,0	0,0	0,1	-0,0	-0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2	
1867	0,0	-0,1	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2		
1868	-0,0	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2			
1869	-0,0	0,0	0,0	0,1	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2				
1870	0,0	0,0	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2					
1871	0,0	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2						
1872	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2							
1873	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2								
1874	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2									
1875	-0,0	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2										
1876	-0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2											
1877	0,0	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2												
1878	0,0	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2													
1879	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1	-1,5	-2,2														
1880	-0,7	-0,9	-1,2	-1,5	-2,2															
1881	-0,9	-1,2	-1,5	-2,2																
1882	-1,2	-1,5	-2,3																	
1883	-1,5	-2,2																		
1884	-2,2																			
1885																				
1886																				
1887																				
1888																				
1889																				
1890																				
1891																				
1892																				
1893																				
1894																				
1895																				
1896																				
1897																				
1898																				
1899																				
1900																				
1901																				
1902																				
1903																				
1904																				
1905																				

Anhang 41: **ID 12:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 98,8 ± 0,70 pMC; gestorben nach dem 60. Lj., 1994 aufgefunden.)

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																			
Jahr	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
1865	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1866	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1867	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1868	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
1869	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
1870	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
1871	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
1872	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
1873	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
1874	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
1875	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
1876	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
1877	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
1878	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
1879	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
1880	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
1881	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0
1882	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,1	1,4
1883	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,4	1,7
1884	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,4	1,7	2,2
1885	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,7	2,2	3,2
1886	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,7	2,2	3,2	
1887	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,2	3,2		
1888	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,2	3,2			
1889	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,2	3,2				
1890	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,2					
1891	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,1						
1892	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,1							
1893	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,2	1,6	2,1	3,1								
1894	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,2	1,5	2,1	3,1									
1895	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,2	1,5	2,1	3,1										
1896	0,0	0,1	0,0	0,4	0,9	1,2	1,5	2,0	3,0											
1897	0,0	0,0	0,4	0,9	1,2	1,5	2,0	3,0												
1898	0,0	0,4	0,8	1,1	1,4	2,0	3,0													
1899	0,4	0,8	1,1	1,4	1,9	2,9														
1900	0,7	1,0	1,4	1,9	2,9															
1901	1,0	1,3	1,8	2,9																
1902	1,3	1,8	2,8	4,0																
1903	1,7	2,7	3,9																	
1904	2,7	3,9																		
1905	3,9																			

Anhang 41: **ID 12:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 98,8 ± 0,70 pMC; gestorben nach dem 60. Lj., 1994 aufgefunden.)

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen (Fortsetzung).

Geburts-	Lebensjahr																			
Jahr	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
1865	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,1
1866	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,1	
1867	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,1		
1868	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,1			
1869	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,3	1,6	2,1	3,1				
1870	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,3	1,6	2,1	3,1					
1871	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,3	1,6	2,1	3,1						
1872	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,2	1,6	2,1	3,1							
1873	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,2	1,6	2,1	3,1								
1874	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,2	1,6	2,1	3,1									
1875	0,0	0,0	0,1	0,0	0,5	0,9	1,3	1,6	2,1	3,1										
1876	0,1	0,1	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,1											
1877	0,0	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,1												
1878	0,0	0,5	1,0	1,3	1,6	2,1	3,2													
1879	0,5	1,0	1,3	1,6	2,2	3,2														
1880	1,0	1,3	1,7	2,2	3,2															
1881	1,3	1,7	2,2	3,2																
1882	1,7	2,2	3,2																	
1883	2,2	3,2																		
1884	3,2																			
1885																				
1886																				
1887																				
1888																				
1889																				
1890																				
1891																				
1892																				
1893																				
1894																				
1895																				
1896																				
1897																				
1898																				
1899																				
1900																				
1901																				
1902																				
1903																				
1904																				
1905																				

Anhang 41: **ID 12:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 98,8 ± 0,70 pMC; gestorben nach dem 60. Lj., 1994 aufgefunden.)

c) Austauschraten zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorliegt.

Geburts-	Lebensjahr																			
Jahr	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
1865	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0
1866	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	2,5
1867	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5
1868	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
1869	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0
1870	6,0	6,0	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0
1871	6,0	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
1872	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0
1873	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5
1874	5,5	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5
1875	5,0	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5
1876	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5
1877	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5
1878	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0
1879	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0
1880	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5
1881	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0
1882	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0
1883	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0
1884	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0
1885	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1886	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
1887	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
1888	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
1889	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
1890	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1891	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1892	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	2,5	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0							
1893	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	2,5	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0								
1894	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0									
1895	1,5	1,5	1,5	2,5	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0										
1896	1,5	1,5	2,5	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0											
1897	1,5	2,5	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0												
1898	2,5	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0													
1899	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0														
1900	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0															
1901	1,0	1,0	1,0	1,0																
1902	1,0	1,0	1,0	1,0																
1903	1,0	1,0	1,0																	
1904	1,0	1,0																		
1905	1,0																			

Anhang 41: **ID 12:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 98,8 ± 0,70 pMC; gestorben nach dem 60. Lj., 1994 aufgefunden.)

c) Austauschraten zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorliegt (Fortsetzung).

Geburts-	Lebensjahr																			
Jahr	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
1865	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1866	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
1867	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
1868	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
1869	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
1870	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1871	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1872	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0							
1873	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0								
1874	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0									
1875	1,5	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0										
1876	1,5	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0											
1877	2,0	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0												
1878	3,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0													
1879	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0														
1880	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0															
1881	1,0	1,0	1,0	1,0																
1882	1,0	1,0	1,0																	
1883	1,0	1,0																		
1884	1,0																			
1885																				
1886																				
1887																				
1888																				
1889																				
1890																				
1891																				
1892																				
1893																				
1894																				
1895																				
1896																				
1897																				
1898																				
1899																				
1900																				
1901																				
1902																				
1903																				
1904																				
1905																				

Anhang 42: **ID 18:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 112,2 ± 0,88 pMC; gestorben im 1. oder 2. Lj., 1995 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-Jahr	weiblich		männlich	
	Lebensjahr		Lebensjahr	
	1	2	1	2
1958	0,7		0,7	
...				
1989		-3,3		-3,3
1990	-2,7	-2,3	-2,7	-2,3
1991	-1,6	-1,5	-1,6	-1,5
1992	-1,2	-0,9	-1,2	-0,9
1993	-0,4	-0,2	-0,4	-0,2
1994	0,2	0,5	0,2	0,5
1995	1,0	1,3	1,0	1,3
1996	1,8	2,2	1,8	2,1
1997	2,8	3,0	2,8	3,0
1998	3,4		3,4	

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-Jahr	weiblich		männlich	
	Lebensjahr		Lebensjahr	
	1	2	1	2
1958	0,8		0,8	
...				
1989		3,8		3,8
1990	3,1	2,6	3,1	2,6
1991	1,9	1,7	1,9	1,7
1992	1,4	1,0	1,4	1,0
1993	0,5	0,2	0,5	0,2
1994	0,2	0,5	0,2	0,5
1995	1,1	1,4	1,1	1,4
1996	2,0	2,4	2,0	2,4
1997	3,1	3,4	3,1	3,4
1998	3,8		3,8	

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem berechneten ^{14}C-Werten vorliegt.

Geburts-Jahr	weiblich		männlich	
	Lebensjahr		Lebensjahr	
	1	2	1	2
1958	1,0		1,0	
....				
1989		6,0		6,0
1990	1,0	6,0	1,0	6,0
1991	1,0	6,0	1,0	6,0
1992	1,0	6,0	1,0	6,0
1993	1,0	6,0	1,0	6,0
1994	1,0	1,0	1,0	1,0
1995	1,0	1,0	1,0	1,0
1996	1,0	1,0	1,0	1,0
1997	1,0	1,0	1,0	1,0
1998	1,0		1,0	

Anhang 43: **ID 99**: Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 126,7 ± 1,50 pMC; gestorben im 10. Lj. ± 2 Jahre, 1987 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-Jahr	Lebensjahr				
	8	9	10	11	12
1952					3,4
1953				2,4	0,1
1954			1,2	-0,9	-5,9
1955		0,1	-3,1		
1956	-0,1	-5,6			
1971					-5,7
1972				-5,0	-3,6
1973		-5,6	-4,3	-3,0	-1,7
1974	-5,0	-3,7	-2,4	-1,1	0,0
1975	-3,0	-1,7	-0,5	0,1	0,0
1976	-1,2	0,0	-0,0	0,7	1,5
1977	-0,0	0,6	1,5	2,2	
1978	1,2	2,1	2,8		
1979	3,1	3,8			

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-Jahr	Lebensjahr				
	8	9	10	11	12
1952					2,2
1953				1,6	0,1
1954			0,8	0,6	3,9
1955		0,0	2,1		
1956	0,1	3,7			
1971					3,8
1972				3,4	2,4
1973		3,7	2,9	2,0	1,1
1974	3,3	2,5	1,6	0,7	0,0
1975	2,0	1,2	0,3	0,0	0,0
1976	0,8	0,0	0,0	0,5	1,0
1977	0,0	0,4	1,0	1,5	
1978	0,8	1,4	1,9		
1979	2,1	2,5			

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorliegt.

Geburts-Jahr	Lebensjahr				
	8	9	10	11	12
1952					6,0
1953				6,0	1,5
1954			6,0	1,0	1,0
1955		5,5	1,0		
1956	3,5	1,0			
1971					6,0
1972				6,0	6,0
1973		6,0	6,0	6,0	6,0
1974	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
1975	6,0	6,0	6,0	4,0	1,0
1976	6,0	6,0	1,5	1,0	1,0
1977	2,5	1,0	1,0	1,0	
1978	1,0	1,0	1,0		
1979	1,0	1,0			

Anhang 44: **ID 97:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 118,6 ± 1,10 pMC; gestorben zwischen dem 14. und 26. Lj., im Jahr 1990.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr												
Jahr	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1939													3,1
1940												2,0	-0,3
1941											1,0	-0,0	0,5
1942									3,7	0,5	-0,3	0,4	0,6
1943								0,5	0,3	0,4	0,3	-0,8	0,1
1944							0,0	0,2	0,5	-0,0	-0,5	-0,9	-1,3
1945						0,2	-1,9						
1946					0,2	-2,7							
1947				0,2	-3,5								
1948			0,2	-4,4									
1949	4,1	0,0											
1950	-0,2												
...													
1968													
1969													
1970								-3,8					
1971						-4,2	-3,2						
1972					-3,9	-2,9							
1973				-3,5	-2,5								
1974		-4,2	-3,2	-2,2									
1975	-3,8	-2,8	-1,9										
1976	-2,5	-1,6											
1977	-1,2												

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr												
Jahr	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1939													2,8
1940												1,8	0,2
1941											0,9	0,0	0,4
1942									3,4	0,4	0,2	0,4	0,5
1943								0,5	0,3	0,4	0,3	0,7	0,1
1944							0,0	0,2	0,5	0,0	0,5	0,8	1,2
1945						0,1	1,7						
1946					0,2	2,4							
1947				0,2	3,2								
1948			0,2	4,0									
1949	3,7	0,0											
1950	0,2												
...													
1968													
1969													
1970								3,5					
1971						3,9	2,9						
1972					3,5	2,6							
1973				3,2	2,3								
1974		3,8	2,9	2,0									
1975	3,5	2,6	1,7										
1976	2,3	1,4											
1977	1,1												

Anhang 44: **ID 97:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 118,6 ± 1,10 pMC; gestorben zwischen dem 14. und 26. Lj., im Jahr 1990.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorliegt.

Geburts-	Lebensjahr												
Jahr	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1939													6,0
1940												6,0	5,5
1941											6,0	5,0	4,0
1942									6,0	5,5	4,5	3,5	3,0
1943								6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0
1944							4,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1945						4,0	1,0						
1946					3,5	1,0							
1947				3,0	1,0								
1948			2,5	1,0									
1949	6,0	2,0											
1950	1,5												
...													
1968													
1969													
1970								6,0					
1971						6,0	6,0						
1972					6,0	6,0							
1973				6,0	6,0								
1974		6,0	6,0	6,0									
1975	6,0	6,0	6,0										
1976	6,0	6,0											
1977	6,0												

Anhang 45: **ID 98:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 120,7 ± 0,80 pMC; gestorben zwischen dem 15. und 27. Lj., im Jahr 1991.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr												
Jahr	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1939													1,6
1940												0,5	0,5
1941										3,1	-0,5	-0,5	0,8
1942									1,6	0,6	-0,5	-0,7	-0,3
1943							2,6	-0,5	0,0	-0,5	-0,4	0,3	-0,5
1944						0,3	0,4	0,2	0,6	-0,1	-0,7	0,8	0,5
1945					-0,1	0,2	-2,5	-3,0					
1946				-0,0	-0,6								
1947			0,0	-1,4									
1948		-0,0	-2,3										
1949	-0,1												
...													
1968										-2,8			
1969							-3,1	-2,6	-2,0				
1970						-2,5	-1,7	-1,2					
1971					-2,1	-1,1	-0,3						
1972			-2,8	-1,8	-0,8	0,0							
1973		-2,4	-1,4	-0,4	-0,1								
1974	-2,1	-1,1	-0,1	0,0									
1975	-0,7	0,1	0,0										
1976	0,1	0,0											
1977	0,1												

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr												
Jahr	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1939													2,0
1940												0,7	0,7
1941										3,8	0,6	0,6	0,9
1942									2,0	0,7	0,6	0,9	0,4
1943							3,3	0,6	0,0	0,7	0,5	0,4	0,7
1944						0,4	0,5	0,2	0,7	0,1	0,8	1,0	0,6
1945					0,1	0,3	3,1	3,7					
1946				0,0	0,7								
1947			0,0	1,7									
1948		0,0	2,9										
1949	0,2												
...													
1968										3,5			
1969							3,9	3,2	2,5				
1970						3,1	2,1	1,5					
1971					2,7	1,4	0,4						
1972			3,6	2,2	1,0	0,0							
1973		3,1	1,8	0,5	0,1								
1974	2,6	1,4	0,1	0,1									
1975	0,9	0,1	0,0										
1976	0,1	0,1											
1977	0,2												

Anhang 45: **ID 98:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).

(^{14}C: 120,7 ± 0,80 pMC; gestorben zwischen dem 15. und 27 Lj., im Jahr 1991.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-	Lebensjahr												
Jahr	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1939													6,0
1940												6,0	5,0
1941										6,0	6,0	5,0	4,0
1942									6,0	5,0	4,5	4,0	3,5
1943							6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5
1944						6,0	2,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0
1945					6,0	1,0	1,0	1,0					
1946				5,5	1,0								
1947			5,0	1,0									
1948		4,5	1,0										
1949	4,0												
...													
1968										6,0			
1969							6,0	6,0	6,0				
1970						6,0	6,0	6,0					
1971					6,0	6,0	6,0						
1972			6,0	6,0	6,0	5,5							
1973		6,0	6,0	6,0	4,5								
1974	6,0	6,0	6,0	4,0									
1975	6,0	5,5	3,0										
1976	4,5	2,0											
1977	1,0												

Anhang 46: **ID 11:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 150,9 ± 0,80 pMC; gestorben im 27. Lj. ± 8 Jahre, 1992 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-Jahr	Lebensjahr								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1949					3,2				
1950		2,7	2,3	2,2	2,3	2,7			
1951	2,0	1,5	1,4	1,6	2,0	2,6			
1952	0,8	0,8	1,1	1,6	2,2	2,9			
1953	0,2	0,7	1,5	2,1	2,8				
1954	0,2	1,3	2,2	3,0					
1955	0,8	2,1							
1956	1,7								
1957	2,9								

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-Jahr	Lebensjahr								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1949					4,0				
1950		3,4	2,8	2,7	2,9	3,4			
1951	2,5	1,8	1,8	2,0	2,6	3,2			
1952	1,0	1,0	1,4	2,0	2,7	3,6			
1953	0,2	0,9	1,9	2,6	3,5				
1954	0,2	1,7	2,8	3,7					
1955	1,0	2,7							
1956	2,1								
1957	3,7								

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten und ^{14}C-Werten vorliegt

Geburts-Jahr	Lebensjahr								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1949					6,0				
1950		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0			
1951	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0			
1952	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0			
1953	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0				
1954	6,0	6,0	6,0	6,0					
1955	6,0	6,0							
1956	6,0								
1957	4,5								

Anhang 47: **ID 14:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 116,5 ± 0,60 pMC; gestorben im 27. Lj. ± 8 Jahre, 1995 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
1931																	0,7
1932																0,7	-0,6
1933															0,7	-0,6	0,9
1934														0,6	-0,6	0,9	-0,8
1935													0,6	-0,7	0,8	-0,8	-0,1
1936												0,4	0,8	0,6	-1,0	-0,3	0,9
1937										2,4	0,1	0,5	0,3	0,7	-0,6	0,5	-0,5
1938									1,9	-0,4	-0,0	-0,3	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,8
1939								1,0	0,1	0,7	0,7	-0,8	0,1	-1,0	0,6	-0,2	-0,8
1940							-0,1	0,3	-0,5	-0,5	0,1	-1,1	0,2	-0,6	1,3	0,8	0,3
1941						-0,1	0,5	-0,1	0,1	0,9	-0,1	-1,0	0,7	0,1	-0,4	-0,9	-1,3
1942				1,6	0,4	0,2	-0,1	0,3	-0,8	0,5	-0,3	-1,0	1,1	0,7	0,3	0,0	-0,3
1943			-0,3	0,1	-0,4	-0,2	0,6	-0,0	-0,6	1,2	0,8	0,5	0,2	0,0	-0,2	-0,4	-0,6
1944		-0,2	-0,9	-1,6	-2,1												
1945	-0,1																
...																	
1972					-2,4	-1,9											
1973			-2,1	-1,7	-1,3												
1974		-1,6	-1,0	-0,7													
1975	-1,4	-0,6	-0,0														
1976	-0,4	0,0															
1977	-0,1																

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
1931																	1,1
1932																1,1	1,0
1933															1,1	1,0	1,5
1934														1,1	1,1	1,4	1,3
1935													1,0	1,2	1,3	1,4	0,2
1936												0,7	1,3	1,0	1,7	0,5	1,4
1937										4,0	0,2	0,8	0,5	1,2	1,0	0,9	0,8
1938									3,2	0,7	0,1	0,4	0,3	1,9	0,0	1,7	1,3
1939								1,7	0,1	1,1	1,1	1,3	0,2	1,6	1,0	0,3	1,3
1940							0,1	0,5	0,9	0,9	0,1	1,8	0,4	1,0	2,2	1,3	0,5
1941						0,2	0,9	0,1	0,2	1,5	0,1	1,6	1,2	0,1	0,7	1,5	2,1
1942				2,7	0,6	0,4	0,2	0,5	1,3	0,8	0,5	1,6	1,8	1,2	0,6	0,0	0,4
1943			0,5	0,2	0,7	0,4	1,0	0,1	1,0	1,9	1,4	0,8	0,4	0,0	0,3	0,6	0,9
1944		0,3	1,5	2,6	3,6												
1945	0,1																
...																	
1972					4,0	3,2											
1973			3,5	2,8	2,1												
1974		2,7	1,7	1,1													
1975	2,3	1,0	0,0														
1976	0,6	0,1															
1977	0,1																

Anhang 47: **ID 14:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).

(^{14}C: 116,5 ± 0,60 pMC; gestorben im 27. Lj. ± 8 Jahre, 1995 aufgefunden.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorliegt.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
1931																	5,5
1932																5,5	5,0
1933															5,5	5,0	4,0
1934														5,5	5,0	4,0	4,0
1935													5,5	5,0	4,0	4,0	3,5
1936												5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0
1937										6,0	5,5	4,5	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0
1938									6,0	5,5	4,5	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5
1939								6,0	5,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
1940							6,0	4,5	4,0	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
1941						5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
1942				6,0	4,5	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1943			5,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1944		3,0	1,0	1,0	1,0												
1945	2,5																
...																	
1972					6,0	6,0											
1973			6,0	6,0	6,0												
1974		6,0	6,0	6,0													
1975	6,0	6,0	6,0														
1976	6,0	5,0															
1977	4,0																

Anhang 48: **ID 9:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 139,0 ± 1,40 pMC; gestorben im 30. Lj. ± 8 Jahre, 1980 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
1940														5,5	5,3	5,2	5,3
1941												5,3	4,9	4,8	4,7	4,8	4,8
1942										4,9	4,5	4,1	4,0	4,0	4,1	4,2	4,5
1943							4,7	3,8	3,1	2,8	2,5	2,5	2,6	2,8	2,9	3,3	3,8
1944			5,3	3,9	2,7	1,7	0,9	0,4	0,2	0,2	0,3	0,5	0,8	1,1	1,6	2,2	
1945	3,3	1,7	0,5	-0,5	-0,1	0,5	0,1	-0,0	-0,1	0,0	0,2	-0,4	-0,1	-0,1	0,6		
1946	-0,3	-0,2	0,2	-0,4	0,3	0,0	-0,1	-0,2	-0,1	0,1	0,3	-0,3	0,1	0,1			
1947	0,5	-0,1	-0,6	0,3	0,1	-0,0	-0,1	0,0	0,1	0,3	0,4	-0,1	0,3				
1948	-0,1	-0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	-0,4	-0,2	0,1					
1949	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,1	0,0						
1950	-1,4	-1,4	-1,5	-1,5	-1,4	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1	-1,0							
1951	-3,3	-3,3	-3,3	-3,2	-3,1	-3,0	-3,0	-2,8	-2,7								
1952	-4,8	-4,7	-4,7	-4,6	-4,5	-4,4	-4,2	-4,0									
1953				-5,5	-5,4	-5,2	-4,6										
1954					-5,6	-4,5											
1955				-5,3	-4,3												
1956			-4,9	-3,9													
1957	-5,3	-4,4	-3,4														
1958	-3,8	-2,9															
1959	-2,2																

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
1940														3,9	3,8	3,7	3,8
1941												3,8	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4
1942										3,5	3,2	3,0	2,9	2,9	2,9	3,0	3,2
1943							3,4	2,7	2,2	2,0	1,8	1,8	1,8	2,0	2,1	2,4	2,7
1944			3,8	2,8	1,9	1,2	0,7	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,1	1,6	
1945	2,3	1,2	0,4	0,3	0,1	0,4	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,3	0,0	0,1	0,4		
1946	0,2	0,1	0,1	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0			
1947	0,4	0,0	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2				
1948	0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1					
1949	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0						
1950	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7							
1951	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,0	1,9								
1952	3,4	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9									
1953				3,9	3,8	3,7	3,3										
1954					4,0	3,2											
1955				3,8	3,0												
1956			3,5	2,8													
1957	3,8	3,1	2,4														
1958	2,7	2,0															
1959	1,6																

Anhang 48: **ID 9:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).

(^{14}C: 139,0 ± 1,40 pMC; gestorben im 30. Lj. ± 8 Jahre, 1980 aufgefunden.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorliegt.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
1940														6,0	6,0	6,0	6,0
1941												6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
1942										6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
1943							6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
1944			6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	
1945	6,0	6,0	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5	6,0	6,0		
1946	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0			
1947	3,5	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,5	3,5				
1948	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5					
1949	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5						
1950	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0							
1951	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0								
1952	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0									
1953				1,0	1,0	1,0	6,0										
1954					6,0	6,0											
1955				6,0	6,0												
1956			6,0	6,0													
1957	6,0	6,0	6,0														
1958	6,0	6,0															
1959	6,0																

Anhang 49: **ID 49:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 141,1 ± 1,20 pMC; gestorben im 30. Lj. ± 8 Jahre, 1995 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1943										4,6	4,6	4,7					
1944					3,8	3,1	2,6	2,4	2,3	2,4	2,6	2,9	3,2	3,7	4,3		
1945	3,8	2,6	1,6	0,8	0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,2	0,5	1,0	1,4	2,0	2,7	3,5	4,3	
1946	-0,2	0,1	0,5	0,0	-0,2	-0,3	-0,2	0,0	0,3	-0,0	-0,2	0,6	1,4	2,2	3,1	4,0	
1947	-0,2	0,4	0,0	-0,2	-0,2	-0,2	0,0	0,2	-0,2	0,1	0,1	0,3	1,2	2,1	3,1	4,0	
1948	0,5	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	-0,2	0,0	-0,1	0,1	0,4	1,3	2,2	3,1	3,8	4,4
1949	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	-0,4	-0,2	0,0	-0,3	0,1	-0,0	0,6	1,4	2,1	2,7	3,3	3,8
1950	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,2	-0,2	0,1	-0,0	0,5	1,1	1,6	2,0	2,3	2,6
1951	-1,2	-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,4	-0,1	-0,0	0,0	0,3	0,6	0,8	1,1	1,3
1952	-2,6	-2,5	-2,5	-2,3	-2,2	-2,1	-1,9	-1,4	-0,3	0,1	-0,2	0,2	-0,1	-0,1	-0,2	0,0	0,3
1953	-3,6	-3,5	-3,4	-3,3	-3,1	-2,5	-1,4	-0,3	-0,1	-0,0	-0,2	-0,2	-0,2	0,3	-0,1	0,3	-0,3
1954	-4,2	-4,1	-4,0	-3,4	-2,4	-1,3	-0,2	-0,0	-0,1	0,1	0,2	0,2	-0,1	0,4	-0,1	0,3	-0,6
1955	-4,6	-4,2	-3,2	-2,1	-1,1	-0,0	0,1	-0,0	0,2	0,2	0,1	-0,3	0,2	-0,4	0,0	0,4	-0,7
1956	-3,7	-2,8	-1,8	-0,7	-0,1	-0,1	0,2	-0,3	0,4	0,2	-0,2	0,3	-0,5	-0,0	0,4	0,8	-0,5
1957	-2,3	-1,3	-0,3	-0,1	-0,3	-0,1	-0,0	-0,2	0,4	-0,0	0,5	-0,3	0,1	0,5	-0,8	-0,5	-0,2
1958	-0,7	-0,2	-0,1	0,2	-0,3	0,3	0,1	-0,3	0,2	-0,5	-0,1	0,3	0,7	-0,6	-0,3	-0,0	
1959	0,1	-0,0	0,1	0,2	0,0	-0,3	0,2	-0,5	-0,1	0,3	0,7	-0,6	-0,3	0,0	0,3		
1960	-0,1	-0,1	-0,3	0,2	-0,3	0,1	0,4	-0,5	-0,2	0,1	0,3	0,6	0,9	1,2			
1961	-0,3	0,0	0,4	-0,2	0,0	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3	1,6	1,9	2,1				
1962	0,2	0,5	0,7	0,9	1,2	1,4	1,7	1,9	2,2	2,5	2,7	3,0					
1963	1,4	1,6	1,9	2,1	2,3	2,6	2,8	3,1	3,3	3,6	3,9						
1964	3,5	3,7	3,9	4,1	4,4	4,6											

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1943										3,9	3,9	3,9					
1944					3,2	2,6	2,1	2,0	1,9	2,0	2,2	2,4	2,7	3,1	3,6		
1945	3,1	2,2	1,4	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,7	2,3	2,9	3,6	
1946	0,2	0,0	0,4	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,3	0,0	0,1	0,5	1,1	1,8	2,6	3,3	
1947	0,1	0,3	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	1,0	1,8	2,6	3,3	
1948	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1	0,3	1,1	1,9	2,5	3,2	3,7
1949	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	0,5	1,2	1,8	2,3	2,7	3,1
1950	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,4	0,9	1,3	1,7	1,9	2,2
1951	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
1952	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,3
1953	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,1	1,2	0,3	0,1	0,0	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3
1954	3,5	3,4	3,3	2,9	2,0	1,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,5
1955	3,8	3,5	2,7	1,8	0,9	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,0	0,4	0,6
1956	3,1	2,3	1,5	0,6	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,0	0,3	0,7	0,5
1957	1,9	1,1	0,2	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,4	0,3	0,1	0,4	0,7	0,4	0,2
1958	0,6	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1	0,3	0,6	0,5	0,3	0,0	
1959	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2	0,1	0,4	0,1	0,2	0,6	0,5	0,2	0,0	0,3		
1960	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,2	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0			
1961	0,3	0,0	0,3	0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	1,8				
1962	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,5					
1963	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2						
1964	2,9	3,1	3,2	3,4	3,6	3,8											
1965																	

Anhang 49: **ID 49:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 141,1 ± 1,20 pMC; gestorben im 31. Lj. ± 8 Jahre, 1995 aufgefunden.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten und ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1943										6,0	6,0	6,0					
1944					6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0		
1945	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	
1946	6,0	5,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,5	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	
1947	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0	6,0	6,0	6,0	5,5	5,0	
1948	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5
1949	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	4,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0
1950	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	5,0	3,5	2,5	2,5	2,0	1,5	1,0
1951	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
1952	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	5,0	3,5	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
1953	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,0
1954	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,0
1955	1,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0
1956	6,0	6,0	6,0	6,0	5,5	4,5	4,0	3,0	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0
1957	6,0	6,0	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0
1958	6,0	5,5	4,5	4,0	3,0	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	
1959	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0		
1960	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
1961	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
1962	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1963	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1964	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0											

Anhang 50: **ID 83:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 151,0 ± 1,00 pMC; gestorben im 37. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1991.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten

Geburts-Jahr	Lebensjahr										
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1947	6,0										
1948	5,1	5,6									
1949	4,7	5,4									
1950	4,7	5,5									
1951	4,9	5,7									
1952	5,4										
1953	5,9										
1954											
1955											

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen

Geburts-Jahr	Lebensjahr										
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1947	6,0										
1948	5,1	5,6									
1949	4,7	5,4									
1950	4,7	5,5									
1951	4,9	5,7									
1952	5,4										
1953	5,9										
1954											
1955											

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-Jahr	Lebensjahr Rate										
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1947	6,0										
1948	6,0	6,0									
1949	6,0	6,0									
1950	6,0	6,0									
1951	6,0	6,0									
1952	5,5										
1953	3,5										
1954											
1955											

Anhang 51: **ID 77:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 147,9 ± 1,10 pMC; gestorben im 427. Lj. ± 10 Jahre, im Jahr 1988.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-Jahr	Lebensjahr										
	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
1946	6,1										
1947	5,4	6,2									
1948	5,3	6,2									
1949	5,6	6,5									
1950	5,8	6,6									
1951	5,7	6,3									
1952	5,3	5,6	5,9	6,1	6,3	6,6					
1953	4,7	4,9	5,2	5,4	5,7						
1954	4,3	4,5	4,8	5,0							
1955	4,1	4,4	4,6								
1956	4,2	4,5									
1957	4,6										

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-Jahr	Lebensjahr										
	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
1946	5,6										
1947	4,9	5,6									
1948	4,8	5,7									
1949	5,1	5,9									
1950	5,3	6,0									
1951	5,2	5,7									
1952	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	6,0					
1953	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1						
1954	3,9	4,1	4,3	4,6							
1955	3,7	4,0	4,2								
1956	3,8	4,1									
1957	4,1										

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-Jahr	Lebensjahr										
	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
1946	6,0										
1947	6,0	6,0									
1948	6,0	6,0									
1949	6,0	5,5									
1950	4,5	4,0									
1951	3,0	2,5									
1952	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1953	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1954	1,0	1,0	1,0	1,0							
1955	1,0	1,0	1,0								
1956	1,0	1,0									
1957	1,0										

Anhang 52: **ID 13:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 108,1 ± 0,70 pMC; gestorben im 44. Lj. ± 8 Jahre, 1995 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
1912																	-0,3
1913																-0,3	0,4
1914															-0,3	0,4	-0,4
1915														-0,3	0,4	-0,4	-0,3
1916													-0,3	0,4	-0,4	-0,3	0,5
1917												-0,3	0,4	-0,4	-0,3	0,5	-0,5
1918											-0,3	0,5	-0,4	-0,3	0,5	-0,5	1,2
1919										-0,3	0,5	-0,3	-0,3	0,5	-0,5	1,2	0,5
1920									-0,2	0,5	-0,3	-0,3	0,5	-0,4	1,3	0,6	-0,1
1921								-0,2	0,5	-0,3	-0,2	0,6	-0,4	1,3	0,6	-0,0	-0,6
1922							-0,2	0,5	-0,3	-0,2	0,6	-0,4	1,3	0,6	-0,0	-0,6	-1,1
1923						-0,2	0,5	-0,3	-0,2	0,6	-0,4	-1,3	0,7	0,0	-0,6	-1,1	-1,5
1924					-0,2	0,6	-0,2	-0,2	0,6	-0,3	-1,3	0,7	0,0	-0,5	-1,0	-1,5	1,8
1925				-0,2	0,6	-0,2	-0,2	0,7	-0,3	-1,2	0,7	0,1	-0,5	-1,0	-1,5	1,8	1,5
1926			-0,2	0,6	-0,2	-0,1	0,7	-0,3	-1,2	0,7	0,1	-0,5	-1,0	-1,4	1,8	1,5	1,3
1927		-0,2	0,6	-0,2	-0,1	0,7	-0,3	-1,2	0,8	0,1	-0,5	-1,0	-1,4	-1,8	1,5	1,3	1,0
1928	-0,2	0,6	-0,2	-0,1	0,7	-0,3	-1,2	0,8	0,1	-0,4	-0,9	-1,4	-1,8	1,6	1,3	1,0	0,8
1929	-0,6	-0,2	-0,1	0,7	-0,2	-1,2	0,8	0,2	-0,4	-0,9	-1,4	-1,8	1,6	1,3	1,1	0,8	0,6
1930	-0,1	-0,1	0,8	-0,2	-1,1	0,8	0,2	-0,4	-0,9	-1,4	-1,8	1,6	1,4	1,1	0,9	0,7	0,5
1931	-0,0	0,8	-0,2	-1,1	0,9	0,2	-0,4	-0,9	-1,3	-1,7	1,7	1,4	1,1	0,9	0,7	0,5	0,4
1932	0,8	-0,2	-1,1	0,9	0,2	-0,3	-0,8	-1,3	-1,7	1,7	1,4	1,2	0,9	0,7	0,5	0,4	0,2
1933	-0,2	-1,1	0,9	0,2	-0,3	-0,8	-1,3	-1,7	1,7	1,4	1,2	0,9	0,7	0,5	0,4	0,2	0,1
1934	-1,1	0,9	0,2	-0,3	-0,8	-1,3	-1,7	1,7	1,4	1,1	0,9	0,7	0,5	0,4	0,2	0,1	-0,0
1935	0,8	0,1	-0,4	-0,9	-1,4	-1,8	1,6	1,3	1,1	0,8	0,6	0,4	0,3	0,1	0,0	-0,1	-0,2
1936	-0,1	-0,7	-1,2	-1,6	1,6	1,4	1,1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
1937	-1,1	-1,6	1,5	1,2	0,9	0,7	0,4	0,2	0,0	-0,2	-0,3	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1,0
1938	1,2	0,8	0,5	0,3	0,0	-0,2	-0,5	-0,6	-0,8	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,6
1939	-0,4	-0,6	-0,9	-1,2	-1,4	-1,6	-1,8	-1,9	-2,1	-2,2	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6	-2,6	-2,7	-2,7
1940	-2,1	-2,3	-2,6														

Anhang 52: **ID 13:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 108,1 ± 0,70 pMC; gestorben im 44. Lj. ± 8 Jahre, 1995 aufgefunden.)

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
1912																	0,4
1913																0,4	0,6
1914															0,4	0,6	0,6
1915														0,4	0,6	0,5	0,5
1916													0,4	0,6	0,5	0,5	0,7
1917												0,4	0,6	0,5	0,5	0,7	0,7
1918											0,4	0,7	0,5	0,4	0,7	0,7	1,7
1919										0,4	0,7	0,5	0,4	0,7	0,7	1,7	0,8
1920									0,3	0,7	0,5	0,4	0,8	0,6	1,8	0,8	0,1
1921								0,3	0,7	0,4	0,4	0,8	0,6	1,8	0,8	0,1	0,9
1922							0,3	0,7	0,4	0,3	0,8	0,6	1,9	0,9	0,0	0,9	1,6
1923						0,3	0,8	0,4	0,3	0,9	0,5	1,8	0,9	0,0	0,8	1,5	2,2
1924					0,3	0,8	0,3	0,3	0,9	0,5	1,8	1,0	0,1	0,8	1,5	2,1	2,5
1925				0,3	0,8	0,3	0,2	0,9	0,5	1,8	1,0	0,1	0,7	1,4	2,1	2,6	2,1
1926			0,3	0,8	0,3	0,2	1,0	0,4	1,7	1,1	0,1	0,7	1,4	2,1	2,6	2,2	1,8
1927		0,2	0,9	0,3	0,2	1,0	0,4	1,7	1,1	0,2	0,7	1,4	2,0	2,6	2,2	1,8	1,4
1928	0,2	0,9	0,2	0,2	1,0	0,4	1,7	1,1	0,2	0,6	1,3	2,0	2,6	2,2	1,9	1,5	1,2
1929	0,9	0,2	0,1	1,1	0,3	1,7	1,1	0,2	0,6	1,3	2,0	2,6	2,3	1,9	1,5	1,2	0,9
1930	0,2	0,1	1,1	0,3	1,6	1,2	0,3	0,6	1,3	1,9	2,5	2,3	1,9	1,6	1,2	1,0	0,7
1931	0,1	1,1	0,3	1,6	1,2	0,3	0,5	1,2	1,9	2,5	2,4	2,0	1,6	1,3	1,0	0,7	0,5
1932	1,2	0,2	1,6	1,3	0,4	0,5	1,2	1,9	2,4	2,4	2,0	1,7	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3
1933	0,2	1,6	1,3	0,4	0,5	1,2	1,9	2,4	2,4	2,0	1,7	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3	0,1
1934	1,6	1,2	0,3	0,5	1,2	1,9	2,5	2,4	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8	0,5	0,3	0,1	0,0
1935	1,1	0,2	0,6	1,3	2,0	2,6	2,3	1,9	1,5	1,2	0,9	0,6	0,4	0,2	0,0	0,2	0,3
1936	0,1	1,0	1,7	2,3	2,3	1,9	1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8
1937	1,5	2,2	2,2	1,8	1,3	1,0	0,6	0,3	0,0	0,2	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4
1938	1,7	1,2	0,8	0,4	0,0	0,4	0,7	0,9	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,3	2,3
1939	0,5	0,9	1,3	1,7	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7	3,7	3,8	3,9
1940	3,0	3,4	3,7														

Anhang 52: **ID 13:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 108,1 ± 0,70 pMC; gestorben im 44. Lj. ± 8 Jahre, 1995 aufgefunden.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
1912																	5,5
1913																5,5	3,5
1914															5,5	3,5	3,0
1915														5,5	3,5	3,0	2,5
1916													5,5	3,5	3,0	2,5	2,0
1917												5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0
1918											5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5
1919										5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5
1920									5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5
1921								5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5
1922							5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1923						5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1924					5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0
1925				5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0
1926			5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0
1927		5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0
1928	5,5	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
1929	4,0	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1930	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1931	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1932	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1933	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1934	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1935	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1936	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1937	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1938	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1939	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1940	1,0	1,0	1,0														

Anhang 53: **ID 59:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 112,7 ±1,20 pMC; gestorben im 47. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1974.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
1910																3,5	0,2
1911															3,5	0,2	-0,4
1912														3,5	0,2	-0,4	0,6
1913													3,5	0,2	-0,4	0,6	0,8
1914												3,5	0,2	-0,4	0,6	0,8	-0,5
1915											3,5	0,2	-0,4	0,6	0,8	-0,5	0,7
1916										3,5	0,2	-0,4	0,6	0,8	-0,5	0,7	-0,4
1917									3,5	0,2	-0,4	0,6	0,9	-0,5	0,7	-0,3	-1,3
1918								3,5	0,2	-0,4	0,6	0,9	-0,5	0,7	-0,3	-1,3	0,8
1919							3,5	0,2	-0,3	0,6	0,9	-0,5	0,7	-0,3	-1,2	0,8	0,2
1920						3,5	0,2	-0,3	0,6	0,9	-0,4	0,7	-0,3	-1,2	0,9	0,3	-0,3
1921					3,5	0,2	-0,3	0,7	0,9	-0,4	0,7	-0,3	-1,2	0,9	0,3	-0,3	
1922				3,5	0,2	-0,3	0,7	0,9	-0,4	0,8	-0,3	-1,2	0,9	0,3	-0,3		
1923			3,5	0,3	-0,3	0,7	1,0	-0,4	0,8	-0,2	-1,2	0,9	0,3	-0,2			
1924		3,6	0,3	-0,3	0,7	1,0	-0,4	0,8	-0,2	-1,1	1,0	0,4	-0,2				
1925	3,6	0,3	-0,3	0,7	1,0	-0,4	0,8	-0,2	-1,1	1,0	0,4	-0,2					
1926	0,3	-0,3	0,7	1,0	-0,3	0,8	-0,2	-1,1	1,0	0,4	-0,2						
1927	-0,2	0,7	-1,0	-0,3	0,9	-0,2	-1,1	1,0	0,4	-0,1							
1928	0,8	-1,0	-0,3	0,9	-0,2	-1,1	1,0	0,4	-0,1								
1929	-1,0	-0,3	0,9	-0,1	-1,1	1,1	0,5	-0,1									
1930	-0,3	0,9	-0,1	-1,0	1,1	0,5	-0,1										
1931	0,9	-0,1	-1,0	1,1	0,5	-0,1											
1932	-0,1	-1,0	1,1	0,5	-0,0												
1933	-1,0	1,1	0,5	-0,0													
1934	1,1	0,5	-0,1														
1935	0,4	-0,1															
1936	-0,3																

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
1910																2,9	0,1
1911															2,9	0,2	0,3
1912														2,9	0,2	0,3	0,5
1913													2,9	0,2	0,3	0,5	0,7
1914												2,9	0,2	0,3	0,5	0,7	0,4
1915											2,9	0,2	0,3	0,5	0,7	0,4	0,5
1916										2,9	0,2	0,3	0,5	0,7	0,4	0,6	0,3
1917									2,9	0,2	0,3	0,5	0,7	0,4	0,6	0,3	1,1
1918								2,9	0,2	0,3	0,5	0,7	0,4	0,6	0,3	1,0	0,7
1919							2,9	0,2	0,3	0,5	0,7	0,4	0,6	0,3	1,0	0,7	0,2
1920						2,9	0,2	0,3	0,5	0,7	0,4	0,6	0,3	1,0	0,7	0,2	0,2
1921					2,9	0,2	0,3	0,5	0,8	0,4	0,6	0,2	1,0	0,7	0,2	0,2	
1922				2,9	0,2	0,3	0,6	0,8	0,3	0,6	0,2	1,0	0,8	0,3	0,2		
1923			3,0	0,2	0,2	0,6	0,8	0,3	0,7	0,2	1,0	0,8	0,3	0,2			
1924		3,0	0,2	0,2	0,6	0,8	0,3	0,7	0,2	1,0	0,8	0,3	0,2				
1925	3,0	0,2	0,2	0,6	0,8	0,3	0,7	0,2	0,9	0,8	0,3	0,1					
1926	0,2	0,2	0,6	0,8	0,3	0,7	0,1	0,9	0,8	0,3	0,1						
1927	0,2	0,6	0,8	0,3	0,7	0,1	0,9	0,8	0,3	0,1							
1929	0,6	0,8	0,3	0,7	0,1	0,9	0,9	0,4	0,1								
1930	0,8	0,2	0,7	0,1	0,9	0,9	0,4	0,1									
1931	0,2	0,8	0,1	0,9	0,9	0,4	0,1										
1932	0,8	0,1	0,8	0,9	0,4	0,0											
1933	0,1	0,8	0,9	0,4	0,0												
1934	0,8	0,9	0,4	0,0													
1935	0,9	0,4	0,0														
1936	0,4	0,1															

Anhang 53: **ID 59:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 112,7 ±1,20 pMC; gestorben im 47. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1974.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
1910																6,0	5,5
1911															6,0	5,5	4,5
1912														6,0	5,5	4,5	3,5
1913													6,0	5,5	4,5	3,5	3,0
1914												6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0
1915											6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5
1916										6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5
1917									6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
1918								6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0
1919							6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0
1920						6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
1921					6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	
1922				6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0		
1923			6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0			
1924		6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0				
1925	6,0	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0					
1926	5,5	4,5	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0						
1927	4,5	3,5	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0							
1928	3,5	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0								
1929	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0									
1930	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0										
1931	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0											
1932	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0												
1933	2,5	2,0	2,0	2,0													
1934	2,0	2,0	2,0														
1935	2,0	2,0															
1936	2,0																

Anhang 54: **ID 66:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 111,4 ±1,20 pMC; gestorben im 49. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1985.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	40	41	54	55	56	57
1908																2,2	0,0
1909															2,2	0,0	-0,2
1910														2,2	0,0	-0,2	-0,8
1911													2,2	0,1	-0,2	-0,7	-0,5
1912												2,2	0,1	-0,2	-0,7	-0,5	0,4
1913											2,2	0,1	-0,2	-0,7	-0,5	0,4	-0,7
1914										2,2	0,1	-0,2	-0,7	-0,5	0,4	-0,6	1,0
1915									2,2	0,1	-0,2	-0,7	-0,5	0,4	-0,6	1,0	0,2
1916								2,2	0,1	-0,2	-0,7	-0,5	0,5	-0,6	1,0	0,2	-0,5
1917							2,2	0,1	-0,2	-0,7	-0,4	0,5	-0,6	1,0	0,2	-0,5	-1,1
1918						2,2	0,1	-0,2	-0,7	-0,4	0,5	-0,6	1,0	0,2	-0,5	-1,1	-1,6
1919					2,2	0,1	-0,1	-0,7	-0,4	0,5	-0,6	1,0	0,2	-0,5	-1,1	-1,6	1,3
1920				2,2	0,1	-0,1	-0,7	-0,4	0,5	-0,6	1,1	0,3	-0,4	-1,0	-1,6	1,3	0,9
1921			2,2	0,1	-0,1	-0,6	-0,4	0,5	-0,6	1,1	0,3	-0,4	-1,0	-1,6	1,3	0,9	0,6
1922		2,2	0,1	-0,1	-0,6	-0,4	0,5	-0,5	1,1	0,3	-0,4	-1,0	-1,6	1,3	1,0	0,6	0,3
1923	2,2	0,1	-0,1	-0,6	-0,3	0,6	-0,5	1,1	0,3	-0,4	-1,0	-1,5	1,4	1,0	0,6	0,3	0,0
1924	0,2	-0,1	-0,6	-0,3	0,6	-0,5	1,2	0,4	-0,3	-0,9	-1,5	1,4	1,0	0,7	0,3	0,1	-0,2
1925	-0,1	-0,6	-0,3	0,6	-0,5	1,2	0,4	-0,3	-0,9	-1,5	1,4	1,0	0,7	0,4	0,1	-0,2	-0,4
1926	-0,6	-0,3	0,6	-0,5	1,2	0,4	-0,3	-0,9	-1,5	1,4	1,1	0,7	0,4	0,1	-0,1	-0,3	-0,5
1927	-0,3	0,7	-0,4	1,2	0,4	-0,3	-0,9	-1,4	1,5	1,1	0,7	0,4	0,1	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7
1928	0,7	-0,4	1,2	0,4	-0,3	-0,9	-1,4	1,5	1,1	0,8	0,4	0,1	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-0,8
1929	-0,4	1,3	0,5	-0,2	-0,8	-1,4	1,5	1,1	0,8	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	-0,9
1930	1,3	0,5	-0,2	-0,8	-1,4	1,5	1,2	0,8	0,5	0,2	-0,1	-0,3	-0,5	-0,6	-0,7	-0,9	
1931	0,5	-0,2	-0,8	-1,4	1,6	1,2	0,8	0,5	0,2	-0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8		
1932	-0,2	-0,8	-1,3	1,6	1,2	0,9	0,5	0,2	-0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8			
1933	-0,8	-1,3	1,6	1,2	0,9	0,5	0,2	-0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8				
1934	-1,4	1,6	1,2	0,8	0,5	0,2	-0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8					
1935	1,5	1,1	0,8	0,4	0,1	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-0,8	-0,9						
1936	0,9	0,5	0,2	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9	-1,0	-1,1							
1937	0,2	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,0	-1,2	-1,3	-1,4								
1938	-0,7	-1,0	-1,2	-1,4	-1,6	-1,7	-1,9	-2,0									
1939	1,7	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9										
1940	0,2	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4											
1941	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,7												
1942	-3,1	-3,2	-3,3	-3,3													

Anhang 54: **ID 66:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 111,4 ±1,20 pMC; gestorben im 49. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1985.)

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	40	41	54	55	56	57
1908																1,8	0,0
1909															1,8	0,0	0,2
1910														1,8	0,0	0,2	0,6
1911													1,8	0,0	0,2	0,6	0,4
1912												1,8	0,1	0,2	0,6	0,4	0,3
1913											1,8	0,1	0,1	0,6	0,4	0,4	0,5
1914										1,8	0,1	0,1	0,6	0,4	0,4	0,5	0,8
1915									1,8	0,1	0,1	0,6	0,4	0,4	0,5	0,8	0,2
1916								1,8	0,1	0,1	0,6	0,4	0,4	0,5	0,8	0,2	0,4
1917							1,8	0,1	0,1	0,6	0,4	0,4	0,5	0,8	0,2	0,4	0,9
1918						1,8	0,1	0,1	0,6	0,4	0,4	0,5	0,9	0,2	0,4	0,9	1,4
1919					1,8	0,1	0,1	0,6	0,4	0,4	0,5	0,9	0,2	0,4	0,9	1,3	1,0
1920				1,9	0,1	0,1	0,5	0,3	0,4	0,5	0,9	0,2	0,4	0,9	1,3	1,1	0,8
1921			1,9	0,1	0,1	0,5	0,3	0,4	0,5	0,9	0,2	0,3	0,8	1,3	1,1	0,8	0,5
1922		1,9	0,1	0,1	0,5	0,3	0,5	0,5	0,9	0,3	0,3	0,8	1,3	1,1	0,8	0,5	0,2
1923	1,9	0,1	0,1	0,5	0,3	0,5	0,4	0,9	0,3	0,3	0,8	1,3	1,1	0,8	0,5	0,3	0,0
1924	0,1	0,1	0,5	0,3	0,5	0,4	1,0	0,3	0,3	0,8	1,3	1,2	0,8	0,6	0,3	0,0	0,2
1925	0,0	0,5	0,3	0,5	0,4	1,0	0,3	0,3	0,8	1,2	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3
1926	0,5	0,2	0,5	0,4	1,0	0,3	0,2	0,7	1,2	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3	0,4
1927	0,2	0,5	0,4	1,0	0,4	0,2	0,7	1,2	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3	0,4	0,6
1928	0,6	0,4	1,0	0,4	0,2	0,7	1,2	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7
1929	0,3	1,1	0,4	0,2	0,7	1,2	1,3	0,9	0,7	0,4	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7
1930	1,1	0,4	0,2	0,7	1,2	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	
1931	0,4	0,2	0,7	1,1	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7		
1932	0,1	0,7	1,1	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7			
1933	0,7	1,1	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7				
1934	1,1	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7					
1935	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8						
1936	0,7	0,5	0,2	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9							
1937	0,2	0,1	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2								
1938	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6									
1939	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8										
1940	0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3											
1941	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4												
1942	2,6	2,7	2,7	2,8													

Anhang 54: **ID 66:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 111,4 ±1,20 pMC; gestorben im 49. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1985.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	40	41	54	55	56	57
1908																6,0	5,0
1909															6,0	5,0	4,0
1910														6,0	5,0	4,0	3,5
1911													6,0	5,0	4,0	3,5	3,0
1912												6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5
1913											6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5
1914										6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0
1915									6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0
1916								6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
1917							6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0
1918						6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
1919					6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5
1920				6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5
1921			6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5
1922		6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5
1923	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1924	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1925	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1926	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1927	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1928	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1929	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1930	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
1931	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
1932	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5			
1933	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5				
1934	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5					
1935	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5						
1936	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5							
1937	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5								
1938	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5									
1939	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0										
1940	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0											
1941	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0												
1942	1,0	1,0	1,0	1,0													

Anhang 55: **ID 69:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 109,0 ±0,80 pMC; gestorben im 54. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1991.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
1902																	-0,2
1903																-0,2	-0,0
1904															-0,2	0,0	0,4
1905														-0,2	0,0	0,4	0,4
1906													-0,2	0,0	0,4	0,4	-0,9
1907												-0,2	0,0	0,4	0,4	-0,9	0,2
1908											-0,2	0,0	0,4	0,4	-0,9	0,2	-0,7
1909										-0,2	0,0	0,4	0,5	-0,9	0,3	-0,7	1,2
1910									-0,2	0,1	0,5	0,5	-0,9	0,3	-0,6	1,3	0,6
1911								-0,2	0,1	0,5	0,5	-0,9	0,3	-0,6	1,3	0,6	0,1
1912							-0,2	0,1	0,5	0,5	-0,8	0,3	-0,6	1,3	0,7	0,1	-0,4
1913						-0,2	0,1	0,5	0,5	-0,8	0,3	-0,6	1,3	0,7	0,1	-0,4	-0,8
1914					-0,2	0,1	0,5	0,6	-0,8	0,4	-0,6	1,4	0,7	0,1	-0,3	-0,8	-1,2
1915				-0,2	0,1	0,5	0,6	-0,8	0,4	-0,5	1,4	0,7	0,2	-0,3	-0,8	-1,2	-1,6
1916			-0,2	0,1	0,5	0,6	-0,8	0,4	-0,5	1,4	0,8	0,2	-0,3	-0,8	-1,2	-1,6	1,9
1917		-0,2	0,1	0,5	0,6	-0,8	0,4	-0,5	-1,4	0,8	0,2	-0,3	-0,8	-1,2	-1,5	-1,9	1,6
1918	-0,2	0,1	0,5	0,6	-0,8	0,4	-0,5	-1,4	0,8	0,2	-0,3	-0,8	-1,2	-1,5	-1,9	1,6	1,4
1919	0,1	0,6	0,6	-0,7	0,4	-0,5	-1,4	0,8	0,2	-0,3	-0,7	-1,1	-1,5	-1,9	1,7	1,4	1,3
1920	0,6	0,6	-0,7	0,5	-0,5	-1,3	0,8	0,3	-0,2	-0,7	-1,1	-1,5	-1,8	1,7	1,5	1,3	1,1
1921	0,7	-0,7	0,5	-0,4	-1,3	0,9	0,3	-0,2	-0,7	-1,1	-1,5	-1,8	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0
1922	-0,7	0,5	-0,4	-1,3	0,9	0,3	-0,2	-0,7	-1,1	-1,4	-1,8	1,8	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9
1923	0,5	-0,4	-1,3	0,9	0,3	-0,2	-0,6	-1,0	-1,4	-1,8	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8
1924	-0,4	-1,2	0,9	0,4	-0,1	-0,6	-1,0	-1,4	-1,7	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7
1925	-1,2	1,0	0,4	-0,1	-0,6	-1,0	-1,4	-1,7	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6
1926	1,0	0,4	-0,1	-0,5	-1,0	-1,3	-1,7	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5
1927	0,4	-0,1	-0,5	-0,9	-1,3	-1,7	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5
1928	-0,0	-0,5	-0,9	-1,3	-1,6	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
1929	-0,5	-0,9	-1,3	-1,6	-2,0	1,7	1,5	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
1930	-0,9	-1,2	-1,6	-1,9	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3
1931	-1,2	-1,6	-1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	
1932	-1,5	-1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4		
1933	-1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4			
1934	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4				
1935	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3					
1936	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1						
1937	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2							
1938	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8								
1939	-1,4	-1,5	-1,6	-1,7	-1,7	-1,8	-1,8	-1,8									
1940	-2,8	-2,9	-2,9	-3,0	-3,0	-3,1	-3,1										

Anhang 55: **ID 69:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 109,0 ±0,80 pMC; gestorben im 54. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1991.)

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
1902																	0,3
1903																0,3	0,0
1904															0,3	0,0	0,5
1905														0,3	0,0	0,5	0,5
1906													0,3	0,0	0,5	0,5	1,2
1907												0,3	0,0	0,5	0,5	1,1	0,3
1908											0,3	0,0	0,5	0,6	1,1	0,3	0,9
1909										0,3	0,1	0,6	0,6	1,1	0,3	0,8	1,5
1910									0,3	0,1	0,6	0,6	1,1	0,3	0,8	1,6	0,8
1911								0,3	0,1	0,6	0,6	1,1	0,4	0,8	1,6	0,8	0,1
1912							0,3	0,1	0,6	0,6	1,0	0,4	0,7	1,6	0,8	0,1	0,5
1913						0,3	0,1	0,6	0,7	1,0	0,4	0,7	1,7	0,9	0,2	0,5	1,0
1914					0,3	0,1	0,6	0,7	1,0	0,4	0,7	1,7	0,9	0,2	0,4	1,0	1,5
1915				0,3	0,1	0,7	0,7	1,0	0,5	0,7	1,7	0,9	0,2	0,4	1,0	1,5	2,0
1916			0,2	0,1	0,7	0,7	1,0	0,5	0,7	1,7	0,9	0,2	0,4	1,0	1,5	2,0	2,3
1917		0,2	0,1	0,7	0,7	1,0	0,5	0,7	1,7	1,0	0,2	0,4	1,0	1,5	1,9	2,4	2,0
1918	0,2	0,1	0,7	0,7	0,9	0,5	0,6	1,7	1,0	0,3	0,4	0,9	1,4	1,9	2,3	2,1	1,8
1919	0,2	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	1,7	1,0	0,3	0,3	0,9	1,4	1,9	2,3	2,1	1,8	1,6
1920	0,7	0,8	0,9	0,6	0,6	1,7	1,0	0,3	0,3	0,9	1,4	1,9	2,3	2,1	1,9	1,6	1,4
1921	0,8	0,9	0,6	0,6	1,6	1,1	0,4	0,3	0,9	1,4	1,8	2,3	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2
1922	0,9	0,6	0,5	1,6	1,1	0,4	0,2	0,8	1,3	1,8	2,2	2,2	1,9	1,7	1,4	1,2	1,1
1923	0,7	0,5	1,6	1,1	0,4	0,2	0,8	1,3	1,8	2,2	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0
1924	0,5	1,6	1,2	0,5	0,2	0,7	1,3	1,7	2,2	2,3	2,0	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,8
1925	1,5	1,2	0,5	0,1	0,7	1,2	1,7	2,1	2,3	2,1	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8
1926	1,3	0,5	0,1	0,7	1,2	1,7	2,1	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7
1927	0,5	0,1	0,7	1,2	1,6	2,1	2,4	2,1	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6
1928	0,1	0,6	1,1	1,6	2,1	2,4	2,1	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5
1929	0,6	1,1	1,6	2,0	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5
1930	1,1	1,6	2,0	2,4	2,2	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
1931	1,5	2,0	2,4	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	
1932	1,9	2,4	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5		
1933	2,4	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5			
1934	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5				
1935	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4					
1936	1,4	1,2	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1						
1937	0,7	0,5	0,4	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3							
1938	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0								
1939	1,8	1,9	2,0	2,1	2,1	2,2	2,3	2,3									
1940	3,5	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8										

Anhang 55: **ID 69:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 109,0 ±0,80 pMC; gestorben im 54. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1991.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62
1902																	6,0
1903																6,0	4,0
1904															6,0	4,0	3,0
1905														6,0	4,0	3,0	2,5
1906													6,0	4,0	3,0	2,5	2,5
1907												6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0
1908											6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0
1909										6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5
1910									6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5
1911								6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5
1912							6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5
1913						6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1914					6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1915				6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1916			6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0
1917		6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0
1918	6,0	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0
1919	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0
1920	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
1921	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1922	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1923	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1924	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1925	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1926	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1927	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1928	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1929	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1930	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1931	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
1932	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
1933	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
1934	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
1935	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1936	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1937	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0							
1938	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0								
1939	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0									
1940	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0										

Anhang 56: **ID 45:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 102,1 ±0,80 pMC; gestorben im 86. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1968.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-Jahr	Lebensjahr																
	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
1865	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	2,6
1866	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	2,6	1,2
1867	2,9	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	3,0	2,6	1,2	-0,0
1868	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,6	1,2	-0,0	-0,1
1869	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,6	1,2	-0,0	-0,1	-0,1
1870	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,6	1,2	-0,0	-0,1	-0,1	0,3
1871	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,6	1,2	-0,0	-0,1	-0,1	0,3	0,3
1872	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,6	1,2	-0,0	-0,1	-0,1	0,3	0,3	-0,4
1873	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,6	1,2	-0,0	-0,1	-0,1	0,3	0,3	-0,4	-1,1
1874	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,6	1,2	-0,0	-0,1	-0,1	0,3	0,3	-0,4	-1,1	-1,7
1875	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,6	1,2	-0,0	-0,1	-0,1	0,3	0,3	-0,4	-1,1	-1,7	-2,2
1876	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,6	1,2	-0,0	-0,1	-0,1	0,3	0,3	-0,4	-1,1	-1,7	-2,2	
1877	3,1	3,1	3,0	3,0	2,6	1,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,3	-0,5	-1,1	-1,7	-2,2		
1878	3,1	3,0	3,0	2,6	1,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,3	-0,5	-1,1	-1,7	-2,3			
1879	3,0	3,0	2,6	1,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,3	-0,5	-1,1	-1,7	-2,3				
1880	2,9	2,6	1,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,2	-0,5	-1,2	-1,7	-2,3					
1881	2,6	1,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,2	-0,5	-1,2	-1,7	-2,3						
1882	1,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,2	-0,5	-1,2	-1,8	-2,3							
1883	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	0,2	-0,5	-1,2	-1,8	-2,3								
1884	-0,1	-0,1	0,3	0,2	-0,5	-1,2	-1,7	-2,3									
1885	-0,1	0,3	0,2	-0,5	-1,2	-1,7	-2,3										
1886	0,3	0,3	-0,5	-1,1	-1,7	-2,3											
1887	0,3	-0,5	-1,1	-1,7	-2,3												
1888	-0,5	-1,1	-1,7	-2,3													
1889	-1,1	-1,7	-2,3														
1890	-1,7	-2,3															
1891	-2,2																

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-Jahr	Lebensjahr																
	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
1865	3,6	3,6	3,6	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,7	3,2
1866	3,6	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8	3,7	3,2	1,5
1867	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1
1868	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2
1869	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1
1870	3,7	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4
1871	3,8	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4
1872	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,5
1873	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,5	1,4
1874	3,8	3,9	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,5	1,4	2,1
1875	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,6	1,4	2,1	2,8
1876	3,9	3,9	3,9	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,4	0,6	1,4	2,1	2,8	
1877	3,8	3,8	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8		
1878	3,8	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,1	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8			
1879	3,8	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,2	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8				
1880	3,7	3,2	1,5	0,1	0,2	0,2	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8					
1881	3,2	1,5	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8						
1882	1,5	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,5	2,2	2,9							
1883	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,5	2,2	2,8								
1884	0,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8									
1885	0,2	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8										
1886	0,4	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8											
1887	0,3	0,6	1,4	2,2	2,8												
1888	0,6	1,4	2,2	2,8													
1889	1,4	2,2	2,8														
1890	2,2	2,8															
1891	2,8																

Anhang 56: **ID 45:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 102,1 ±0,80 pMC; gestorben im 86. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1968.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-Jahr	Lebensjahr																
	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
1865	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0
1866	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0
1867	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0
1868	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5
1869	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0
1870	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5
1871	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0
1872	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0
1873	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0
1874	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
1875	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1876	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
1877	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		
1878	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
1879	1,0	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
1880	1,0	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0					
1881	6,0	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1882	6,0	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0							
1883	6,0	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0								
1884	4,5	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0									
1885	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0										
1886	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0											
1887	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0												
1888	1,0	1,0	1,0	1,0													
1889	1,0	1,0	1,0														
1890	1,0	1,0															
1891	1,0																

Anhang 57: **ID 15:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 118,2 ±0,74 pMC; gestorben im 85. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1992.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1873																	0,8
1874																0,8	-0,7
1875															0,8	-0,7	0,4
1876														0,8	-0,7	0,4	0,7
1877													0,8	-0,7	0,4	0,7	-0,8
1878												0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1
1879											0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1	-1,0
1880										0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1	-1,0	0,5
1881									0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2
1882								0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1	-1,1	0,5	-0,2	-0,9
1883							0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1	-1,1	0,5	-0,2	-0,9	1,4
1884						0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9
1885					0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5
1886				0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1
1887			0,8	-0,7	0,4	0,6	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2
1888		0,8	-0,7	0,4	0,7	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4
1889	0,8	-0,7	0,4	0,7	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4	-0,6
1890	-0,7	0,4	0,7	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7
1891	0,4	0,7	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8
1892	0,7	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8
1893	-0,8	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9
1894	0,1	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9	-0,8
1895	-1,0	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9	-0,8	-0,8
1896	0,5	-0,2	-0,9	1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8
1897	-0,2	-0,9	-1,4	0,9	0,5	0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7
1898	-0,8	-1,4	0,9	0,5	0,1	-0,1	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,6
1899	-1,4	0,9	0,5	0,1	-0,1	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,6	-0,4
1900	1,0	0,6	0,2	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,6	-0,4	-0,3
1901	0,6	0,2	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,6	-0,4	-0,3	
1902	0,2	-0,1	-0,3	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,6	-0,4	-0,3		
1903	-0,1	-0,3	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3			
1904	-0,3	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3				
1905	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3					
1906	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3						
1907	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3							
1908	-0,7	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3								
1909	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2									
1910	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2										
1911	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2											
1912	-0,6	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2												
1913	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2													
1914	-0,5	-0,3	-0,2														
1915	-0,3	-0,2															
1916	-0,2																

Anhang 57: **ID 15:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 118,2 ±0,74 pMC; gestorben im 85. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1992.)

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1873																	1,1
1874																1,1	1,0
1875															1,1	1,0	0,6
1876														1,1	1,0	0,6	0,9
1877													1,1	1,0	0,6	0,9	1,1
1878												1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1
1879											1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4
1880										1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7
1881									1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3
1882								1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2
1883							1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,8
1884						1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,8	1,2
1885					1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,8	1,2	0,7
1886				1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,8	1,2	0,7	0,1
1887			1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,8	1,2	0,7	0,1	0,2
1888		1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,8	1,2	0,7	0,1	0,2	0,5
1889	1,1	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,8	1,2	0,7	0,1	0,2	0,5	0,8
1890	1,0	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,8	1,2	0,7	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0
1891	0,6	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,8	1,2	0,7	0,1	0,2	0,5	0,8	1,0	1,1
1892	0,9	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,9	1,2	0,7	0,2	0,2	0,5	0,8	1,0	1,1	1,1
1893	1,1	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,9	1,2	0,7	0,2	0,2	0,5	0,8	0,9	1,1	1,1	1,2
1894	0,1	1,4	0,7	0,3	1,2	1,9	1,2	0,7	0,2	0,2	0,5	0,8	0,9	1,1	1,1	1,2	1,1
1895	1,4	0,7	0,3	1,2	1,9	1,2	0,7	0,2	0,2	0,5	0,8	0,9	1,1	1,1	1,2	1,1	1,1
1896	0,7	0,3	1,2	1,9	1,3	0,7	0,2	0,2	0,5	0,8	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0
1897	0,3	1,1	1,9	1,3	0,7	0,2	0,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9
1898	1,1	1,9	1,3	0,7	0,2	0,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8
1899	1,9	1,3	0,7	0,2	0,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6
1900	1,3	0,7	0,2	0,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,4
1901	0,8	0,2	0,2	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,4	
1902	0,2	0,1	0,4	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4		
1903	0,1	0,4	0,7	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4			
1904	0,4	0,7	0,8	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4				
1905	0,7	0,8	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4					
1906	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	0,4						
1907	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	0,4							
1908	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3								
1909	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3									
1910	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3										
1911	0,9	0,9	0,8	0,6	0,5	0,3											
1912	0,9	0,8	0,6	0,5	0,3												
1913	0,7	0,6	0,5	0,3													
1914	0,6	0,4	0,3														
1915	0,4	0,3															
1916	0,3																

Anhang 57: **ID 15:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 118,2 ±0,74 pMC; gestorben im 85. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1992.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1873																	6,0
1874																6,0	5,5
1875															6,0	5,5	4,5
1876														6,0	5,5	4,5	4,0
1877													6,0	5,5	4,5	4,0	4,0
1878												6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5
1879											6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5
1880										6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0
1881									6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0
1882								6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0
1883							6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5
1884						6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5
1885					6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
1886				6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5
1887			6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1888		6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1889	6,0	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1890	5,5	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1891	4,5	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1892	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1893	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1894	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1895	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1896	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1897	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1898	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1899	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1900	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
1901	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
1902	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5		
1903	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5			
1904	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5				
1905	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5					
1906	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5						
1907	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5							
1908	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5								
1909	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5									
1910	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5										
1911	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5											
1912	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5												
1913	2,5	2,5	2,5	2,5													
1914	2,5	2,5	2,5														
1915	2,5	2,5															
1916	2,5																

Anhang 58: **ID 16:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 112,3 ±0,89 pMC; gestorben im 85. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1992.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1871																	3,0
1872																3,0	-0,3
1873															3,0	-0,3	0,6
1874														3,0	-0,3	0,6	0,0
1875													3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2
1876												3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1
1877											3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0
1878										3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0
1879									3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7
1880								3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0
1881							3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,6
1882						3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,0	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,6	-1,1
1883					3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,6	-1,1	-1,6
1884				3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,6	-1,1	-1,6	1,3
1885			3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,6	-1,1	-1,6	1,3	1,0
1886		3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,5	-1,1	-1,6	1,3	1,0	0,6
1887	3,0	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,5	-1,1	-1,6	1,3	1,0	0,6	0,4
1888	-0,3	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,5	-1,1	-1,6	1,3	1,0	0,6	0,4	0,1
1889	0,6	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,5	-1,1	-1,6	1,3	1,0	0,6	0,4	0,1	-0,1
1890	0,0	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,7	0,0	-0,5	-1,1	-1,6	1,3	1,0	0,6	0,4	0,1	-0,1	-0,2
1891	0,2	1,1	-0,0	-1,0	0,8	0,1	-0,5	-1,1	-1,6	1,3	1,0	0,6	0,4	0,1	-0,1	-0,2	-0,4
1892	1,1	-0,0	-1,0	0,8	0,1	-0,5	-1,1	-1,5	1,3	1,0	0,6	0,4	0,1	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5
1893	-0,0	-1,0	0,8	0,1	-0,5	-1,1	-1,5	1,3	1,0	0,6	0,4	0,2	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6
1894	-1,0	0,8	0,1	-0,5	-1,1	-1,5	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	-0,0	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7
1895	0,8	0,1	-0,5	-1,1	-1,5	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	-0,0	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8
1896	0,1	-0,5	-1,1	-1,5	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	-0,0	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8
1897	-0,5	-1,1	-1,5	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2	-0,0	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8
1898	-1,0	-1,5	1,4	1,0	0,7	0,4	0,2	-0,0	-0,2	-0,3	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,9
1899	-1,5	1,4	1,0	0,7	0,4	0,2	0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,6	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9
1900	1,4	1,1	0,7	0,5	0,2	0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
1901	1,1	0,7	0,5	0,2	0,0	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	
1902	0,8	0,5	0,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8		
1903	0,5	0,3	0,1	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8			
1904	0,3	0,1	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8				
1905	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8					
1906	-0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8						
1907	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7							
1908	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7								
1909	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7									
1910	-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7										
1911	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7											
1912	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6												
1913	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6													
1914	-0,6	-0,6	-0,6														
1915	-0,6	-0,6															
1916	-0,6																

Anhang 58: **ID 16:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).

(^{14}C: 112,3 ±0,89 pMC; gestorben im 85. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1992.)

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1871																	3,4
1872																3,4	0,3
1873															3,4	0,3	0,7
1874														3,4	0,3	0,7	0,0
1875													3,4	0,3	0,7	0,0	0,2
1876												3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2
1877											3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0
1878										3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2
1879									3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8
1880								3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,0
1881							3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,0	0,6
1882						3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,0	0,6	1,2
1883					3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,0	0,6	1,2	1,8
1884				3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,0	0,6	1,2	1,8	1,4
1885			3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,0	0,6	1,2	1,8	1,4	1,1
1886		3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,1	0,6	1,2	1,8	1,5	1,1	0,7
1887	3,4	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,1	0,6	1,2	1,8	1,5	1,1	0,7	0,4
1888	0,3	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,1	0,6	1,2	1,7	1,5	1,1	0,7	0,4	0,1
1889	0,7	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,1	0,6	1,2	1,8	1,5	1,1	0,7	0,4	0,1	0,1
1890	0,0	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,1	0,6	1,2	1,7	1,5	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,3
1891	0,2	1,2	0,0	1,2	0,8	0,1	0,6	1,2	1,7	1,5	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,3	0,4
1892	1,2	0,0	1,2	0,9	0,1	0,6	1,2	1,7	1,5	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,3	0,4	0,6
1893	0,0	1,1	0,9	0,1	0,6	1,2	1,7	1,5	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7
1894	1,1	0,9	0,1	0,6	1,2	1,7	1,5	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8
1895	0,9	0,1	0,6	1,2	1,7	1,5	1,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9
1896	0,1	0,6	1,2	1,7	1,5	1,1	0,7	0,4	0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	0,9
1897	0,6	1,2	1,7	1,5	1,1	0,8	0,5	0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0
1898	1,2	1,7	1,5	1,2	0,8	0,5	0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0
1899	1,7	1,6	1,2	0,8	0,5	0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
1900	1,6	1,2	0,8	0,5	0,3	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
1901	1,2	0,8	0,5	0,3	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	
1902	0,9	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9		
1903	0,6	0,3	0,1	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9			
1904	0,3	0,1	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9				
1905	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9					
1906	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8						
1907	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8							
1908	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8								
1909	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8									
1910	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8										
1911	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7											
1912	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7												
1913	0,6	0,7	0,7	0,7													
1914	0,7	0,7	0,7														
1915	0,7	0,7															
1916	0,7																

Anhang 58: **ID 16:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 112,3 ±0,89 pMC; gestorben im 85. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1992.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem unf berechneten ^{14}C-Wertrn vorlag.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1871																	6,0
1872																6,0	5,5
1873															6,0	5,5	4,0
1874														6,0	5,5	4,0	3,5
1875													6,0	5,5	4,0	3,5	3,0
1876												6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5
1877											6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5
1878										6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5
1879									6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0
1880								6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0
1881							6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
1882						6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0
1883					6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
1884				6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5
1885			6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5
1886		6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5
1887	6,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5
1888	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1889	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1890	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1891	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1892	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1893	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1894	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1895	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1896	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1897	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1898	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1899	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1900	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
1901	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
1902	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
1903	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5			
1904	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5				
1905	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5					
1906	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5						
1907	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5							
1908	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5								
1909	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5									
1910	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5										
1911	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5											
1912	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5												
1913	1,5	1,5	1,5	1,5													
1914	1,5	1,5	1,5														
1915	1,5	1,5															
1916	1,5																

Anhang 59: **ID 17:** Simulierte Liegezeitbestimmung.
(^{14}C: 123,7 ±0,84 pMC; gestorben im 85. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1992.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1874																	3,2
1875																3,2	0,6
1876															3,2	0,6	0,4
1877														3,2	0,6	0,4	0,6
1878													3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9
1879												3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1
1880											3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1
1881										3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3
1882									3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3
1883								3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,9
1884							3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,9	1,0
1885						3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,9	1,0	0,7
1886					3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,9	1,0	0,7	0,3
1887				3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,9	1,0	0,7	0,3	0,1
1888			3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,9	1,0	0,7	0,3	0,1	-0,0
1889		3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,9	1,0	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1
1890	3,2	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,9	1,0	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1
1891	0,6	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,9	1,0	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1
1892	0,4	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,8	1,1	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0
1893	0,6	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,8	1,1	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,2
1894	-0,9	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,8	1,1	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,3
1895	-0,1	1,1	0,3	-0,3	-0,8	1,1	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,5
1896	-1,1	0,3	-0,3	-0,8	1,1	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	-0,7
1897	0,3	-0,3	-0,8	1,1	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	-0,7	-0,4
1898	-0,3	-0,8	1,1	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	-0,7	-0,4	0,0
1899	-0,8	1,1	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	-0,7	-0,4	0,0	0,4
1900	1,1	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	-0,7	-0,4	0,0	0,4	0,0
1901	0,7	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	-0,7	-0,4	0,0	0,4	0,0	
1902	0,3	0,1	-0,0	-0,1	-0,1	-0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	-0,7	-0,3	0,0	0,4	0,0		
1903	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	-0,7	-0,3	0,0	0,4	0,0			
1904	0,0	-0,1	-0,1	-0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	-0,7	-0,3	0,0	0,4	0,0				
1905	-0,1	-0,1	-0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	-0,7	-0,3	0,0	0,4	0,0					
1906	-0,1	-0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	-0,7	-0,3	0,0	0,4	0,0						
1907	-0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	-0,7	-0,3	0,0	0,4	0,0							
1908	0,1	0,2	0,4	0,6	-0,7	-0,3	0,0	0,4	0,0								
1909	0,2	0,4	0,6	-0,7	-0,3	0,0	0,4	0,1									
1910	0,4	0,6	-0,7	-0,3	0,0	-0,4	0,1										
1911	0,6	-0,7	-0,3	0,0	-0,4	0,1											
1912	-0,7	-0,3	0,0	-0,4	0,1												
1913	-0,3	0,0	-0,4	0,1													
1914	0,1	-0,4	0,1														
1915	-0,4	0,1															
1916	0,1																

Anhang 59: **ID 17:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 123,7 ±0,84 pMC; gestorben im 85. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1992.)

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1874																	3,8
1875																3,8	0,8
1876															3,8	0,8	0,5
1877														3,8	0,8	0,5	0,7
1878													3,8	0,8	0,5	0,7	1,1
1879												3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1
1880											3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3
1881										3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4
1882									3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4
1883								3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0
1884							3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,2
1885						3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,2	0,8
1886					3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,2	0,8	0,4
1887				3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,2	0,8	0,4	0,1
1888			3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,2	0,8	0,4	0,1	0,0
1889		3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,2	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1
1890	3,8	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,2	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1
1891	0,8	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,2	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
1892	0,5	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,3	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
1893	0,7	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,3	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2
1894	1,1	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,3	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,4
1895	0,1	1,3	0,4	0,4	1,0	1,3	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,4	0,6
1896	1,3	0,4	0,4	1,0	1,3	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
1897	0,4	0,4	1,0	1,3	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4
1898	0,4	1,0	1,3	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0
1899	1,0	1,3	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5
1900	1,3	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5	0,0
1901	0,8	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5	0,0	
1902	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5	0,0		
1903	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1			
1904	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1				
1905	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1					
1906	0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1						
1907	0,0	0,1	0,2	0,4	0,7	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1							
1908	0,1	0,2	0,4	0,7	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1								
1909	0,3	0,5	0,7	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1									
1910	0,5	0,7	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1										
1911	0,7	0,8	0,4	0,0	0,5	0,1											
1912	0,8	0,4	0,1	0,5	0,1												
1913	0,4	0,1	0,5	0,1													
1914	0,1	0,5	0,1														
1915	0,5	0,1															
1916	0,1																

Anhang 59: **ID 17:** Simulierte Liegezeitbestimmung (Fortsetzung).
(^{14}C: 123,7 ±0,84 pMC; gestorben im 85. Lj. ± 8 Jahre, im Jahr 1992.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1874																	6,0
1875																6,0	6,0
1876															6,0	6,0	5,5
1877														6,0	6,0	5,5	5,0
1878													6,0	6,0	5,5	5,0	5,0
1879												6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5
1880											6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0
1881										6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0
1882									6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0
1883								6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0
1884							6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5
1885						6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5
1886					6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5
1887				6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5
1888			6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1889		6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1890	6,0	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1891	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1892	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1893	5,0	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1894	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1895	4,5	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1896	4,5	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0
1897	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0
1898	4,0	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0
1899	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0
1900	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5
1901	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	
1902	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5		
1903	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5			
1904	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5				
1905	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5					
1906	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5						
1907	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5							
1908	3,5	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5								
1909	3,5	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5									
1910	3,5	3,5	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5										
1911	3,5	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5											
1912	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5												
1913	4,0	4,0	4,5	4,5													
1914	4,0	4,5	4,5														
1915	4,5	4,5															
1916	4,5																

Anhang 60: Simulierte Liegezeitbestimmung (nach UBELAKER 2001).
(^{14}C: 98,4 ±0,4 pMC; gestorben zwischen dem 16. bis 21. Lj., 1985 aufgefunden.)

a) Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1915	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1916	-0,1	-0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
1917	0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1918	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1919	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
1920	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
1921	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
1922	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
1923	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
1924	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1925	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
1926	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,0
1927	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,0	0,0
1928	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0
1929	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	-0,0	0,1	0,0	-0,2
1930	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,0	-0,0	0,1	-0,1	-0,4
1931	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,4	-0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,3	-0,7
1932	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,3	-0,7	-1,4
1933	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,7	-1,4	
1934	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	0,4	0,0	0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,7	-1,4		
1935	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,6	0,3	0,0	-0,0	0,1	-0,1	-0,4	-0,8	-1,5			
1936	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,4	-0,6	-1,0					
1937	0,8	0,8	0,8	0,5	-0,0	-0,2	-0,3	-0,6	-0,8	-1,1	-1,5						
1938	0,8	0,8	0,5	0,0	-0,4	-1,0	-1,3	-1,5									
1939	0,9	0,5	-0,0	-0,5	-1,5												
1940	0,5	0,0	-0,5														
1941	0,0	-0,5															
1942	-0,6																

Schwarzer Halbrahmen: Sterbejahr 1950
Roter Halbrahmen: Es werden 14C-Werte ≤ 100 pMC berechnet

Anhang 60: Simulierte Liegezeitbestimmung (nach UBELAKER 2001; Fortsetzung).
(^{14}C: 98,4 ±0,4 pMC; gestorben zwischen dem 16. bis 21. Lj., 1985 aufgefunden.)

b) Umrechnung der absoluten Differenzen zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten in Standardabweichungen.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1915	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
1916	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
1917	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
1918	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
1919	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
1920	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6
1921	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
1922	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
1923	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
1924	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
1925	0,6	0,6	0,7	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,7
1926	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,7	0,0
1927	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	0,7	0,0	0,0
1928	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	0,7	0,1	0,1	0,0
1929	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4	0,8	0,0	0,1	0,1	0,5
1930	1,2	1,2	1,3	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,5	0,9	0,0	0,1	0,2	0,4	1,0
1931	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	0,9	0,1	0,0	0,3	0,3	0,9	1,8
1932	1,4	1,4	1,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,8	1,7	3,5
1933	1,4	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,7	1,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,8	1,7	3,5	
1934	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	1,9	1,8	1,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,8	1,7	3,5		
1935	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0	1,6	0,8	0,0	0,0	0,3	0,3	1,0	1,9	3,8			
1936	1,9	2,0	2,0	2,0	1,4	0,2	0,1	0,0	0,3	1,0	1,6	2,6					
1937	2,0	2,0	2,0	1,4	0,0	0,4	0,7	1,4	2,0	2,7	3,6						
1938	2,1	2,1	1,4	0,0	1,1	2,6	3,3	3,9									
1939	2,2	1,4	0,0	1,1	3,8												
1940	1,4	0,0	1,2														
1941	0,0	1,4															
1942	1,5																

Anhang 60: Simulierte Liegezeitbestimmung (nach UBELAKER 2001; Fortsetzung).
(^{14}C: 98,4 ±0,4 pMC; gestorben zwischen dem 16. bis 21. Lj., 1985 aufgefunden.)

c) Austauschrate zwischen 1 und 6 %, bei der die kleinste Differenz zwischen gemessenem und berechneten ^{14}C-Werten vorlag.

Geburts-	Lebensjahr																
Jahr	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1915	6,0	6,0	5,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1916	6,0	3,5	2,0	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1917	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1918	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1919	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1920	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1921	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1922	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1923	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1924	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1925	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0
1926	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	4,5
1927	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	4,5	2,0
1928	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	4,5	2,0	1,0
1929	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	5,0	2,0	1,0	1,0
1930	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	5,0	2,5	1,0	1,0	1,0
1931	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	5,5	2,5	1,5	1,0	1,0	1,0
1932	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	5,5	2,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
1933	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	5,5	2,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	
1934	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	5,5	2,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0		
1935	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	5,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
1936	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	6,0	3,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0					
1937	1,0	1,0	1,0	6,0	5,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0						
1938	1,0	1,0	6,0	4,5	1,0	1,0	1,0	1,0									
1939	1,0	6,0	4,5	1,0	1,0												
1940	6,0	4,0	1,0														
1941	3,5	1,0															
1942	1,0																

Anhang 61: Berechnung der Differenzen aus gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert unter Verwendung von 24 Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1,0 und 66,0 % für 74 Messwerte (66 Individuen) vom 10. bis 89. Lj. (nach Lebensjahren aufsteigend sortiert).

								Differenzen = $^{14}C_{gemessen}$ - $^{14}C_{berechnet}$; unter Verwendung verschiedener Austauschraten $1/t_C$ [%]																								
ID	G	Gj	Sj	^{14}C	s	± 4s	Lj	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	12,5	15,0	20,0	25,0	40,0	50,0	66,0
99	f	1975	1985	126,7	1,5	6,0	10	-1,8	-1,7	-1,5	-1,4	-1,3	-1,1	-1,0	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,9	1,3	2,1	2,7	4,0	4,5	5,1
97	m	1972	1990	118,6	1,1	4,4	18	-6,5	-6,2	-5,9	-5,6	-5,3	-5,1	-4,8	-4,6	-4,3	-4,1	-3,9	-3,7	-3,5	-3,3	-3,1	-2,8	-2,4	-1,7	-1,2	-0,3	0,3	1,4	1,8	2,2
98	m	1973	1991	120,7	0,8	3,2	19	-2,0	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,6	-0,3	-0,1	0,1	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,6	1,9	2,6	3,1	4,0	4,6	5,6	6,0	6,4
79	m	1948	1967	131,6	0,9	3,6	20	-2,5	-3,7	-4,8	-5,9	-6,9	-8,0	-9,0	-9,9	-10,8	-11,7	-12,6	-13,5	-14,3	-15,1	-15,8	-17,3	-18,7	-21,7	-24,3	-28,2	-31,0	-34,5	-34,6	-33,5
87	m	1960	1980	143,4	1,0	4,0	20	-1,2	-0,9	-0,6	-0,3	0,0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,9	3,4	3,9	5,0	6,0	7,6	8,8	11,0	11,8	12,6
94	m	1971	1990	120,7	0,9	3,6	20	-4,2	-3,8	-3,4	-3,1	-2,8	-2,5	-2,2	-1,9	-1,6	-1,3	-1,1	-0,9	-0,6	-0,4	-0,2	0,2	0,5	1,3	1,9	2,8	3,4	4,5	4,9	5,3
95	m	1971	1990	123,1	1,0	4,0	20	-1,8	-1,4	-1,0	-0,7	-0,4	-0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,6	2,9	3,7	4,3	5,2	5,8	6,9	7,3	7,7
96	m	1971	1990	125,0	0,9	3,6	20	0,1	0,5	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,1	4,5	4,8	5,6	6,2	7,1	7,7	8,8	9,2	9,6
100	f	1947	1967	129,3	0,4	1,7	21	0,7	-0,7	-2,0	-3,3	-4,5	-5,7	-6,9	-8,0	-9,1	-10,2	-11,2	-12,2	-13,1	-14,0	-14,9	-16,6	-18,2	-21,8	-24,8	-29,4	-32,5	-36,7	-37,0	-35,9
93	m	1969	1989	124,0	0,8	3,2	21	-3,6	-3,1	-2,6	-2,2	-1,8	-1,5	-1,1	-0,7	-0,4	-0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	1,2	1,7	2,1	3,0	3,7	4,8	5,5	6,7	7,2	7,6
92	m	1967	1990	124,2	0,9	3,6	24	-6,5	-5,7	-5,1	-4,4	-3,8	-3,2	-2,7	-2,2	-1,7	-1,2	-0,8	-0,4	0,0	0,3	0,7	1,3	1,9	3,1	4,1	5,4	6,4	7,8	8,3	8,8
65	m	1937	1961	105,5	0,8	3,2	25	6,0	5,6	5,1	4,7	4,3	3,8	3,4	3,0	2,6	2,2	1,8	1,4	1,0	0,6	0,3	-0,4	-1,1	-2,7	-4,2	-6,8	-8,9	-13,1	-14,7	-16,0
78	m	1948	1972	134,3	1,3	5,2	25	-1,6	-3,0	-4,3	-5,6	-6,8	-7,9	-8,9	-9,8	-10,7	-11,5	-12,3	-13,0	-13,6	-14,2	-14,8	-15,8	-16,6	-18,1	-19,0	-19,5	-19,1	-16,6	-15,3	-13,8
80	m	1951	1976	140,0	2,4	9,6	25	-2,2	-3,1	-3,8	-4,5	-5,2	-5,7	-6,2	-6,6	-7,0	-7,3	-7,6	-7,9	-8,1	-8,2	-8,3	-8,5	-8,6	-8,4	-7,9	-6,5	-4,9	-1,3	0,2	1,6
90	f	1966	1990	125,5	1,0	4,0	25	-8,8	-7,8	-6,9	-6,0	-5,2	-4,4	-3,7	-3,0	-2,4	-1,8	-1,2	-0,7	-0,2	0,3	0,7	1,5	2,3	3,8	4,9	6,5	7,5	9,1	9,6	10,1
91	m	1966	1990	122,7	1,0	4,0	25	-9,8	-9,0	-8,2	-7,4	-6,7	-6,0	-5,4	-4,8	-4,2	-3,7	-3,2	-2,8	-2,3	-1,9	-1,5	-0,8	-0,1	1,2	2,3	3,8	4,8	6,3	6,8	7,3
88	m	1963	1990	131,5	0,9	3,6	27	-7,3	-6,1	-4,9	-3,9	-2,9	-1,9	-1,0	-0,2	0,5	1,3	1,9	2,6	3,2	3,7	4,3	5,2	6,1	7,9	9,2	11,1	12,3	14,0	14,6	15,1
89	m	1963	1992	128,4	0,8	3,2	30	-9,6	-8,1	-6,7	-5,4	-4,2	-3,0	-2,0	-1,0	-0,1	0,7	1,5	2,2	2,9	3,5	4,1	5,2	6,1	8,0	9,3	11,2	12,3	13,8	14,3	14,7
27	f	1937	1967	117,3	0,6	2,4	31	14,0	11,7	9,4	7,3	5,2	3,2	1,2	-0,7	-2,5	-4,2	-6,0	-7,6	-9,2	-10,7	-12,2	-15,0	-17,7	-23,5	-28,4	-35,9	-41,0	-48,0	-48,9	-48,1
49	m	1965	1995	141,1	1,2	4,8	31	7,7	9,1	10,5	11,7	12,9	13,9	14,9	15,8	16,6	17,4	18,1	18,7	19,4	19,9	20,5	21,4	22,2	23,9	25,1	26,6	27,5	28,8	29,2	29,5
63	m	1935	1966	114,2	0,7	2,8	32	12,0	9,9	7,9	6,0	4,1	2,2	0,4	-1,3	-3,0	-4,7	-6,3	-7,8	-9,3	-10,8	-12,2	-14,9	-17,5	-23,4	-28,4	-36,6	-42,7	-53,0	-55,9	-57,0
85	m	1958	1991	143,6	1,2	4,8	34	1,3	2,8	4,2	5,6	6,9	8,1	9,3	10,4	11,4	12,4	13,3	14,1	15,0	15,7	16,4	17,7	18,9	21,2	22,9	25,1	26,4	28,2	28,7	29,2
86	m	1958	1991	142,4	0,8	3,2	34	0,1	1,6	3,0	4,4	5,7	6,9	8,1	9,2	10,2	11,2	12,1	12,9	13,8	14,5	15,2	16,5	17,7	20,0	21,7	23,9	25,2	27,0	27,5	28,0
76	m	1947	1981	142,8	1,2	4,8	35	9,7	8,3	7,1	6,1	5,2	4,5	4,0	3,6	3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	3,2	3,5	4,8	6,2	8,8	10,8	14,0	15,0	16,0
84	m	1956	1991	136,0	0,9	3,6	36	-6,6	-5,2	-3,8	-2,5	-1,2	0,0	1,1	2,2	3,2	4,2	5,2	6,0	6,9	7,6	8,4	9,7	10,9	13,4	15,2	17,5	18,8	20,6	21,1	21,6
82	m	1954	1990	138,1	0,8	3,2	37	-4,2	-3,2	-2,1	-1,0	0,0	1,1	2,1	3,1	4,0	4,9	5,8	6,7	7,5	8,2	9,0	10,3	11,5	14,0	15,9	18,3	19,8	21,6	22,2	22,7
83	m	1955	1991	151,0	1,0	4,0	37	8,6	9,9	11,2	12,4	13,6	14,8	15,9	17,0	18,0	19,0	19,9	20,8	21,7	22,5	23,2	24,6	25,8	28,3	30,1	32,4	33,8	35,6	36,1	36,6
50	f	1932	1969	125,7	0,7	2,8	38	22,0	19,2	16,5	14,0	11,5	9,2	7,0	4,8	2,8	0,9	-1,0	-2,7	-4,4	-6,0	-7,5	-10,4	-12,9	-18,4	-22,6	-28,2	-31,3	-33,1	-32,2	-30,4
81	m	1952	1992	143,8	0,9	3,6	41	3,5	4,5	5,5	6,6	7,7	8,7	9,8	10,8	11,8	12,7	13,7	14,5	15,4	16,2	16,9	18,3	19,6	22,1	23,9	26,2	27,5	29,2	29,7	30,1
72	m	1939	1981	120,8	0,8	3,2	42	10,9	7,2	3,8	0,9	-1,7	-4,0	-6,1	-7,8	-9,4	-10,7	-11,9	-12,9	-13,7	-14,4	-15,0	-15,9	-16,5	-17,0	-16,6	-14,9	-13,1	-9,9	-8,7	-7,6

Anhang 61: Berechnung der Differenzen aus gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert unter Verwendung von 24 Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1,0 und 66,0 % für 74 Messwerte (66 Individuen) vom 10. bis 89. Lj. (nach Lebensjahren aufsteigend sortiert) (Fortsetzung).

								Differenzen = $^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}$; unter Verwendung verschiedener Austauschraten $1/t_C$ [%]																									
ID	G	Gj	Sj	^{14}C	s	± 4s	Lj	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	12,5	15,0	20,0	25,0	40,0	50,0	66,0
77	m	1947	1988	147,9	1,1	4,4	42	15,7	14,8	14,2	13,9	13,7	13,7	13,8	14,0	14,3	14,6	15,0	15,4	15,9	16,4	16,9	17,9	18,8	21,1	23,0	25,6	27,2	29,3	29,9	30,4
62	m	1934	1977	136,5	1,4	5,6	43	30,1	26,3	22,8	19,7	16,8	14,2	11,8	9,6	7,6	5,8	4,2	2,8	1,5	0,3	-0,8	-2,5	-3,9	-6,2	-7,1	-7,0	-5,9	-2,4	-1,0	0,2
74	f	1944	1989	125,1	1,0	4,0	46	4,5	2,2	0,3	-1,1	-2,2	-3,1	-3,6	-4,0	-4,2	-4,3	-4,2	-4,1	-3,9	-3,7	-3,4	-2,7	-1,9	0,0	1,6	4,1	5,6	7,6	8,1	8,7
59	m	1928	1974	112,7	1,2	4,8	47	6,8	3,2	-0,1	-3,2	-6,0	-8,7	-11,1	-13,4	-15,4	-17,3	-19,1	-20,7	-22,2	-23,6	-24,8	-27,0	-28,8	-32,0	-33,9	-35,1	-34,7	-31,7	-30,2	-28,7
67	m	1938	1985	118,9	1,2	4,8	47	9,6	5,6	2,3	-0,6	-3,1	-5,2	-6,9	-8,4	-9,6	-10,6	-11,4	-12,1	-12,6	-12,9	-13,2	-13,5	-13,5	-12,7	-11,6	-9,2	-7,4	-4,5	-3,6	-2,8
73	m	1940	1986	114,6	0,8	3,2	47	2,7	-0,9	-3,9	-6,4	-8,5	-10,3	-11,7	-12,8	-13,7	-14,4	-15,0	-15,3	-15,6	-15,7	-15,8	-15,7	-15,4	-14,2	-12,8	-10,3	-8,6	-6,1	-5,3	-4,7
75	f	1945	1991	122,3	0,7	2,8	47	-1,4	-3,1	-4,4	-5,4	-6,0	-6,4	-6,6	-6,6	-6,5	-6,3	-6,0	-5,6	-5,2	-4,8	-4,3	-3,4	-2,5	-0,4	1,4	3,7	5,1	6,9	7,4	7,9
60	f	1930	1978	110,9	1,2	4,8	49	3,9	0,0	-3,6	-6,8	-9,7	-12,2	-14,5	-16,6	-18,4	-20,1	-21,5	-22,8	-23,9	-24,9	-25,8	-27,2	-28,2	-29,6	-29,9	-29,0	-27,6	-24,5	-23,6	-22,9
66	m	1937	1985	111,4	1,2	4,8	49	2,6	-1,4	-4,8	-7,7	-10,2	-12,2	-14,0	-15,4	-16,5	-17,4	-18,2	-18,7	-19,2	-19,5	-19,7	-19,8	-19,7	-18,8	-17,5	-15,1	-13,3	-10,7	-9,9	-9,2
68	m	1938	1987	113,6	0,7	2,8	50	4,0	0,1	-3,2	-5,9	-8,1	-10,0	-11,5	-12,6	-13,6	-14,3	-14,8	-15,2	-15,4	-15,5	-15,6	-15,4	-15,1	-13,8	-12,4	-10,0	-8,4	-6,1	-5,5	-5,0
64	m	1935	1985	126,3	0,9	3,6	51	18,1	14,0	10,5	7,5	5,0	2,9	1,2	-0,3	-1,4	-2,4	-3,1	-3,7	-4,2	-4,5	-4,7	-4,8	-4,7	-3,9	-2,6	-0,2	1,6	4,2	5,0	5,7
71	m	1939	1989	115,2	1,1	4,4	51	4,4	0,7	-2,3	-4,8	-6,8	-8,3	-9,6	-10,5	-11,2	-11,7	-12,0	-12,2	-12,2	-12,2	-12,1	-11,7	-11,2	-9,7	-8,1	-5,8	-4,3	-2,3	-1,8	-1,2
69	m	1938	1991	109,0	0,8	3,2	54	-0,8	-4,6	-7,7	-10,1	-12,0	-13,5	-14,6	-15,4	-16,0	-16,3	-16,5	-16,6	-16,6	-16,4	-16,2	-15,7	-15,1	-13,4	-11,8	-9,6	-8,2	-6,4	-5,9	-5,4
58	m	1924	1979	111,2	1,2	4,8	55	4,0	0,1	-3,4	-6,6	-9,4	-12,0	-14,3	-16,3	-18,2	-19,8	-21,2	-22,5	-23,6	-24,6	-25,5	-26,9	-27,9	-29,3	-29,6	-28,7	-27,3	-24,2	-23,3	-22,6
70	m	1938	1992	125,9	0,9	3,6	55	16,0	12,3	9,3	7,0	5,1	3,7	2,7	2,0	1,5	1,2	1,1	1,1	1,2	1,4	1,6	2,2	2,9	4,6	6,2	8,4	9,6	11,3	11,8	12,2
37	m	1912	1968	107,5	0,7	2,8	57	3,7	1,2	-1,2	-3,5	-5,7	-7,9	-10,0	-12,0	-13,9	-15,7	-17,5	-19,2	-20,9	-22,4	-23,9	-26,8	-29,4	-35,1	-39,7	-46,3	-50,3	-54,2	-53,8	-52,0
38	m	1912	1968	119,1	1,0	4,0	57	15,3	12,8	10,4	8,1	5,9	3,7	1,6	-0,4	-2,3	-4,1	-5,9	-7,6	-9,3	-10,8	-12,3	-15,2	-17,8	-23,5	-28,1	-34,7	-38,7	-42,6	-42,2	-40,4
39	m	1912	1968	111,7	1,3	5,2	57	7,9	5,4	3,0	0,7	-1,5	-3,7	-5,8	-7,8	-9,7	-11,5	-13,3	-15,0	-16,7	-18,2	-19,7	-22,6	-25,2	-30,9	-35,5	-42,1	-46,1	-50,0	-49,6	-47,8
40	m	1912	1968	114,5	0,9	3,6	57	10,7	8,2	5,8	3,5	1,3	-0,9	-3,0	-5,0	-6,9	-8,7	-10,5	-12,2	-13,9	-15,4	-16,9	-19,8	-22,4	-28,1	-32,7	-39,3	-43,3	-47,2	-46,8	-45,0
41	f	1911	1968	116,6	0,8	3,2	58	12,7	10,3	7,9	5,6	3,3	1,2	-0,9	-2,9	-4,8	-6,6	-8,4	-10,1	-11,8	-13,3	-14,8	-17,7	-20,3	-26,0	-30,6	-37,2	-41,2	-45,1	-44,7	-42,9
42	f	1911	1968	114,1	0,8	3,2	58	10,2	7,8	5,4	3,1	0,8	-1,3	-3,4	-5,4	-7,3	-9,1	-10,9	-12,6	-14,3	-15,8	-17,3	-20,2	-22,8	-28,5	-33,1	-39,7	-43,7	-47,6	-47,2	-45,4
1	f	1869	1928	99,2	1,3	5,2	60	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8
61	m	1932	1991	113,0	0,7	2,8	60	4,4	0,4	-2,8	-5,4	-7,4	-9,0	-10,2	-11,0	-11,7	-12,1	-12,3	-12,4	-12,4	-12,3	-12,1	-11,6	-11,0	-9,4	-7,8	-5,6	-4,2	-2,4	-1,9	-1,4
28	m	1906	1967	111,8	0,5	2,0	62	8,3	6,1	4,0	1,9	-0,2	-2,2	-4,1	-6,0	-7,8	-9,5	-11,2	-12,9	-14,5	-16,0	-17,5	-20,3	-23,0	-28,8	-33,8	-41,3	-46,5	-53,5	-54,4	-53,6
29	m	1902	1967	106,6	0,4	1,6	66	3,0	0,8	-1,3	-3,4	-5,4	-7,4	-9,3	-11,2	-13,0	-14,7	-16,4	-18,1	-19,7	-21,2	-22,7	-25,5	-28,2	-34,0	-39,0	-46,5	-51,7	-58,7	-59,6	-58,8
30	f	1902	1967	115,3	0,6	2,4	66	11,7	9,5	7,4	5,3	3,3	1,3	-0,6	-2,5	-4,3	-6,0	-7,7	-9,4	-11,0	-12,5	-14,0	-16,8	-19,5	-25,3	-30,3	-37,8	-43,0	-50,0	-50,9	-50,1
31	f	1902	1967	118,4	0,6	2,4	66	14,8	12,6	10,5	8,4	6,4	4,4	2,5	0,6	-1,2	-2,9	-4,6	-6,3	-7,9	-9,4	-10,9	-13,7	-16,4	-22,2	-27,2	-34,7	-39,9	-46,9	-47,8	-47,0
32	m	1898	1967	110,7	0,4	1,6	70	7,0	4,8	2,7	0,7	-1,4	-3,3	-5,2	-7,1	-8,9	-10,6	-12,3	-14,0	-15,6	-17,1	-18,6	-21,4	-24,1	-29,9	-34,9	-42,4	-47,6	-54,6	-55,5	-54,7

Anhang 61: Berechnung der Differenzen aus gemessenem und berechnetem ^{14}C-Wert unter Verwendung von 24 Austauschraten $1/t_C$ zwischen 1,0 und 66,0 % für 74 Messwerte (66 Individuen) vom 10. bis 89. Lj. (nach Lebensjahren aufsteigend sortiert) (Fortsetzung).

								Differenzen = $^{14}C_{gemessen}$ - $^{14}C_{berechnet}$; unter Verwendung verschiedener Austauschraten $1/t_C$ [%]																								
ID	G	Gj	Sj	^{14}C	s	± 4s	Lj	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	12,5	15,0	20,0	25,0	40,0	50,0	66,0
33	f	1897	1967	114,2	0,6	2,4	71	10,4	8,3	6,2	4,1	2,1	0,2	-1,7	-3,6	-5,4	-7,1	-8,8	-10,5	-12,1	-13,6	-15,1	-17,9	-20,6	-26,4	-31,4	-38,9	-44,1	-51,1	-52,0	-51,2
51	m	1899	1971	110,4	2,7	10,8	73	4,8	1,8	-1,1	-3,8	-6,4	-8,8	-11,2	-13,4	-15,4	-17,4	-19,3	-21,0	-22,7	-24,2	-25,7	-28,3	-30,7	-35,4	-38,7	-42,5	-44,1	-43,5	-42,3	-40,9
54	m	1902	1974	116,3	0,7	2,8	73	9,6	6,2	3,0	0,0	-2,7	-5,3	-7,7	-9,9	-11,9	-13,8	-15,6	-17,2	-18,6	-20,0	-21,2	-23,4	-25,2	-28,4	-30,3	-31,5	-31,1	-28,1	-26,6	-25,1
56	m	1912	1985	115,3	0,7	2,8	74	6,7	2,7	-0,7	-3,6	-6,1	-8,1	-9,9	-11,3	-12,5	-13,4	-14,1	-14,7	-15,2	-15,5	-15,7	-15,8	-15,7	-14,8	-13,6	-11,2	-9,4	-6,8	-6,0	-5,3
34	f	1892	1967	123,6	0,4	1,6	76	19,8	17,7	15,6	13,5	11,5	9,6	7,7	5,8	4,0	2,3	0,6	-1,1	-2,7	-4,2	-5,7	-8,5	-11,2	-17,0	-22,0	-29,5	-34,7	-41,7	-42,6	-41,8
57	m	1913	1989	113,5	0,9	3,6	77	4,6	0,6	-2,6	-5,3	-7,4	-9,1	-10,5	-11,5	-12,3	-12,9	-13,3	-13,5	-13,7	-13,7	-13,6	-13,3	-12,8	-11,3	-9,8	-7,5	-6,0	-4,0	-3,5	-2,9
55	m	1903	1982	113,7	1,2	4,8	79	5,4	1,5	-2,0	-5,0	-7,7	-10,1	-12,1	-13,9	-15,4	-16,8	-17,9	-18,9	-19,7	-20,4	-20,9	-21,8	-22,2	-22,5	-21,9	-20,0	-18,3	-15,1	-14,1	-13,1
35	m	1888	1967	108,0	0,6	2,4	80	4,2	2,0	0,0	-2,1	-4,1	-6,0	-8,0	-9,8	-11,6	-13,3	-15,0	-16,7	-18,3	-19,8	-21,3	-24,1	-26,8	-32,6	-37,6	-45,1	-50,3	-57,3	-58,2	-57,4
52	f	1902	1983	132,8	1,6	6,4	81	24,3	20,4	16,9	13,9	11,3	9,0	7,1	5,4	3,9	2,7	1,6	0,8	0,0	-0,5	-1,0	-1,6	-2,0	-1,9	-1,1	1,0	2,8	5,9	6,9	7,8
53	f	1910	1991	122,9	0,9	3,6	82	13,8	9,9	6,8	4,3	2,3	0,8	-0,3	-1,2	-1,8	-2,2	-2,4	-2,5	-2,5	-2,4	-2,2	-1,7	-1,1	0,5	2,1	4,3	5,7	7,5	8,0	8,5
43	f	1883	1968	107,6	1,1	4,4	86	3,2	0,9	-1,4	-3,7	-5,8	-7,9	-10,0	-11,9	-13,8	-15,7	-17,4	-19,1	-20,8	-22,3	-23,9	-26,7	-29,3	-35,0	-39,6	-46,2	-50,2	-54,1	-53,7	-51,9
44	f	1883	1968	125,7	0,8	3,2	86	21,3	19,0	16,7	14,4	12,3	10,2	8,1	6,2	4,3	2,4	0,7	-1,0	-2,7	-4,2	-5,8	-8,6	-11,2	-16,9	-21,5	-28,1	-32,1	-36,0	-35,6	-33,8
45	f	1883	1968	102,1	0,8	3,2	86	-2,3	-4,6	-6,9	-9,2	-11,3	-13,4	-15,5	-17,4	-19,3	-21,2	-22,9	-24,6	-26,3	-27,8	-29,4	-32,2	-34,8	-40,5	-45,1	-51,7	-55,7	-59,6	-59,2	-57,4
46	f	1883	1968	114,9	0,8	3,2	86	10,5	8,2	5,9	3,6	1,5	-0,6	-2,7	-4,6	-6,5	-8,4	-10,1	-11,8	-13,5	-15,0	-16,6	-19,4	-22,0	-27,7	-32,3	-38,9	-42,9	-46,8	-46,4	-44,6
47	m	1880	1968	110,3	0,5	2,0	89	5,9	3,6	1,3	-1,0	-3,1	-5,2	-7,3	-9,2	-11,1	-13,0	-14,7	-16,4	-18,1	-19,6	-21,2	-24,0	-26,6	-32,3	-36,9	-43,5	-47,5	-51,4	-51,0	-49,2
48	m	1880	1968	118,2	0,6	2,4	89	13,8	11,5	9,2	6,9	4,8	2,7	0,6	-1,3	-3,2	-5,1	-6,8	-8,5	-10,2	-11,7	-13,3	-16,1	-18,7	-24,4	-29,0	-35,6	-39,6	-43,5	-43,1	-41,3

ID: Identifikationsnummer (vgl. Anhang 13)
G: Geschlecht m männlich, f weiblich
Gj: Geburtsjahr
Sj: Sterbejahr/Auffindungsjahr
^{14}C: ^{4}C-Messwert
s: Standardabweichung des ^{14}C-Messwertes
± 4s: vierfache Standardabweichung des ^{14}C-Messwertes
grau hinterlegt: Differenzen von $|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}| \leq 4s$

Anhang 62: Vergleich der Übereinstimmungsbereiche für 11 Individuen, bei denen dieLebensjahre durch den Rechenmodus überschätzt werden. (nach Lebensjahren aufsteigend sortiert).

									Differenzen = $^{14}C_{gemessen}$ - $^{14}C_{berechnet}$; unter Verwendung verschiedener Austauschraten $1/t_C$ [%]																								
ID	G	Gj	Sj	^{14}C	s	± 4s	Lj		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	12,5	15,0	20,0	25,0	40,0	50,0	66,0
99	f	1975	1985	126,7	1,5	6,00	10		-1,84	-1,69	-1,55	-1,41	-1,27	-1,14	-1,00	-0,88	-0,75	-0,63	-0,50	-0,38	-0,27	-0,15	-0,04	0,18	0,38	0,87	1,31	2,07	2,69	3,98	4,53	5,12
							11		-0,90	-0,73	-0,57	-0,41	-0,25	-0,10	0,05	0,20	0,34	0,48	0,61	0,75	0,88	1,00	1,13	1,36	1,59	2,12	2,58	3,37	4,00	5,24	5,73	6,22
		Differenz zwischen den Werten:							-0,94	-0,96	-0,98	-1,00	-1,02	-1,04	-1,06	-1,07	-1,09	-1,10	-1,12	-1,13	-1,14	-1,16	-1,17	-1,19	-1,21	-1,25	-1,27	-1,30	-1,31	-1,25	-1,19	
97	m	1972	1990	118,6	1,1	4,40	18		-6,52	-6,20	-5,90	-5,61	-5,33	-5,06	-4,81	-4,56	-4,33	-4,10	-3,89	-3,68	-3,48	-3,29	-3,11	-2,76	-2,44	-1,75	-1,17	-0,29	0,34	1,42	1,82	2,23
							19		-5,61	-5,28	-4,96	-4,66	-4,36	-4,09	-3,82	-3,57	-3,32	-3,09	-2,87	-2,65	-2,45	-2,25	-2,07	-1,71	-1,39	-0,69	-0,11	0,76	1,38	2,44	2,83	3,24
		Differenz zwischen den Werten:							-0,90	-0,92	-0,94	-0,95	-0,97	-0,98	-0,99	-1,00	-1,01	-1,01	-1,02	-1,03	-1,03	-1,04	-1,04	-1,05	-1,05	-1,06	-1,06	-1,05	-1,04	-1,02	-1,02	-1,01
87	m	1960	1980	143,4	1	4,00	20		-1,20	-0,89	-0,59	-0,28	0,03	0,33	0,63	0,93	1,23	1,52	1,80	2,08	2,36	2,63	2,89	3,41	3,90	5,03	6,02	7,62	8,82	10,96	11,76	12,63
							21		-0,36	0,02	0,39	0,76	1,13	1,49	1,84	2,19	2,53	2,87	3,20	3,52	3,84	4,14	4,44	5,02	5,57	6,82	7,90	9,63	10,91	13,22	14,12	15,10
		Differenz zwischen den Werten:							-0,85	-0,91	-0,98	-1,04	-1,10	-1,16	-1,21	-1,26	-1,31	-1,35	-1,40	-1,44	-1,48	-1,51										
80	m	1951	1976	140	2,4	9,60	25		-2,21	-3,07	-3,85	-4,54	-5,16	-5,72	-6,20	-6,64	-7,01	-7,34	-7,62	-7,86	-8,06	-8,22	-8,35	-8,52	-8,59	-8,42	-7,93	-6,49	-4,93	-1,31	0,16	1,63
							26		-2,14	-2,95	-3,67	-4,30	-4,86	-5,34	-5,76	-6,11	-6,41	-6,66	-6,87	-7,03	-7,15	-7,23	-7,29	-7,31	-7,24	-6,76	-6,01	-4,23	-2,49	1,14	2,48	3,72
									-0,08	-0,12	-0,18	-0,24	-0,31	-0,38	-0,45	-0,52	-0,60	-0,68	-0,75	-0,83	-0,91	-0,98	-1,06	-1,21	-1,35	-1,66	-1,92	-2,26	-2,44	-2,45	-2,32	-2,09
88	m	1963	1990	131,5	0,9	3,60	27		-7,29	-6,07	-4,93	-3,86	-2,86	-1,92	-1,05	-0,23	0,54	1,26	1,94	2,58	3,18	3,74	4,27	5,24	6,10	7,87	9,22	11,08	12,26	14,01	14,55	15,06
							28		-7,04	-5,72	-4,49	-3,34	-2,27	-1,27	-0,34	0,54	1,35	2,11	2,83	3,50	4,12	4,71	5,26	6,27	7,16	8,97	10,33	12,19	13,35	15,04	15,58	16,08
		Differenz zwischen den Werten:										-0,52	-0,59	-0,66	-0,71	-0,76	-0,81	-0,85	-0,89	-0,92	-0,94											
72	m	1939	1981	120,8	0,8	3,20	42		10,93	7,17	3,83	0,87	-1,74	-4,04	-6,06	-7,83	-9,37	-10,71	-11,87	-12,86	-13,71	-14,43	-15,03	-15,94	-16,51	-16,96	-16,57	-14,88	-13,14	-9,86	-8,73	-7,59
							43		10,77	6,98	3,65	0,72	-1,84	-4,08	-6,03	-7,71	-9,16	-10,41	-11,47	-12,37	-13,12	-13,74	-14,25	-14,97	-15,38	-15,49	-14,86	-12,95	-11,15	-7,99	-6,96	-6,01
		Differenz zwischen den Werten:										0,15	0,10																			
62	m	1934	1977	136,5	1,4	5,60	43		30,08	26,29	22,83	19,66	16,78	14,15	11,76	9,59	7,62	5,84	4,22	2,77	1,46	0,29	-0,77	-2,54	-3,94	-6,16	-7,11	-7,01	-5,86	-2,40	-1,03	0,22
							44		29,81	25,94	22,43	19,25	16,37	13,76	11,41	9,29	7,39	5,68	4,15	2,79	1,57	0,49	-0,47	-2,04	-3,25	-5,02	-5,60	-5,01	-3,64	-0,24	0,98	2,05
		Differenz zwischen den Werten:																	0,07	-0,01	-0,11	-0,20	-0,30	-0,50	-0,69	-1,15						
67	m	1938	1985	118,9	1,2	4,80	47		9,58	5,65	2,26	-0,63	-3,10	-5,19	-6,95	-8,42	-9,63	-10,63	-11,43	-12,07	-12,56	-12,93	-13,19	-13,46	-13,45	-12,74	-11,59	-9,22	-7,39	-4,53	-3,63	-2,81
67	m	1938	1985	118,9	1,2	4,80	48		9,48	5,54	2,20	-0,64	-3,04	-5,04	-6,71	-8,09	-9,20	-10,10	-10,81	-11,36	-11,76	-12,04	-12,23	-12,34	-12,22	-11,29	-10,01	-7,60	-5,82	-3,16	-2,37	-1,68
		Differenz zwischen den Werten:									0,07	0,01	-0,06																	-1,37	-1,27	-1,13

Anhang 62: Vergleich der Übereinstimmungsbereiche für 11 Individuen, bei denen dieLebensjahre durch den Rechenmodus überschätzt werden. (nach Lebensjahren aufsteigend sortiert) (Fortsetzung).

								Differenzen = $^{14}C_{gemessen}$ - $^{14}C_{berechnet}$; unter Verwendung verschiedener Austauschraten $1/t_C$ [%]																							
ID	G	Gj	Sj	^{14}C	s	± 4s	Lj	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	12,5	15,0	20,0	25,0	40,0	50,0	66,0
58	m	1924	1979	111,2	1,2	4,80	55	4,03	0,13	-3,40	-6,57	-9,42	-11,98	-14,28	-16,33	-18,16	-19,79	-21,24	-22,51	-23,64	-24,63	-25,49	-26,89	-27,92	-29,31	-29,60	-28,71	-27,28	-24,25	-23,31	-22,62
58	m	1924	1979	111,2	1,2	4,80	56	3,81	-0,15	-3,69	-6,86	-9,69	-12,20	-14,44	-16,42	-18,16	-19,70	-21,05	-22,23	-23,26	-24,15	-24,91	-26,11	-26,95	-27,92	-27,89	-26,61	-25,01	-21,83	-20,75	-19,70
		Differenz zwischen den Werten:						0,22	0,27	0,30																					
55	m	1903	1982	113,7	1,2	4,80	79	5,38	1,49	-1,96	-5,01	-7,70	-10,05	-12,11	-13,90	-15,45	-16,78	-17,92	-18,89	-19,71	-20,39	-20,95	-21,76	-22,24	-22,47	-21,90	-20,03	-18,25	-15,09	-14,06	-13,11
55	m	1903	1982	113,7	1,2	4,80	80	5,22	1,31	-2,13	-5,15	-7,78	-10,06	-12,04	-13,74	-15,19	-16,43	-17,47	-18,34	-19,06	-19,64	-20,10	-20,74	-21,06	-20,96	-20,18	-18,11	-16,29	-13,22	-12,23	-11,32
		Differenz zwischen den Werten:							0,18	0,17																					
52	f	1902	1983	132,8	1,6	6,40	81	24,27	20,37	16,94	13,93	11,31	9,03	7,05	5,35	3,90	2,67	1,63	0,76	0,04	-0,54	-1,00	-1,64	-1,96	-1,86	-1,08	0,99	2,81	5,88	6,87	7,78
52	f	1902	1983	132,8	1,6	6,40	82	24,13	20,22	16,81	13,85	11,28	9,07	7,19	5,58	4,23	3,09	2,15	1,39	0,77	0,28	-0,09	-0,56	-0,72	-0,33	0,65	2,88	4,71	7,69	8,63	9,51
		Differenz zwischen den Werten:														-0,32	-0,43	-0,53	-0,63	-0,72	-0,82	-0,91	-1,08	-1,24	-1,53	-1,72	-1,88	-1,90			

ID: Identifikationsnummer (vgl. Anhang 13)
G: Geschlecht m männlich, f weiblich
Gj: Geburtsjahr
Sj: Sterbejahr/Auffindungsjahr
^{14}C: ^{4}C-Messwert
s: Standardabweichung des ^{14}C-Messwertes
± 4s: vierfache Standardabweichung des ^{14}C-Messwertes
grau hinterlegt: Differenzen von $|^{14}C_{gemessen} - {}^{14}C_{berechnet}| \leq 4s$
schwarz umrahmt: kleinste Differenz

Danksagung

Mein Dank gilt in besonderer Weise und daher an erster Stelle Prof. Dr. Friedrich Rösing, der 1991 die Idee zu diesem Projekt entwickelt und es mir vorgeschlagen hat. Über die Jahre hat er mich unterstützt und beraten und mir gleichzeitig die Möglichkeit belassen, Fragestellung und Lösungsweg selbständig auszugestalten. Dank gilt auch der Universität Ulm, die mich 1992 mit diesem Projekt zur Promotion zugelassen und mir nach den vielen Jahren damit auch den Abschluss ermöglicht hat.

Durch eine Sachbeihilfe der DFG (RO 475/11-1) und zwei Stipendien des Landes Baden-Württemberg (1991 bis 1994 und 2004 bis 2005) wurde der finanzielle Rahmen geschaffen, ohne den dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre. Am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung in Hannover konnte ich am ^{14}C-Labor unter Leitung von Prof. Dr. Mebus Geyh meine Proben in den Jahren 1992 bis 1994 aufbereiten und messen. Ihm und seinen Mitarbeitern möchte ich für die Zusammenarbeit danken.

Danken möchte ich auch meinen Kollegen in der Abteilung Biometrie und Medizinische Dokumentation, mit denen ich die statistischen Probleme ausführlich diskutieren und somit sowohl den Zahlen als auch der Fragestellung gerecht werden konnte. Über die lange Laufzeit dieser Arbeit waren es viele, die mich berieten. Besonderer Dank gilt dabei PD Dr. Josef Högel, PD Dr. Martina Kron und Dr. Sabine Schlegel. Darüberhinaus war diese Abteilung für mich der Ort, an dem ich meine Familie, meinen Beruf als Medizinische Dokumentarin und meine Promotion überhaupt vereinbaren konnte. Für diese Möglichkeit möchte ich allen Kollegen, besonders jedoch Prof. Dr. Wilhelm Gaus und PD Dr. Rainer Muche herzlichst danken.

Doch vor allem meinem Kollegen Dr. Wolfgang Dern und meinen Freunden Dr. Hanne Piechulek, Dr. Udo Frank und Silvia Gray verdanke ich die Fertigstellung dieser Arbeit. Sie haben mich über die vielen Jahre hinweg immer wieder ermuntert, bestärkt und auch gedrängt. Auch meiner Familie möchte ich danken und da besonders meiner Tochter Marie. Sie ist mit dieser Arbeit gleichsam groß geworden und hat mich zuletzt bei den notwendigen, doch unliebsamen Tätigkeiten sehr entlastet.