Institut für Ur- und Frühgeschichte Archäodemographie Prof. Dr. Andreas Zimmermann Sommersemester 2008 Universität zu Köln

# Isotopenanalyse Anwendungen und Grenzen



Axel Berger Matrikelnummer 4078209 Student@Berger-Odenthal.De Johann-Häck-Str. 14 51519 Odenthal-Heide Tel:  $0\,21\,74\,/\,74\,39\,67$  Titelbild: Zähne und Schädel eines 1,8 Ma alten *Paranthropus robustus* aus der Swartkrans-Höhle in Südafrika. (Ambrose 2006)



2008 - axel.berger-odenthal.de - Axel Berger

Dieser Inhalt ist unter einem Creative Commons Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland Lizenzvertrag lizenziert. Um die Lizenz anzusehen, gehen Sie bitte zu http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/ oder schicken Sie einen Brief an Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California 94105, USA.

Sie dürfen: den Inhalt vervielfältigen, verbreiten und öffentlich aufführen, sowie Abwandlungen bzw. Bearbeitungen des Inhaltes anfertigen.

Zu den folgenden Bedingungen:

Namensnennung. Sie müssen den Namen des Autors/Rechtsinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen.

Weitergabe unter gleichen Bedingungen. Wenn Sie diesen Inhalt bearbeiten oder in anderer Weise umgestalten, verändern oder als Grundlage für einen anderen Inhalt verwenden, dann dürfen Sie den neu entstandenen Inhalt nur unter Verwendung von Lizenzbedingungen weitergeben, die mit denen dieses Lizenzvertrages identisch, vergleichbar oder kompatibel sind.

Im Falle einer Verbreitung müssen Sie anderen die Lizenzbedingungen, unter die dieser Inhalt fällt, mitteilen. Jede dieser Bedingungen kann nach schriftlicher Einwilligung des Rechtsinhabers aufgehoben werden.

#### Erklärung

Hiermit versichere ich, daß ich diese Hausarbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen meiner Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, habe ich in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Dasselbe gilt sinngemäß für Tabellen, Karten und Abbildungen. Diese Arbeit hat in dieser oder einer ähnlichen Form noch nicht im Rahmen einer anderen Prüfung vorgelegen.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

# Inhaltsverzeichnis

1	Vorb	emerkungen	1
2	<b>Spur</b> 2.1 2.2 2.3	<b>renelemente</b> , <sup>87</sup> Sr, <sup>206, 207</sup> Pb Wanderung in der Glockenbecherzeit	<b>5</b> 5 6 7
3	Was	ser, <sup>2</sup> H und <sup>18</sup> O	9
	3.1	Die Mumie vom Similaun	9
	3.2	Der Amesbury Archer	10
	3.3	Kinderopfer der Incas in den Hochanden	11
	3.4	Ein amphibischer Elephantenvorfahr	12
4	Körp	pergewebe, <sup>13</sup> C und <sup>15</sup> N	13
	4.1	Die Grundlagen der Methode	13
		4.1.1 Kohlenstoff ${}^{13}C$	13
		4.1.2 Stickstoff ${}^{15}N$	14
		4.1.3 Vergleich afrikanischer Populationen	15
	4.2	Australopithecus und Paranthropus	16
	4.3	Ernährung des Neanderthalers	17
	4.4	Wanderung oder Seßhaftigkeit am Cape von Südafrika	18
	4.5	Präneolithische Besiedlung des Tropenwaldes in Malaysia	19
	4.6	Übergang vom Meso- zum Neolithikum am Eisernen Tor	20
	4.7	Neolithisierung in Britannien und Dänemark	21
	4.8	Erkennen von Milchwirtschaft	22
	4.9	Fleischkonsum in Hinkelstein und Großgartach	24
	4.10	Ernährungsunterschiede auf einem Gräberfeld der Römerzeit	25
	4.11	Einheimische oder Fremde in einem Massengrab in Peru	26
	4.12	Kinderopfer der Incas	27

5	Feh	ler und Grenzen der Methode	29
	5.1	Die Notwendigkeit von Vergleichsdaten	29
	5.2	Kollagen und seine Degradation	29
	5.3	Experimentelle Degradation mit Bodenbakterien	31
Lit	terati	urverzeichnis	33
Α	Tafe	eln	37

# Abbildungsverzeichnis

1	Drei Ausschnitte aus dem Periodensystem	1
2 3 4	Verteilung aller gemessenen Strontiumwerte in Bayern	$5 \\ 7 \\ 8$
5	Sauerstoffisotope der Mumie vom Similaun	10
6	Isotopenverhältnisse der Incakinder, ${}^{2}H$ und ${}^{18}O$	11
7	Isotpenverhältnisse der Fayoumfossilien	12
8	Kohlenstofffraktionierung verschiedner Nahrungsketten	13
9	$\delta^{15}$ N-Werte verschiedener Tier- und Pflanzengruppen	15
10	Historische und prähistorische Populationen in Südafrika	16
11	$^{13}C$ im Zahnschmelz von <i>Paranthropus robustus</i>	17
12	Neanderthaler und Faunenreste aus der Vindijahöhle	18
13	Verteilung der $\delta^{13}C$ -Werte aus dem südwestlichen Cape, Südafrika .	18
14	Neolithische und präneolithische Bestattungen in Malaysia	19
15	Neolithisierung in Vlasac und Lepenski Vir	20
16	Wandel der Subsistenz im dänischen Neolithikum	21
17	Abrupter und vollständiger Wandel im britischen Neolithikum	22
18	Stickstoffzyklus mit Meßwerten aus Bercy, Paris	23
19	Abreicherung von ${}^{13}C$ in $C_{18:0}$ -Fettsäuren der Milch	23
20	Hinkelstein und Großgartach in Trebur	24
21	Gruppen auf dem Gräberfeld in Poundbury	25
22	Massengrab von Pacatnamu, Peru	26
23	Isotopenverhältnisse der Incakinder, $^{15}N$ und $^{13}C$	27
24	Terrestrische Schwankungsbreite für $\delta^{15}N$ und $\delta^{13}C$	29
25	Vergleich prähistorischer Faunendaten mit rezenten Normalbereichen	30
26	Isotopenwerte nach kontrollierter Degradation	31

### Tafeln im Anhang

1	Glockenbecher-Gräberfelder und Strontiumwerte in Bayern	37
2	Geologisch-lithologische Karte der Gegend rund um den Similaun	38
3	Strontiumwerte der Zähne der Bestattungen von Monkton	39
4	Bleiisotope der Zähne der Bestattungen von Monkton	39
5	Sauerstoffisotope des europäischen Regenwassers	40
6	$\sigma \delta^{18}$ O für aquatische und terrestrische Taxa	41
7	Anreicherung von ${}^{13}C$ in der Nahrungskette	42
8	Kohlenstoffisotope für verschiedene Faunengruppen	42
9	Laserabtrag von Zahnschmelz bei Paranthropus robustus	43
10	Die Küstenebene des südwestlichen Cape, Südafrika	44
11	Lage der Höhlen Gua Cha und Niah in Malaysia	45
12	Isotopenwerte von Vlasac und Lepenski Vir	45
13	Stickstoffzyklus von Kühen bei verschiedenen Zuchtregimen	46
14	Stickstoffzyklus von Kälbern	46
15	Fraktionierung von $^{13}C$ und Meßwerte aus Tonscherben $\hdots$	47
16	Lage der Gräberfelder von Trebur, Herxheim und Poundbury	48
17	Männer und Frauen in Trebur und Herxheim	48
18	Schwankungsbereiche für $\delta^{15}N$ und $\delta^{13}C$	49
19	Vergleich von Kollagengenproben abhängig vom C:N-Verhältnis	50
20	Kollagenproben vor und nach kontrollierter Degradation	50

# Tabellenverzeichnis

1	Bayern: Anteile der Zugewanderten	6
$2 \\ 3$	Vergleich der C3-, C4- und CAM-Pflanzen $\dots \dots \dots$	14 16
4 5 6	<ul> <li><sup>13</sup>C im Zahnschmelz von Australopithecus africanus</li> <li>Messungen an 18 Skeletten des südwestlichen Cape, Südafrika</li> <li>Isotopenwerte von degradiertem Kollagen</li> </ul>	43 44 51

### Hinweis

Erstaunlicherweise wird dieser Text immer noch regelmäßig in überraschend großer Zahl abgerufen. Ist etwas unklar? Was kann verbessert oder klarer dargestellt werden? Für Rückmeldung wäre ich dankbar und könnte gegebenenfalls eine überarbeitete Version hier einstellen. Das gilt ebenso für alle anderen, offenbar auf weniger Interesse stoßenden Texte.

#### 1 Vorbemerkungen

#### Isotope

Isotope sind Atome desselben Elementes, deren Kerne dieselbe Protonen- und verschiedene Neutonenanzahlen aufweisen. Mit der Zahl der Protonen ist auch die der Elektronen und deshalb der Aufbau der Elektronenhülle genau gleich, so daß sich Isotope eines Elementes chemisch exakt gleich verhalten und mit chemischen Methoden nicht getrennt werden können. Die unterschiedliche Neutronenzahl äußert sich lediglich in verschiedenen Massen der Atome.

Die meisten Elemente kommen in der Natur nicht als reine Atomsorte sondern als Mischung mehrerer Isotope vor. Dies äußert sich vor allem in den nicht ganzzahligen Atomgewichten der meisten Elemente. Aufgrund der chemischen Gleichheit gilt die Grundregel:

#### Die Isotopenzusammesetzung der Elemente ist überall auf der Erde und für alle Zeiten genau gleich und unveränderlich.

Neben dem offensichtlichen Fall der radioaktiven Isotope weichen auch solche stabilen Isotope von dieser Regel merklich ab, die als Töchter radioaktiver Mutterisotope neu entstehen. Das bekannteste Beispiel ist das Blei, dessen drei häufigste Isotope jeweils den Endpunkt der drei wichtigen Zerfallsreihen<sup>1</sup> bilden. Ebenso ist Strontium-87 das Tochternuklid von Rubidium-87 mit einer Halbwertszeit von 48 Milliarden Jahren.



(a) Rubidium und Strontium

(b) Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff

<sup>(</sup>c) Blei

Abbildung 1: Drei Ausschnitte aus dem Periodensystem (Periodensystem 2002). In der zweiten und dritten Zeile stehen die natürlich vorkommenden Isotope und ihre Anteile in %.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Dies sind: <sup>232</sup>Th  $\Rightarrow$  <sup>208</sup>Pb, <sup>238</sup>U  $\Rightarrow$  <sup>206</sup>Pb und <sup>235</sup>U  $\Rightarrow$  <sup>207</sup>Pb.

#### Spurenelemente

Spurenelemente sind Stoffe, die im Erdboden, in Gesteinen und im Wasser in geringen und regional stark schwankenden Konzentrationen vorkommen. Ihre Messung kann helfen, den Ursprungsort der Rohstoffe von z.B. Metallen oder Keramiken zu bestimmen. Als chemisch eigenständige Elemente werden sie jedoch in den einzelnen Verarbeitungsschritten teilweise sehr stark an- oder abgereichert, so daß neben den Meßwerten oft auch genaue Kenntnisse des Herstellungsprozesses erforderlich sind. Besonders bei lebendem Gewebe sind diese Einflüsse kaum zu kontrollieren. So hängt die Aufnahme einmal sehr stark von der Verfügbarkeit des Elementes ab, das sie ersetzen<sup>2</sup> aber auch u.a. vom Alter des Lebewesens (Humphrey 2008). In der Summe haben sich die hohen ursprünglich an die Spurenanlyse gestellten Erwartungen nicht erfüllt (Radosevich 1993).

Für die Isotope der Spurenelemente gilt diese Einschränkung jedoch nicht. Alle verfälschenden Prozesse betreffen alle Isotope gleichermaßen, so daß ihr Verhältnis zueinander unverändert bleibt. Wenn sich also eine geologische Situation nicht nur durch Konzentrationen von Elementen beschreiben läßt sondern durch deren Isotopenverhältnis, dann läßt sich diese Signatur in Gewebeproben wiederfinden.

#### Fraktionierung

Bei sehr hoher Meßgenauigkeit gilt die Unveränderlichkeit der Isotopenverhältnisse nicht mehr streng. Vor allem Verdampfung und biologische Prozesse verursachen eine geringe Fraktionierung der Isotope. Wegen der Kleinheit der Änderung gibt man den gemessenen Anteil nicht absolut an, sondern seine relative Änderung im Vergleich zu einem Standard.  $\delta^{15}N = 4\%$  bedeutet also einen Gehalt an schwerem Stickstoff im Gewebe, der um 0,4% über dem der Umgebungsluft liegt, der anstatt 0,366% also 0,3675% beträgt. Bei allen so ausgedrückten Differenzwerten ist stets die verwendete Referenz mit anzugeben.

Es handelt sich hier um sehr kleine, normalerweise vernachlässigbare Effekte. Daraus folgt direkt, daß alle anderen ähnlich kleinen Wirkungen, im Sinne der Fragestellung also Störgrößen, jetzt ebenfalls dieselbe Größenordnung erreichen und nicht mehr vernachlässigt werden dürfen. Zum Beispiel wird die An- und Abreicherung des schweren Sauerstoffs je nach Kontext als Proxy für die folgenden Größen verwendet:

- Die Gesamtmenge des in Eisschilden gebundenen Wassers
- Die Oberflächentemperatur der Meere
- Der Salzgehalt des Oberflächenwassers der Meere
- Die globale klimatische Mitteltemperatur
- Die Entfernung des Niederschlagsgebietes von der Küste in Hauptwindrichtung
- Die regionale Höhenlage

 $<sup>^2\</sup>mathrm{Zum}$ Beispiel Strontium an Stelle von Calcium

- Die regionale mittlere Jahrestemperatur
- Die regionale Niederschlagsmenge oder Aridität

Absolute Meßwerte an Funden enthalten deshalb selten eine verwertbare Aussage sondern nur der Vergleich mit jeweils passend gewählten Referenzmessungen.

# 2 Spurenelemente, <sup>87</sup>Sr, <sup>206, 207</sup>Pb

### 2.1 Wanderung in der Glockenbecherzeit

(Price 1998) Das bayerische Voralpenland gliedert sich in zwei von der Donau getrennte, geologisch deutlich unterschiedliche Gebiete. Der Boden besteht südlich der Donau aus gletscherverlagerten Kalksedimenten und Lößablagerungen in Flußnähe. Nordöstlich ist er granitisch und nördlich gemischten Urspungs. Der nordöstliche Granit ist durch den Betazerfall des enthaltenen <sup>87</sup>Rb angereichert an <sup>87</sup>Sr (Tafel 1). Das Verhältnis <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr beträgt dort (meist deutlich) mehr als 0,710. Strontium wird mit Kalzium in der späten Kindheit in den Zahnschmelz der bleibenden Zähne und lebenslang in die anorganische Knochensubstanz eingelagert, letztere speichert deshalb einen Mittelwert für die letzten etwa zehn Lebensjahre eines Menschen.

In Bayern findet sich mit mehr als 100 Fundplätzen eine besonders hohe Dichte an Gräbern mit Glockenbecherinventar. Archäologische und anthropologische Hinweise lassen eine Beziehung nach Nordosten und Osten, Polen, Ungarn und Österreich, vermuten. Untersucht wurden Knochen und/oder Zahnproben von 69 Individuen aus Gräbern südlich der Donau. Zahlreiche Werte vor allem der Zähne streuen deutlich in den Bereich hoher Anteile an <sup>87</sup>Sr, es zeichnen sich aber keine erkennbaren Gruppen ab (Abb. 2).

Deshalb wurde mit zwei Kriterien versucht, Zuwanderer zu identifizieren. Zum einen wurde der Mittelwert plus zwei Standardabweichungen der Messungen an Knochen als



Abbildung 2: Verteilung aller gemessenen Strontiumwerte in Bayern (Price 1998)

cemetery	no. of samples	no. of migrants @ 0·001	% migrants
Altdorf	2	1	50.0
Augsburg	14	2	14.3
Irlbach	12	2	16.7
Künzing-Bruck	6	0	0.0
Landau	9	4	44.4
Manching	3	1	33.3
Osterhofen	8	3	37.5
Pommelsbrun	1	0	0.0
Straubing-Öberau	5	2	40.0
Tückelhausen	2	0	0.0
Weichering	7	2	28.6
total	69	17	24.6

Tabelle 1: Anteile der Zugewanderten (Price 1998)

Grenze gewählt<sup>3</sup> und alle die bestimmt, deren Werte im Zahnschmelz darüberliegen. Nach diesem Test sind 13 Individuen (19%) Zuwanderer. Als ein zweites Kriterium wurden die Werte im Knochen und im Zahnschmelz jeweils eines Individuums verglichen und die ausgewählt, bei denen die Differenz der Isotopenverhältnisse mehr als 0,001 beträgt. Der so bestimmte Anteil der Zuwanderer beträgt 17 Personen oder 25% (Tab. 1).

Es fällt auf, daß die Ortskonstanz der beiden großen Gräberfelder in Augsburg und Irlbach offenbar größer ist als der Durchschnitt, obwohl für Irlbach besonders kleine Distanzen möglich wären.

### 2.2 "Ötzi", die Mumie vom Similaun

(Müller 2003) Die Gletschermumie aus dem Ötztal gehört zu den bestuntersuchten Funden überhaupt. Zur Bestimmung der Herkunft und Wanderungen wurden im Zahnschmelz, den Knochen und im Darminhalt die folgenden Werte bestimmt:

- Strontiumisotopenverhältnis $^{87} \mathrm{Sr}$  zu $^{86} \mathrm{Sr}$
- Bleiisotopenverhältnis <sup>206</sup>Pb zu <sup>204</sup>Pb
- Sauerstoffisotopabreicherung  $\delta^{18}O_{(SMOW)}$
- +  ${}^{40}Ar/{}^{39}Ar$ -Alter von Glimmerpartikeln im Darm

Zusammen mit Sauerstoffwerten, die von Trinkwasser südlich der Wasserscheide stammen (siehe Kapitel 3.1), läßt sich über die Gesteine (Abb. 3a und Tafel 2) der Bewegungsradius des Mannes genau bestimmen. Die Kindheit hat er im Eisacktal, im unteren Pustertal, im Etschtal bei Meran oder im Ultental verbracht. Im letztgenannten existieren keinerlei archäologische Funde aus der Kupferzeit. Der wahrscheinlichste Ort ist Feldthurns im Eisacktal (FE in Tafel 2).

 $<sup>^3\</sup>mathrm{Das}$ heißt 97,5 % aller Messwerte an Knochen liegen darunter.



Abbildung 3: Blei und Strontiumisopenverhältnis aus den Knochen und Zähnen des Mannes vom Similaun (Müller 2003)

In den polymetamorphischen Gneisen überlagern sich die variszische (330 Ma) und die alpine Orogenese (90 Ma) und führen beim Glimmer zu charakteristischen Werten für die <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-Alter. Die Altersverteilung aus dem Darminhalt der Mumie paßt nur in ein kleines Gebiet westlich von Meran, zuletzt könnte er sich in Juval (JU in Tafel 2) aufgehalten haben. Allerdings ist diese Gegend inkomptibel zu den Isotopen aus seinen Knochen. Diese ließen sich mit Transhumanz erklären. Möglicherweise hielt er sich als Hirte ein bis zwei Monate im Sommer im Norden, auf der Höhe des südlichen Ötztals, auf und verbrachte die Winter in den südlichen Tallagen seiner Kindheit. Das Strontiumisotopenverhältnis seiner Darmwand stimmt zum Todeszeitpunkt im Spätwinter oder beginnenden Frühjahr mit dem seines Zahnschmelz überein. Vermutlich hat er sein ganzes Leben diese Gegend nie verlassen.

### 2.3 Mobilität im britischen Frühneolithikum

(Budd 2003) Das Neolithikum wurde allgemein mit permanenter Seßhaftigkeit assoziiert. (Allerdings erforderte die Größe der Siedlungen auf jeden Fall die Wanderung jeweils eines Heiratspartners.) Neuere Arbeiten haben diese Ansicht erheblich revidiert. Das Fehlen permanenter Siedlungen im Befund und die weiter sehr breite Subsistenzgrundlage weisen auf eine starkte Kontinuität zum Mesolithikum und weiterbestehende Mobilität hin. Fauna und Lithik im südenglischen Tiefland weisen in dieselbe Richtung. An vier Bestattungen aus einem hengeartigen Monument nahe Monkton-up-Wimbourne wurden Isotopenbestimmungen im Schmelz und Dentin der Zähne durchgeführt. Es handelt sich um eine erwachsene Frau und drei Jugendliche, von 5, 8–9 und 9–10 Jahren. Alle vier fanden sich in einer Grube und wurden vermutlich gleichzeitig bestattet. Die Datierung ergab 3,5–3,1 ka cBC.

In allen Fällen liegen die radiogenen Strontiumwerte deutlich über denen der Gräber



Abbildung 4: Veränderungen der Strontiumwerte mit dem Lebensalter (Budd 2003) A Kind, B und D Jugendliche, C erwachsene Frau

im Kalkstein (Tafel 3). Die beiden älteren Jugendlichen, B und D, haben sich in der Kindheit aus dem Kalk wegbewegt und sind vor der Bestattung zurückgekehrt. Der jüngste, A, ist zwischen Geburt und früher Kindheit zugewandert. Bei der erwachsenen Frau weichen zudem die Bleiwerte deutlich ab (Tafel 4). Die nächstgelegene Region, in der sie ihre Kindheit verbracht haben könnte, ist das 80 km im Nordwesten gelegene Mendip Erzgebiet.

Zusammen bestätigen alle vier Individuen eine größtenteils mobile Lebensweise mit allenfalls vorübergehender Seßhaftigkeit.

# 3 Wasser, <sup>2</sup>H und <sup>18</sup>O

#### Fraktionierung beim Verdunsten

Bei gleicher Temperatur und kinetischer Energie bewegen sich die schweren Wassermoleküle  ${}^{1}\text{H}_{2}{}^{18}\text{O}$  und  ${}^{2}\text{H}{}^{1}\text{H}{}^{16}\text{O}$  etwas langsamer und verdunsten etwas weniger. Ebenso kondensieren sie etwas stärker aus.

Während des gesamten Holozäns blieben die Eisbedeckung und damit die Zusammensetzung der Meere sowie die Verteilung der Klimazonen näherungsweise konstant. In diesem Zeitraum hängt die Zusammensetzung des Regenwassers also vor allem von der Entfernung zur Küste in Hauptwindrichtung und von der Höhenlage ab.

#### Referenzwerte der Messungen

Für Sauerstoff sowie für den später diskutierten Kohlenstoff sind zwei Referenzen verbreitet, relativ zu denen die Abweichung ausgedrückt wird. Einmal ist dies SMOW, Standard Mean Ocean Water, und zum anderen PDB, Pee Dee Belemnite, fossile *Belemnitella americana* aus der kreidezeitlichen Pee Dee Formation in Südcarolina. Ohne Kenntnis der Referenz sind Angaben zu  $\delta^{18}$ O und  $\delta^{13}$ C nicht vergleichbar.

### 3.1 Die Mumie vom Similaun

(Müller 2003) Die Fundstelle liegt auf der Wasserscheide des Alpenkammes. Südlich von ihr stammt das Wasser des Regens hauptsächlich aus dem warmen Mittelmeer und nördlich aus dem weiter entfernten Atlantik. Im Norden ist das Wasser deshalb deutlich ärmer an <sup>18</sup>O. Aus Flüssen und Bächen im Umkreis der Fundstelle wurden Wasserproben analysiert. Flüsse, die sich aus Gletscherschmelzwasser großer Höhen speisen sind dabei stärker abgereichert als die vermutlich für Trinkwasser genutzten Bäche. Die Werte aus den Zähnen der Mumie liegen dabei am oberen Rand der Streuung und sind nur mit dem Wasser südlich des Alpenkammes vereinbar. (Nördlich des Inn gelegene Gebiete mit ähnlichen Wasserwerten können aufgrund der Geologie wegen des dortigen Kalksteins ausgeschlossen werden, siehe Kapitel 2.2.)



Abbildung 5: Sauerstoffisotope der Knochen und Zähne und der umliegenden Flüsse und Bäche (Müller 2003). Offene Symbole: Flüsse, halbgefüllt: Quellen und Bäche, gefüllt: rezenter Zahnschmelz; EI, Eisack/Isarco; ET, Etsch/Adige; GB, Gröden; HO, Hohlen; IN, Inn; LT, Langtaufers; NO, Non; OT, Ötztal; RI, Rienz/Puster; RO, Rosanna; ST, Schnals; UT, Ulten; WI, Wipp; I, "Ötzi". Der Index s kennzeichnet Quellen und Bäche in den jeweiligen Tälern.

### 3.2 Der Amesbury Archer

(Chenery 2007) Im Mai 2002 wurde in Amesbury 5 km südöstlich von Stonehenge das Grab eines 35–45 Jahre alten Mannes mit Glockenbecherinverntar gefunden. Es handelt sich um das reichst ausgestattete Grab der Frühbronzezeit in ganz Europa. Datiert wird es auf ungefähr 2,3 ka cBC, gleichzeitig mit dem Umsetzen der Blausteine ins Innere des Sarsenringes von Stonehenge. In der Nähe wurde das Grab eines jungen Mannes von 25–30 Jahren gefunden, das im Unterkiefer zwei der gleichen goldenen Haarspangen enthielt, wie das Grab des ältern Mannes. Beide weisen eine Verwachsung des Fersen- mit einem Mittelfußknochen auf. Offenbar waren sie nahe verwandt, möglicherweise Vater und Sohn.

In den Zähnen des älteren Mannes ist <sup>18</sup>O sehr viel stärker abgereichert als im Wasser irgendwo auf den Britischen Inseln. Solche Sauerstoffwerte finden sich nur weitab der Küste oder in großer Höhe. Wahrscheinlich hat er seine Kindheit in den Alpen oder in Mitteleuropa verbracht (Dunkler blaugrüner Streifen in Tafel 5). Die Sauerstoffdaten des jüngeren Mannes lassen den gesamten Bereich von Schottland bis Frankreich zu, schließen aber die walisische Küste vermutlich aus.

### 3.3 Kinderopfer der Incas in den Hochanden

(Wilson 2007) 1996 wurden am Gipfel des Vulcans Sara Sara in Peru in 5 500 m Höhe die gefrorenen Überreste eines 15 Jahre alten Mädchens ("Sarita") gefunden. 1999 wurde 25 m neben dem 6 739 m hohen Gipfel des Vulkans Llullaillaco in Nordwestargentinien ein Incaschrein entdeckt – derzeit der höchste archäologische Fundplatz der Welt. Er verbarg die Körper eines weiteren 15-jährigen Mädchens ("Llullaillaco Maiden"), eines siebenjährigen Jungen ("Llullaillaco Boy") und eines sechsjährigen Mädchens ("Lightning Girl"). Die Fundplätze gehören zu weit über hundert Zeremonialplätzen in Höhen zwischen 5 200 und 6 700 Metern auf bedeutenden Gipfeln der gesamten Andenkette, von denen einige andere ebenfalls erhaltene Reste ritueller Opfer bargen. Die Logistik zum Bau von Schreinen und der Ausübung von Riten in solchen Höhen ist wohl nur unter direkter reichsherrschaftlicher Aufsicht denkbar. Llullaillaco Maiden wurde auf 1430–1520 cCE datiert, für die andern Kinder wird der gleiche Zeitraum angenommen.

Von allen vier Kindern konnten bis zu 30 cm lange Haare untersucht werden. Bei der Llullaillaco Maiden konnten zudem in einem Beutel separat beigebene Haare anhand des gleichen Verlaufes auf einen Schnitt sechs Monate vor dem Tod datiert und parallel untersucht werden. Mit dem weltweiten Mittelwert für den Haarwuchs von 10 mm/Monat für die meisten Populationen lassen sich die letzten Lebensmonate der Kinder rekonstruieren.



Abbildung 6: Isotopenverhältnisse der Incakinder, <sup>2</sup>H<sub>VSMOW</sub> und <sup>18</sup>O<sub>VSMOW</sub> über der Haarlänge in cm (Wilson 2007)

Alle vier Kinder zeigen einen scharfen Anstieg bei Wasserstoff und Sauerstoff in den letzten Monaten vor dem Tod. Dies scheint überraschend, denn das Regenwasser weist mit der Höhenlage den genau entgegengesetzten Trend auf. Haarkeratin wird aber nur zu geringem Teil aus Trinkwaser und mehrheitlich aus der Nahrung gebildet. Diese bestand wohl zum überwiegenden Teil aus transportablem und trockenbarem Mais aus dem Tiefland (siehe auch Kapitel 4.12). Kochwasser aus altem Schnee und lange Kochzeiten könnten auch das Wasser angereichert haben.

### 3.4 Ein amphibischer Elephantenvorfahr

(Liu 2008) In der Birket Qarun Formation in Nordägypten wurden ca. 37 Ma alte Fossilien von *Barytherium* und *Moeritherium*, zwei Vorläufern des Elephanten gefunden. Für beide ist schon länger eine aquatische Lebensweise vermutet wurden, konnte aber bislang nicht bewiesen werden. In dieser Untersuchung wurden nicht die gemessenen Werte für  $\delta^{18}$ O direkt verwendet sondern deren Standardabweichung über der Population.

Terrestrische Lebewesen nehmen Wasser und Sauerstoff aus verschiedenen Quellen mit unterschiedlichem und schwankendem  $\delta^{18}$ O auf. Aquatisch lebende Tiere beziehen 98 % ihres Wassers über die Haut. Größere Gewässer vermischen und egalisieren den Eintrag einzelner Regelfälle und Zuströme und zeigen deshalb wie die in ihnen lebenden Tiere eine sehr gleichmäßige Zusammensetzung.



Abbildung 7: Kohlenstoff- und Standardabweichung des Sauerstoffverhälnisses der Fayoum-Fossilien verglichen mit rezenten und fossilen Säugetieren. (Liu 2008)

Die an jeweils fünf Proben von von *Barytherium* und *Moeritherium* bestimmte Standardabweichung  $\sigma \delta^{18}$ O liegt unter .5 ‰ und damit im eindeutig aquatischen Bereich. Abbildung 7 und Tafel 6 zeigen den vergleich mit rezenten Lebewesen und mit Fossilien vom gleichen Fundort.

# 4 Körpergewebe, $^{13}$ C und $^{15}$ N

### 4.1 Die Grundlagen der Methode

(Ambrose 1986, Ambrose 1993, Minagawa 1984, Schoeninger 1984, Tauber 1981)

### 4.1.1 Kohlenstoff <sup>13</sup>C

Kohlenstoff wird von Pflanzen aus dem Kohlendioxid der Luft gebunden und von Tieren mit der Nahrung aufgenommen. Das schwere Isotop <sup>13</sup>C ist in der Luft im Vergleich zum Meerwasser (dem größeren Reservoir) um rund 7,7 ‰ abgereichert. Für Wasserpflanzen und -tiere liegt  $\delta^{13}$ C bei  $-10 \div -18$  und für die meisten terrestrischen Pflanzen bei  $-22 \div -30$ . Pflanzenfresser reichern <sup>13</sup>C der Nahrung um etwa 5 ‰ an und Fleischfresser um  $0 \div 5$ ‰ (Tafel 7a). Andere Quellen sprechen von 1 ‰ pro Schritt in der Nahrungskette.



**Abbildung 8:** Kohlenstofffraktionierung verschiedener Nahrungsketten (a) und erwartete Kollagenwerte für verschiedene Ernährungen (b)

Eine Sonderstellung nehmen die C4-Pflanzen und die CAM-Pflanzen ein. Der C4-Metabolismus entstand ursprünglich vor ca. 30 Ma im Oligozän als Anpassung an niedrige  $CO_2$ -Konzentrationen. Daneben bietet er Vorteile bei Hitze, Trockenheit und starker Sonnenstrahlung. Die wichtigsten C4-Pflanzen sind Zuckerrohr, Mais,

Hirse und, indirekt über Weidetiere, Savannengräser. C4-Pflanzen reichern <sup>13</sup>C nur auf  $-10 \div -18 \%$  ab und sind deutlich getrennt von C3-Pflanzen. Je nach Fragestellung handelt es sich also um ein klares Signal oder ein starkes Störsignal. In den mittleren Breiten spielt C4 keine Rolle und  $\delta^{13}$ C ist ein Indikator für aquatische oder terrestrische Ernährung. In den terrestrischen Tropen und Subtropen erlaubt er eine Unterscheidung zwischen Wald und Savanne oder zwischen Gräsern und Früchten, Blatt- und Knollenpflanzen.

Einen dritten Pfad der Kohlenstoffixation stellen die CAM-Pflanzen als Anpassung an extreme Aridität. Sie nehmen über Nacht  $CO_2$  auf, speichern es und setzen es tagsüber mit Sonnenlicht um. Das erlaubt es ihnen am Tage die Stomata geschlossen und den Wasserverlust sehr gering zu halten. Der bekannteste Vertreter ist die Ananas, für unsere Untersuchungen spielen sie normalerweise keine Rolle.

Attribute	C <sub>3</sub>	Photosynthetic Pathway C <sub>4</sub>	САМ
Optimum temperature range for CO <sub>2</sub> Fixation (°C). <sup>a</sup>	15-25	30-45	~35
Minimum atmospheric CO <sub>2</sub> partial pressure for photosynthesis (parts per million). <sup>b</sup>	~50	~2	?
Photosynthetic rate under optimal conditions (mg of $CO_2$ per 10 cm <sup>2</sup> of leaf surface per hour). <sup>a</sup>	15-35	4080	0.5-0.7
Light saturation (the level of light intensity for maximum photosynthetic rate, as % of full sunlight).	10–25	>100	>100
Water use efficiency (grams of water used to synthesize one gram of plant matter).	380–900	250–350	50
δ <sup>13</sup> C%. <sup>c</sup>	-19 to -35%	-9 to -15%	-9 to -30%?

 $^{a}C_{4}$  and CAM plants are highly efficient in transforming atmospheric CO<sub>2</sub> to plant matter in hot, bright and dry environments because the decarboxylation enzyme used (phosphoenol pyruvate carboxylase) functions at these temperatures and has a strong affinity for CO<sub>2</sub>. The high rate of CO<sub>2</sub> fixation in C<sub>4</sub> plants largely accounts for the remarkably high productivity of such crops. C<sub>3</sub> plants photosynthesize optimally in cool, moist, and shaded environments. Their decarboxylation enzyme (ribulose biphosphate carboxylase) functions optimally at lower temperatures but has a lower affinity for CO<sub>2</sub>.

<sup>b</sup>The ability of  $C_4$  plants to fix  $CO_2$  at low partial pressures permits greater stomatal closure, which lowers water loss from leaf surfaces, raising water use efficiency and drought tolerance. Under water stress  $C_3$  plants must close their stomata and stop  $CO_2$  fixation; hence they have lower water use efficiency.

<sup>c</sup>CAM (Crassulacean Acid Metabolism) plants are adapted to very dry environments, including water-stressed arboreal microhabitats in forests. Depending on environmental conditions they use  $C_3$  and/or  $C_4$  photosynthetic pathways. Hence their wide range of  $\delta^{13}$  values.

 

 Tabelle 2: Vergleich der Pflanzen mit dem C3-, C4- und CAM-Pfad für die Kohlenstoffixation (Ambrose 1993)

#### 4.1.2 Stickstoff <sup>15</sup>N

Stickstoff ist mit 0,03 % Massenanteil an der Erdhülle ein im Boden und Wasser recht seltenes Element. Er wird durch Gewitter und symbiotische Mikroorganismen aus der Luft gebunden und als anorganische Verbindung mit der Bodenfeuchte von Pflanzen aufgenommen. Die Konzentration seines schweren Isotopes  $\delta^{15}N$  wird

relativ zur Umgebungsluft bestimmt. In Pflanzen beträgt  $\delta^{15}N = -1 \div 12\%$ , bei sybiotischen Stickstoffixierern wie den Leguminosen etwa 5‰ weniger als bei den übrigen. Andere Lebewesen nehmen Stickstoff ausschließlich über die Nahrung auf und reichern ihn pro Schritt in der Nahrungskette um 3‰ an. Die Ausgangswerte streuen dabei beträchtlich und eine Aussage erfordert deshalb immer Vergleichsproben aus derselben Region und Zeitstellung.



Abbildung 9:  $\delta^{15}$ N-Werte verschiedener Tier- und Pflanzengruppen (Schoeninger 1984)

Beim Vergleich von Tier- und Pflanzennahrung ist zu beachten, daß pflanzliche Öle und Kohlenhydrate völlig frei von Stickstoff sind. Pflanzliche Nahrung im Sinne der Isoptopenuntersuchung sind nur pflanzliche Proteine in z. B. Vollkorngetreide, Leguminosen und Nüssen, die in eigenes Protein umgewandelt werden. Pflanzenprodukte, die zwar zur Energie- nicht aber zur Eiweißversorgung dienen, bleiben unentdeckt und tragen zum Ergebnis der "reinen Fleischnahrung" vieler Untersuchungen des Paläo- und Mesolithikums bei.

#### 4.1.3 Vergleich afrikanischer Populationen

(Ambrose 1986) Einen frühen Test der Methode führte Ambrose 1986 an insgesamt 97 historischen und prähistorischen Knochenproben aus Südafrika durch. Die Ergebnisse konnten die bekannten oder vermuteten Ernährungsweisen zuverlässig reproduzieren.



**Abbildung 10:** Isotopenmessungen an historischen und prähistorischen Populationen in Südafrika (Ambrose 1986)

### 4.2 Australopithecus und Paranthropus

(Sponheimer 1999, Ambrose 2006, Sponheimer 2006, Gibbons 2008) An den mehrere Millionen Jahre alten Fossilien haben sich Eiweiße zur Stickstoffbestimmung nicht erhalten. Es sind aber im Zahnschmelz Kohlenstoffbestimmungen möglich. Als ein neues Verfahren erlaubt es dabei der Laserabtrag, gezielt Werte einzelner Perikymata zu erfassen und damit die Variabilität über der Lebenszeit (Ambrose 2006, Sponheimer 2006, Tafel 9a). Damit wurden vier Zähne eines 1,8 Ma alten Paranthropus robustus aus Swartkrans, Südafrika, und zum Vergleich die ähnlich alter blattfressender Herbivoren (Raphicerus sp.) untersucht. Die Werte des Paranthropus lagen durchweg niedriger und wiesen eine sehr viel größere Streuung auf. Im Widerspruch zu früheren Annahmen, Paranthropus, "Nußknacker", sei ein ausgeprägter Nahrungsspezialist gewesen, hat er offenbar ein breites Spektrum mit hohem C4-Anteil, Grassamen und Seggenknollen, genutzt<sup>4</sup>. Das unterscheidet ihn von Schimpansen in savannenartigem Umfeld und verbindet ihn mit den Pavianen. Grasartige Pflanzen mit 80 % ihrer Biomasse unter der Erde bieten auch der Trockenzeit einen hohen Nährwert, der für Weidetiere nicht verfügbar ist. Ob und in welchem Maße neben der Pflanzennahrung auch höherwertige tierische Proteine wie Insekten(-larven) oder Weidejungtiere zu dem C4-Signal beitrugen, kann nicht entschieden werden.

Die <sup>13</sup>C-Werte für je einen Zahn<sup>5</sup> von vier 3 Ma alten Individuen von Australopithecus africanus aus dem Kalktagebau Mapansgat, Südafrika, weisen eine ähnlich

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Die tatsächliche Streuung ist noch sehr viel größer, denn jeder Meßwert bildet den Mittelwert für mehrere Monate ab (Tafel 9a)

 $<sup>^5 \</sup>mathrm{Diese}$ älteren Daten wurden ohne zeitliche Auflösung für den ganzen Zahn erfaßt.



Abbildung 11: <sup>13</sup>C im Zahnschmelz von *Paranthropus robustus* (Sponheimer 2006), PKM: Perikymata, Laufzeit in Tagen abgeschätzt mit ca. 7 Tagen pro Perikymatum

große Streuung und ebenfalls ein C4-Signal auf (Tabelle 4). Dies überrascht, denn *A. africanus* bewohnte noch eine deutlich stärker bewaldete und feuchtere Umwelt. Entweder waren also die Wurzeln eine Ausweichmöglichkeit für Trockenzeiten oder es wurden bereits tierische Eiweiße genutzt. Die Gleichheit des Nahrungsspektrums zeigt im übrigen, daß *A. africanus* und *Paranthropus* keine divergierenden Zweige darstellen sondern daß *Paranthropus* dieselbe Nahrung effizienter nutzen konte. Sein Erscheinen fällt zeitlich mit dem Verschwinden von *A. africanus* zusammen. Untersuchungen des Zahnverschleißes zeigen überdies, daß der größte Teil der Nahrung von *Paranthropus* weich gewesen sein muß. Die anatomische Anpassung und der aus ihr resultierende Vorteil zeigen demnach nicht, was er hauptsächlich aß, sondern was er in Notzeiten essen konnte (Gibbons 2008).

### 4.3 Ernährung des Neanderthalers

(Richards 2000) An den 28,0 ka bp und 29,1 ka bp alten Knochen zweier Individuen aus der Vindijahöhle in Kroatien – den jüngsten bisher direkt datierten Proben – wurden als Nebenprodukt der Datierung die Werte der stabilen Isotope gewonnen. Als Vergleich standen Faunenreste aus derselben und einer etwas älteren Schicht zur Verfügung. Die Daten bestätigen die bestehende Einordnung an die Spitze der Nahrungskette. Die Neanderthaler scheinen ihren gesamten Eiweißbedarf aus tierischem Protein gedeckt zu haben und dürften somit erfolgereiche Jäger und nicht bloß Aassammler gewesen sein. Die Stickstoffwerte von Mammut und Höhlenbär konnten bisher nicht zufriedenstellend erklärt werden.



Abbildung 12: Isotpenwerte an zwei Neanderthalindividuen und Faunenreste aus der Vindijahöhle, Kroatien (Richards 2000). Vi Vindija, Kroatien; Br Brno-Francouzská, Dv Dolní Věstonice II, Ml Milovice, Tschechien

### 4.4 Wanderung oder Seßhaftigkeit am Cape von Südafrika

(Sealy 1985) Am südwestlichen Cape von Südafrika gibt es im Holozän vier sich in Nord-Süd-Richtung erstreckende Klimazonen: die Atlantikküste, die gemäßigte Küstenebene, die Fold Bergkette und die Halbwüste des Karoo. Die Besiedlungsspuren von Fundplätzen in Küstennähe weisen vor allem auf den Winter, die in den Bergen auf Besiedlung im Sommer hin. J. E. Parkington schloß daher auf eine saisonale Mobiltät zwischen den Plätzen.

Isotopenuntersuchungen an Knochen<sup>6</sup> von achtzehn Individuen aus küstennahen und Inlandsbestattungen<sup>7</sup> widersprechen dieser Hypothese. Die Werte für  $^{13}C$ 



Abbildung 13: Verteilung der  $\delta^{13}$ C-Werte aus dem südwestlichen Cape, Südafrika (Sealy 1985)

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Es wird nicht gesagt, was untersucht wurde, vermutlich Kollagen.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Das Alter der Funde liegt zwischen 10 und weniger als 2 ka.

entsprechen entweder einer klar marinen oder im Inland einer klar terrestrischen Ernährung<sup>8</sup> und nicht dem Mittelwert, der bei Saisonalität zu erwarten wäre.

### 4.5 Präneolithische Besiedlung des Tropenwaldes in Malaysia

(Krigbaum 2007) Dichter tropischer Regenwald vermag allenfalls sehr geringe Bevölkerungsdichten zu tragen. Es wird sogar vermutet, das Vordringen von Jägern und Sammlern sei ein junges, neolithitisches Phänomen, weil sie ohne Unterstützung von Ackerbauern und Versorgung mit Kohlehydraten dort nicht ganzjährig leben konnten (Bailey 1989 nach Krigbaum 2007, 19).

In zwei Höhlen in Malaysia, Niah auf Borneo und Gua Cha auf der Malaysischen Halbinsel, wurden präneolithische und neolithische Bestattungen untersucht (Karte: Tafel 11). Keines der präneolithischen Skelette konnte datiert werden, der Übergang vollzog sich um 3000 bp. Für das Neolithikum ist Ackerbau auf Freiflächen nachgewiesen, ob bereits so früh Reis (eine C3-Pflanze) kultiviert wurde, konnte bisher nicht entschieden werden. Weil sich Kollagen im feuchtwarmen Klima nicht erhält wurde der Zahnschmelz isotopisch untersucht. Die präneolithischen Zähne weisen zusätzlich zum C3-Wert eine weitere Absenkung für <sup>13</sup>C auf, die mit dem Baldachineffekt dichter Wälder erklärt werden kann (siehe Tafel 7b). Demnach ist das Innere der dichten Wälder dort schon vor der Ankunft des Ackerbaus genutzt worden.



**Abbildung 14:** Mittelwerte und Standardabweichungen von <sup>13</sup>C und <sup>18</sup>O für neolithische und präneolithische Bestattungen in Malaysia (Krigbaum 2007)

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Offenbar leisten C4-Pflanzen soweit im Süden keinen nennenswerten Beitrag.

### 4.6 Übergang vom Meso- zum Neolithikum am Eisernen Tor

(Boric 2004) Die Fundplätze von Vlasac und Lepenski Vir liegen am Eisernen Tor an der serbisch-rumänischen Grenze. Beide Siedlungen waren vom Spätmesolithikum bis zum Frühneolithikum permanent bewohnt und es sind zahlreiche Bestattungen bekannt. Von den 97 untersuchten Individuen konnten allerdings nur 25 datiert werden. An beiden Plätzen stellt der Fischfang die hauptsächliche Subsistenzgrundlage dar. Daneben fanden sich zahlreiche Hundeknochen mit Beabeitungsspuren. Der Verzehr von Hunden, die sich wiederum von Fischabfällen ernährten, könnte die teilweise außerodentlich hohen Werte für  $\delta^{15}$ N erklären (Tafel 12 und Abb. 15). Die Grenze zum Neolithikum ist schwach ausgeprägt und spricht für einen eher graduellen Übergang. In der Graphik wirken die Unterschiede allerdings auch deshalb klein, weil Borić alle Balken bei null beginnen läßt.



**Abbildung 15:** Neolithisierung in Vlasac und Lepenski Vir anhand der Messungen für  $\delta^{15}N$  und  $\delta^{13}C$  (Boric 2004). LV Lepenski Vir, HV Hajdučka Vodenica, P Padina, V Vlasac, SC Schela Cladovei.

### 4.7 Neolithisierung in Britannien und Dänemark

#### Dänemark

(Tauber 1981) Die erste Anwendung der Isotopenanalyse zur Unterscheidung mariner von terrestrischer Ernährung ist die von Henrik Tauber aus dem Jahr 1981 (Ambrose 1993, 62). Er beobachtete mit der Neolithisierung einen schlagartigen Wandel zu rein terrestrischer Ernährung, der bis ins Mittelalter anhielt und erst danach wieder von marinen Ressourcen ergänzt wurde. Bemerkenswert ist, daß alle acht seiner neolithischen Daten von Fundplätzen in wenigen hundert Metern Entfernung zur Küste stammen.



Abbildung 16: Rascher Wandel der Subsistenz mit dem Beginn des dänischen Neolithikums (Tauber 1981)

#### Britannien

(Richards 2003a, Richards 2003b)Für die britische Insel fand Richards ebenfalls eine rasche und vollständige Umwandlung von mariner auf rein terrestrische Ernährung.



**Abbildung 17:** Abrupter und vollständiger Wandel im britischen Neolithikum (Richards 2003a) Die unkalibrierten mesolithischen Daten enthalten den nicht sicher anzugebenden marinen Reservoireffekt. ×: Inland, □: maximal 10 km von der Küste.

### 4.8 Erkennen von Milchwirtschaft

(Millard 2000, Craig 2003, Copley 2003) Ein bislang weitgehend ungelöstes Problem ist das Erkennen des Übergangs von der Rinderhaltung als Schlachtvieh und möglicherweise Zugtier zur Milchwirtschaft. Ein direkter Nachweis der charakteristischen Milchfette und -proteine scheitert in der Regel an mangelnder Erhaltung. Andrew Millard hat versucht, die Stickstoffbilanz zu berechnen. Ausgehend von einer gesamten trophischen Anreicherung von  $\delta^{15}N = 3,5\%$  und einer Abreicherung im Urin von  $\delta^{15}N = -6,5\%^9$  stellt er fest, daß die zusätzliche Ausscheidung nicht abgereicherter Stickstoffverbindungen zum Beispiel mit der Milch den Gehalt im Körper senken muß. Auf dieser Basis errechnete er den Stickstoffzyklus für Kühe und Kälber (Tafel 13 und 14). Das Ergebnis seiner Rechnung stellt er Meßwerten gegenüber, die von Balasse 1997 für den neolithischen Fundplatz Bercy, Paris, veröffentlicht wurden. Trotz der großen Ungenauigkeit bei der Altersbestimmung schließt er im Widerspruch zu Balasse, die Ergebnisse seien mit gezielt früher Entwöhnung und Kälbermast unvereinbar.

Einen völlig anderen Weg geht Copley 2003. Er betrachtet die 16- und 18-kettigen vollständig gesättigten Fettsäuren  $(C_{16:0} \text{ und } C_{18:0})^{10}$ , die sich bei starker Degradation

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Demnach wird Stickstoff bei der Aufnahme aus der Nahrung nicht an-, sondern um rund  $\delta^{15}N = -3\%$  abgereichert, dann aber im Körper bevorzug zurückgehalten.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Der erste Index beschreibt die Länge der Kette als Anzahl der Kohlenstoffatome, der zweite die Zahl der Doppelbindungen.



Abbildung 18: Modellrechnung für den Stickstoffzyklus und Vergleich mit Meßwerten aus Bercy, Paris (Millard 2000). Zeiträume der Zufütterung: durchgezogen: früh, 0,5–8 Monate, gestrichelt: mäßig, 2–8 Monate, kurz gestrichelt: natürlich, 4–9 Monate, strichpunktiert: spät, 6–9 Monate

am besten erhalten. Körperfette werden vor allem aus den Kohlehydraten der Pflanzen mit  $\delta^{13}C = -27.0 \pm 2.0 \%$  synthetisiert und weisen dann  $\delta^{13}C = -31.7 \pm 0.8 \%$  auf. Derselbe Wert gilt auch für die  $C_{16:0}$  Fettsäuren der Milch.  $C_{18:0}$  kann von den Milchdrüsen aber nicht synthetisiert werden. 60 % der  $C_{18}$ -Fettsäuren in der Milch gehen deshalb direkt vom Pansen als unveränderte Pflanzenbestandteile mit  $\delta^{13}C = -35.5 \pm 2.4 \%$  in die Milch über, der Rest aus dem Körperfett.  $C_{18:0}$ -Fettsäuren in Milch sind deshalb gegenüber Körperfett um 3,3 ‰ abgereichert (Tafel 15a). Die



**Abbildung 19:** Abreicherung von <sup>13</sup>C in  $C_{18:0}$ -Fettsäuren der Milch relativ zu  $C_{16:0}$  (Copley 2003)

konkreten Werte für  $\delta^{13}\mathsf{C}$  hängen vom Futter ab und weichen zwischen rezenten und historischen Proben möglicherweise ab, die Abreicherung um 3,3 % und der Unterschied zwischen  $\mathsf{C}_{16:0}$  und  $\mathsf{C}_{18:0}$ -Fettsäuren in dieser Höhe bleibt aber erhalten.

Die Ergebnisse (Tafel 15b) belegen die Milchwirtschaft für frühneolithische Fundstellen in Britannien. Aufgrund der Alters- und Geschlechtsverteilung der Rinder war sie für Britannien ohnehin schon mit der Ankunft des Neolithikums im vierten Jahrtausend BC angenommen worden. Anzumerken ist noch, daß die Keramikuntersuchungen keine Aussage über die relative Bedeutung von Milch- und Fleischprodukten erlauben, weil beide nicht in gleichem Maße in Keramikgefäßen zubereitet wurden.

### 4.9 Unterschiede im Fleischkonsum zwischen Hinkelstein und Großgartach im Gräberfeld von Trebur

(Dürrwächter 2003a, Dürrwächter 2003b, Dürrwächter 2006) Auf dem birituell belegten mittelneolithischen Gräberfeld von Trebur, Kreis Groß Gerau, wurden 79 Bestattungen der Hinkelsteiner und 58 der Großgartacher Kultur ausgegraben. Die zeitliche Abfolge ist unklar. H. Spatz hält Hinkelstein für die ältere und führt an, die Entstehung der Großgartacher Kultur sei nur über die Genese von Hinkelstein plausibel erklärbar. Dem hält J. Müller neben den neubearbeiteten <sup>14</sup>C-Daten entgegen, daß einige deutlich erkennbare Gräberreihen über die Arealgrenze der Kulturen hinauslaufen – ein Indiz für zeitgleiche Belegung (Dürrwächter 2003a, 44).



Abbildung 20: Isotopenwerte für Hinkelstein und Großgartach aus Trebur und Linearbandkeramik aus Herxheim (Dürrwächter 2003b)

Große Unterschiede gibt es bei den jeweiligen Grabbeigaben. In Hinkelstein sind es zahlreiche Tierknochen, teilweise wurden den Gräbern ganze Thoraxhälften von Schwein, Schaf oder Rind beigegeben. Echte und imitierte Hirschgrandeln weisen auf eine hohe Bedeutung der Jagd hin. In Großgartach sind Tierknochen selten, dafür sprechen häufiger vorkommende Klingen mit Lackglanz für einen intensiv betriebenen Feldbau. Man ging deshalb bislang von einen deutlich höheren Fleischkonsum der Hinkelsteiner Kultur aus. Zur Überprüfung wurden an Knochenkollagen von je 20 Individuen der Hinkelsteiner und Großgartacher Kultur die Isope bestimmt. Als Vergleich wurden 21 Individuen des spätbandkeramischen Gräberfeldes von Herxheim gemessen. Im Ergebnis stimmern die Stickstoffwerte von Hinkelstein und Großgartach exakt überein. Die Streuung über beide Gruppen ist insgesamt kleiner als die aus Herxheim, was damit erklärt wird, daß Herxheim mit mindestens 448 Individuen aus 50–70 Jahren allein in der Südhälfte vermutlich von mehreren Siedlungen belegt wurde.

Als Beweis dafür, daß die Methode zuverlässige Ergebnisse liefert kann die Kontrolle dienen, bei der Männer und Frauen getrennt erfaßt wurden (Tafel 17). In beiden Treburer Kulturen liegt der Fleischkonsum der Männer deutlich höher, in der Linearbandkeramik ist der Unterschied weit schwächer ausgeprägt. Ein möglicher Unterschied von Fleisch in der einen und Milchprodukten in der anderen Gruppe wäre in den Isotopen nicht erkennbar.

### 4.10 Ernährungsunterschiede auf einem Gräberfeld der Römerzeit

(Richards 1998) Das große Gräberfeld von Poundbury nahe der römischen Stadt Durnovaria (Karte: Tafel 16b) enthält 59 Bestattungen aus der späten Eisen-/frühen Römerzeit (1. Jh. CE), 1114 aus der späten Römerzeit (4. Jh. CE) und drei nachrö-



(a) Verteilung aller Proben





mische (5.–7. Jh. CE). Von den spätrömischen Bestattungen waren ein Teil in 11 Mausoleen beigesetzt, 26 in bleibeschlagenen Särgen außerhalb der Mausoleen und die übrigen in Holzsärgen.

Die eisenzeitliche Ernährung ist rein terrestrisch und fällt zwischen rezente Herbiund Carnivoren.<sup>11</sup> Die spätrömischen Holzsärge zeigen einen im Mittel höheren Fleischkonsum und insgesamt eine große Streuung<sup>12</sup>. Die in den Mausoleen Bestatteten besaßen vermutlich hohen Rang. Ihre Ernährung weicht deutlich von den übrigen ab und spricht für einen mediterranen Typus mit Fisch, Austern und Garum. Die drei Individuen in Bleisärgen entsprechen etwa denen aus den Mausoleen.

### 4.11 Einheimische oder Fremde in einem Massengrab in Peru

(Verano 1993) Am Fuß eines Grabens im Fundplatz Pacatnamu, Nordperu, wurde 1984 ein Massengrab mit 14 adoleszenten und jungadulten Männern in drei getrennten Gruppen gefunden. Alle wiesen Verletzungen und Spuren von vermutlich rituellen Mißhandlungen auf, waren gewaltsam zu Tode gekommen und danach offenbar



(a) Lage der Fundplätze

(b) Meßwerte aus dem Massengrab

Abbildung 22: Massengrab von Pacatnamu, Peru (Verano 1993); grau: Fauna, weiß: lokale Bestattungen, Größe der Kästen:  $2\sigma$ ;  $\blacktriangle$ : Gruppe 1,  $\triangle$ : Gruppe 2 und 3 aus dem Massengrab

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>Kontemporäre Vergleichswerte liegen nicht vor.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Ein Individuum hat neben deutlich marinen Werten mit  $\delta^{15}N = 12,1 \%$  den höchsten Stickstoffwert. Er war außerordentlich groß und robust und ähnelte den Individuen in den Mausoleen.

längere Zeit (Wochen bis Monate) unbedeckt liegengeblieben. Es stellt sich die Frage, ob es sich um Einheimische oder um Fremde handelt. Bei Fremden gibt es zwei mögliche Herkunftsorte, das Chicamatal im Süden, zwischen dem und Pacatnamu die Nordgrenze des Chimúreiches verlief, und Cajamarca in den Bergen im Osten. Für den letztgenannten sprechen leichte aber nicht zwingende Hinweise in der cranialen Morphologie. Näheren Aufschluß sollte die Ernährungsweise bieten.

Die Bewohner von Pacatnamu zeigen entsprechend der Küstenlage eine Mischung aus C3 und C4-Pflanzen sowie einen deutlich marinen Einfluß im Isoptopspektrum. Für die südliche Küste wird ähnliches erwartet während Inlandsfundplätze in Peru rein terrestrische Ernährung zeigen. Die Streuung der Bestattungen aus Pacatnamu und in im Massengrab lassen eine statistisch signifikante Aussage nicht zu. Sechs der Individuen aus Gruppe 2 und 3 liegen jedoch deutlich außerhalb der  $2\sigma$ -Grenze und lassen eine Herkunft aus dem Inland als möglich erscheinen.

### 4.12 Kinderopfer der Incas

(Wilson 2007) Die drei Kinder vom Llullaillaco zeigen im letzten Lebensjahr einen deutlichen Anstieg des Fleischkonsums und einen Wechsel zu C4, wohl Mais aus dem Tiefland, eine Oberschichtkost. Saritas Werte bleiben nahezu konstant bei mäßigem Fleischkonsum und hohem C4-Anteil. Besonders stark ausgeprägt ist der Wechsel bei Llullaillaco Maiden etwa ein Jahr vor ihrem Tod. Historische Quellen deuten an, daß Opfer vor allem aus der Oberschicht stammen sollten. Möglicherweise wurde ein Bauernkind in die Hauptstadt gebracht und zum Mitglied der Oberschicht gemacht, um dann als angemessenes Opfer dienen zu können. Der Anstieg von  $\delta^2$ H im vorletzten Lebensjahr könnte einen Wechsel vom armen Hochland ins bevorzugte Tiefland anzeigen (Abb. 6a in Kapitel 3.3)



Abbildung 23: Isotopenverhältnisse der Incakinder, <sup>15</sup>N<sub>Luft</sub> und <sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> über der Haarlänge in cm (Wilson 2007)

## 5 Fehler und Grenzen der Methode

### 5.1 Die Notwendigkeit von Vergleichsdaten

(Ambrose 1993) Die Umgebungs- und Nahrungswerte für  $\delta^{15}N$  und  $\delta^{13}C$  schwanken regional und über lange Zeiträume in einem weiten Bereich (Abb. 9, Tafel 7b, 8, 18). Es ist daher generell unmöglich aus den absoluten Meßwerten für  $\delta^{15}N$ 



**Abbildung 24:** Schwankungsbreite für  $\delta^{15}N$  und  $\delta^{13}C$  in terrestrischer Flora und Fauna (Ambrose 1993)

und  $\delta^{13}C$  sinnvolle Schlüsse zu ziehen sondern stets nur im Vergleich zu Werten anderer Populationen oder von Fauna derselben Region und Zeitstellung. In den hier vorgestellten Beispielen wurden deshalb fast immer auch Faunenwerte erfaßt.

### 5.2 Kollagen und seine Degradation

(DeNiro 1985, Balzer 1997, Bocherens 1997) Die erste Anwendung der Isotopenmessung zur Bestimmung der Ernährung war die zum Maisanbau im Staat New York von J. C. Vogel (Vogel 1977). Es folgten zahlreiche weitere wie Tauber 1981 (Kapitel 4.7)und Ambrose 1986 (Kapitel 4.1.3). Während die Grundlagen, die Isotopenverhältnisse der verschiedenen Nahrungsquellen und die Anreicherungsfaktoren in der Nahrungskette gut untersucht und verifiziert waren, blieb die dritte Grundannahme, daß aus prähistorischen Funden gewonnenes Kollagen unverändert das ursprüngliche Isotopenverhältnis widerspiegelt, zunächst ungeprüft.



**Abbildung 25:** Vergleich prähistorischer Faunendaten mit rezenten Normalbereichen (DeNiro 1985), terrestrische Herbivoren  $\circ$ , Marine Karnivoren mit Wirbeltier-  $\diamond$  und Breitspektrumnahrung  $\triangle$ , gefüllte Symbole bezeichnen Proben mit C:N $\neq$ 2,9–3,6, Größe der Kästen  $2\sigma$ 

Kollagen ist das Struktureiweiß der Bindegewebe und im geamten Tierreich nahezu gleich aufgebaut. Es gibt achtzehn Typen, von denen aber bis auf Spuren in den Knochen nur der Typ I vorkommt. Im folgenden ist also mit Kollagen stets der Kollagen Typ I gemeint. Es ist dort besonders stabil und in der Regel die einzige Eiweißverbindung, die aus alten Funden noch gewonnen werden kann. Alle Aminosäuren haben mindestens ein Stickstoffatom in der Aminogruppe, die meisten genau eines und nur zwei, Arginin und Histidin, mehr als zwei. Sie haben mindestens ein aber meist sehr viel mehr Kohlenstoffatome. Im Vergleich zu anderen Eiweißen ist Kollagen sehr reich an der besonders kurzen Aminosäure Glycin, sein Verhältnis Kohlenstoff zu Stickstoff liegt deshalb bei allen Tieren zwischen 2,9 und 3,6. Mikroben, die Kollagen abbauen, brauchen zwar auch Stickstoff für das eigene Körperprotein, vor allem aber Kohlenstoff als Energiequelle. Sie bauen deshalb bevorzugt die größeren Aminosäuren ab und stark degradiertes Kollagen hat Verhältnisse von C:N von in der Regel deutlich kleiner als 2,9.

1985 überprüfte Michael DeNiro als erster die Brauchbarkeit und die Erhaltung des Kollagens prähistorischer Faunenreste und die Anwendbarkeit des C:N Verhältnisses als Kriterium. Bocherens extrahierte 1997 Kollagen aus mesolithischen Menschenknochen aus der Ofnethöhle, Bayern, mit zwei verschiedenenen Verfahren, die unterschiedlich gut nicht degradiertes Kollagen reinigen konnten. In beiden Fällen konnte das C:N-Kriterium für brauchbares Material bestätigt werden (Abb 25 und Tafel 19).

### 5.3 Experimentelle Degradation mit Bodenbakterien

(Balzer 1997) Während die bisherigen Kontrollen rein beobachtend waren, ließ die Gruppe um Gisela Grupe das Kollagen in Knochenproben kontrolliert von kultivierten Bodenbakterien abbauen. Neben reiner Nährlösung zogen sie die Kulturen auch unter Zusatz von Pflanzenmaterial von Weizen (C3), Mais (C4) oder Erbsen (Leguminose)



Abbildung 26: Isotopenwerte nach kontrollierter Degradation (Balzer 1997)

heran. Wie zu erwarten wurden von allen Kulturen vor allem die großen Aminosäuren und nicht Glycin abgebaut. Das Verhältnis Glycin zu Prolin wurde von 30:25 auf 38:17 bis 44:8 vergrößert (Tafel 20).

Einige der Kulturen mit Nährstoffzusätzen ergaben aber ein degradiertes Kollagen mit C:N-Verhälissen in der Nähe der Kontrollprobe. Für eine sichere Kontrolle der Verwendbarkeit einer Kollagenprobe reicht also das C:N-Verhältnis allein nicht aus, sondern es ist dringend angeraten auch das Verhältnis von Prolin zu Glycin zu bestimmen.

## Literaturverzeichnis

#### Ambrose 1986

STANLEY H. AMBROSE & MICHAEL J. DENIRO, Reconstruction of African human diet using bone collagen carbon and nitrogen isotope ratios. nature **319** (1986), 321–324.

#### Ambrose 1993

STANLEY H. AMBROSE, Isotopic Analysis of Paleodiets: Methodological and Interpretative Considerations. In: MARY K. SANDFORD (Hrsg.), Investigations of Ancient Human Tissue, Chemical Analyses in Anthropology. Food and Nutrition in History and Anthropology 10 (Langhorne / Berlin 1993), 59–130.

#### Ambrose 2006

STANLEY H. AMBROSE, A Tool for All Seasons. science **314** (2006), 930–931. Balzer 1997

A BALZER, In vitro decomposition of bone collagen by soil bacteria: the implications for stable isotope analysis in archaeometry. Archaeometry **39** (1997), 415–429.

#### Bocherens 1997

H. BOCHERENS, GISELA GRUPE, A. MARIOTTI & SUSANNE TURBAN-JUST, Molecular preservation and isotopy of Mesolithic human finds from the Ofnet cave (Bavaria, Germany). Anthropologischer Anzeiger **55** (1997), 121–129.

#### Boric 2004

DUŠAN BORIĆ, GISELA GRUPE & JORIS PETERS, Is the Mesolithic-Neolithic subsistence dichotomy real? New stable isotope evidence from the Danube Gorges. European journal of archaeology 7 (2004), 221–248.

#### Budd 2003

PAUL BUDD, CAROLYN CHENERY, JANET MONTGOMERY & JANE EVANS, You are what you ate: isotopic analysis in the reconstruction of prehistoric residency. In: MIKE PARKER PEARSON (Hrsg.), Food, Culture and Identity in the Neolothic and Early Bronze Age. BAR International Series 1117 (Oxford 2003), 69–78.

#### Chenery 2007

CAROL CHENERY, The Amesbury Archer: Oxygen isotope analysis. (2008-05-10). http://www.wessexarch.co.uk/projects/amesbury/tests/oxygen\_isotope.html.

#### Copley 2003

M. S. COPLEY, R. BERSTAN, S. N. DUDD, G. DOCHERTY, A. J. MUK-HERJEE, V. STRAKER, S. PAYNE, & R. P. EVERSHED, Direct chemical evidence for widespread dairying in prehistoric Britain. PNAS **100** (2003), 1524–1529.

#### Craig 2003

OLIVER E. CRAIG, Dairying, dairy products and milk residues: potential studies in European prehistory. In: MIKE PARKER PEARSON (Hrsg.), Food, Culture and Identity in the Neolothic and Early Bronze Age. BAR International Series 1117 (Oxford 2003), 89–96.

#### DeNiro 1985

MICHAEL J. DENIRO, Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. nature **317** (1985), 806–809.

#### Dürrwächter 2003a

CLAUDIA DÜRRWÄCHTER, OLIVER E. CRAIG, GILLIAN TAYLOR, MATTHEW J. COLLINS, JOACHIM BURGER & KURT W. ALT, Ernährungsrekonstruktion in neolithischen Populationen anhand der Analyse stabiler Isotope: Trebur (HST/GG) und Herxheim (späte LBK). Berichte der Kommission für Archäologische Landesforschung in Hessen 7 (2003), 43–53.

#### Dürrwächter 2003b

DÜRRWÄCHTER, C., CRAIG, O.E., TAYLOR, G., COLLINS, M.J., BUR-GER, J. & ALT, K.W., Rekonstruktion der Ernährungsweise in der mittel- und frühneolithischen Bevölkerungen von Trebur/Hessen und Herxheim/Pfalz. Bull. Soc. Suisse d'Anthropologie **9** (2003), 1–16.

#### Dürrwächter 2006

DÜRRWÄCHTER C, CRAIG O E, COLLINS M J, BURGER J & ALT KW, Beyond the grave: variability in Neolithic diets in Southern Germany. Journal of Archaeological Science **33** (2006), 39–48.

#### Gibbons 2008

ANN GIBBONS, Australopithecus Not Much of a Nutcracker. science **320** (2008), 608–609.

#### Humphrey 2008

LOUISE T. HUMPHREY, M. CHRISTOPHER DEAN, TERESA E. JEFFRIES & MALCOLM PENN, Unlocking evidence of early diet from tooth enamel. PNAS 105 (2008), 6834–6839.

#### Krigbaum 2007

JOHN KRIGBAUM, Prehistoric Dietary Transitions, Stable Isotope and Dental Caries Evidence from Two Sites in Malaysia. In: MARK NATHAN COHEN & GILLIAN M. M. CRANE-KRAMER (Hrsg.), Ancient Health, Skeletal Indicators of Agricutural and Economic Intensification. (Gainesville 2007), 273–285.

#### Liu 2008

ALEXANDER G. S. C. LIU, ERIK R. SEIFFERT & ELWYN L. SIMONS, Stable isotope evidence for an amphibious phase in early proboscidean evolution. PNAS **105** (2008), 5786–5791.

#### Millard 2000

ANDREW R. MILLARD, An Evaluation of the Possible Use of Nitrogen Isotopes to Detect Milking in Cattle. In: GEOFF BAILEY, RUTH CHARLES & NICK

WINTER (Hrsg.), Human Ecodynamics, Proceedings of the Association for Environmental Archaeology conference 1998 held at the University of Newcastle upon Tyne. (Oxford 2000), 134–140.

#### Minagawa 1984

MASAO MINAGAWA & EITARO WADA, Stepwise enrichment of <sup>15</sup>N along food chains: Further evidence and the relation between  $\delta^{15}N$  and animal age. Geochimica et Cosmochimica Acta **48** (1984), 1135–1140.

#### Moore 2004

PETER D. MOORE, *Isotopic biogeography*. Progress in Physical Geography 28 (2004), 145–151.

#### Müller 2003

WOLFGANG MÜLLER, HENRY FRICKE, ALEX N. HALLIDAY, MALCOLM T. MCCULLOCH & JO-ANNE WARTHO, Origin and Migration of the Alpine Iceman. science **302** (2003), 862–866.

#### Nuklidkarte 1998

G. PFENNIG, H. KLEWE-NEBENIUS & W. SEELMANN-EGGEBERT, Karlsruher Nuklidkarte. <sup>6</sup>(Karlsruhe 1998).

#### Periodensystem 2002

EKKEHARD FLUCK & KLAUS G. HEUMANN, Periodensystem der Elemente.  $^{3}$ (Weinheim 2002).

#### Price 1998

T. DOUGLAS PRICE, GISELA GRUPE & PETER SCHRÖTER, Migration in the Bell Beaker period of central Europe. Antiquity **72** (1998), 405–412.

#### Radosevich 1993

STEFAN C. RADOSEVICH, The Six Deadly Sins of Trace Element Analysis: A Case of Wishful Thinking in Science. In: MARY K. SANDFORD (Hrsg.), Investigations of Ancient Human Tissue, Chemical Analyses in Anthropology. Food and Nutrition in History and Anthropology 10 (Langhorne / Berlin 1993), 269–332.

#### Richards 1998

M. P. RICHARDS, R. E. M. HEDGES, T. I. MOLLESON & J. C. VOGEL, Stable Isotope Analysis Reveals Variations in Human Diet at the Poundbury Camp Cemetery Site. Journal of Archaeological Science **25** (1998), 1247–1252.

#### Richards 2000

MICHAEL P. RICHARDS, PAUL B. PETTITT, ERIK TRINKAUS, FRED H. SMITH, MAJA PAUNOVIĆ, & IVOR KARAVANIĆ, Neanderthal diet at Vindija and Neanderthal predation: The evidence from stable isotopes. PNAS 97 (2000), 7663–7666.

#### Richards 2003a

MICHAEL P. RICHARDS, RICK J. SCHULTING & ROBERT E. M. HED-GES, Sharp shift in diet at onset of Neolithic. nature **425** (2003), 366.

#### Richards 2003b

MIKE P. RICHARDS, Explaining the dietary isotope evidence for the rapid adoption of the Neolithic in Britain. In: MIKE PARKER PEARSON (Hrsg.), Food, Culture and Identity in the Neolothic and Early Bronze Age. BAR International Series 1117 (Oxford 2003), 31–36.

#### Schoeninger 1984

MARGARET J. SCHOENINGER & MICHAEL J. DENIRO, Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. Geochimica et Cosmochimica Acta **48** (1984), 625–639.

#### Sealy 1985

JUDITH C. SEALY & NIKOLAAS J. VAN DER MERWE, Isotope assessment of Holocene human diets in the southwestern Cape, South Africa. nature **315** (1985), 138–140.

#### Sponheimer 1999

MATT SPONHEIMER & JULIA A. LEE-THORP, Isotopic Evidence for the Diet of an Early Hominid, Australopithecus africanus. science **283** (1999), 368–370.

#### Sponheimer 2006

MATT SPONHEIMER, BENJAMIN H. PASSEY, DARRYL J. DE RUITER, DEBBIE GUATELLI-STEINBERG, THURE E. CERLING & JULIA A. LEE-THORP, Isotopic Evidence for Dietary Variability in the Early Hominin Paranthropus robustus. science **314** (2006), 980–982.

#### Stone 2004

RICHARD STONE, Putting the Stone in Stonehenge. nature **304** (2004), 1889–1891.

#### Tauber 1981

HENRIK TAUBER, <sup>13</sup>C evidence for dietary habits of prehistoric man in Denmark. nature **292** (1981), 332–333.

#### Verano 1993

JOHN W. VERANO & MICHAEL J. DENIRO, Locals or Foreigners? Morphological, Biometric and Isotopic Approaches to the Question of Group Affinity in Human Skeletal Remains Recovered from Unusual Archaeological Contexts. In: MARY K. SANDFORD (Hrsg.), Investigations of Ancient Human Tissue, Chemical Analyses in Anthropology. Food and Nutrition in History and Anthropology 10 (Langhorne / Berlin 1993), 361–386.

#### Vogel 1977

J. C. VOGEL & NIKOLAAS J. VAN DER MERWE, Isotopic Evidence for Early Maize Cultivation in New York State. American Antiquity **42** (1977), 238–242.

#### Wilson 2007

ANDREW S. WILSON ET AL., Stable isotope and DNA evidence for ritual sequences in Inca child sacrifice. PNAS **104** (2007), 16456–16461.

## A Tafeln



**Tafel 1:** Lage der Glockenbecher-Gräberfelder und Strontiumwerte des Bodens in Bayern (Price 1998)



Tafel 2: Geologisch-lithologische Karte der Gegend rund um den Similaun (Müller 2003). Archäologische Fundstätten: BA, Barbian; FE, Feldthurns; IS, Isera; JU, Juval; KA, Katharinaberg; MT, Margreid-Tolerait; PK, Pigloner Kopf; VP, Villanders/Plunacker; VS, Völs. Heutige Städte: Br, Bruneck/Brunico; Bx, Brixen/Bressanone; Bz, Bozen/Bolzano; In, Innsbruck; La, Landeck; Me, Meran/Merano; Rv, Rovereto; Tn, Trento.



Tafel 3: Strontiumwerte aus Dentin und Schmelz der Milch- (grau) und bleibenden Zähne (weiß) der Bestattungen von Monkton (Budd 2003)
A Kind, B und D Jugendliche, C erwachsene Frau; gestrichelte Linie: Bodenwert der Gräber



**Tafel 4:** Bleiwerte aus Dentin und Schmelz der Milch- und bleibenden Zähne der Bestat-<br/>tungen von Monkton (Budd 2003)

A Kind, B und D Jugendliche, C erwachsene Frau



**Tafel 5:** Sauerstoffisotope des europäischen Regenwassers (Chenery )<sup>13</sup>

 $<sup>^{13}\</sup>mathrm{Es}$ ist mir nicht gelungen dieses oder ein vergleichbares Diagramm in akzeptabler Qualität zu finden



**Tafel 6:** Standardabweichungen  $\sigma \delta^{18}$ O für verschiedene aquatische und terrestrische Taxa und eozäne Fossilien aus Ägypten (Liu 2008)



(a) Nahrungskette

 $\mbox{Tafel 7:}$  Anreicherung von  $^{13}\mbox{C}$  in der Nahrungskette (a) und bodennahe Abreicherung



Tafel 8: Kohlenstoffisotope für verschiedene Faunengruppen (Schoeninger 1984)



(a) Laserabtrag von Zahnschmelz

(b) Daten für <sup>13</sup>C und <sup>18</sup>O

Tafel 9: Laserabtrag von Zahnschmelz bei Paranthropus robustus (Sponheimer 2006).
(a): Die fünf Spuren A bis E überdecken 22 Perikymata (die feinen Linien rechts im Bild) und damit etwa 160 Tage. Länge des weißen Balkens: 1 mm. (b): Ergänzende Daten für <sup>18</sup>O

	( / vol)	kange	SD	n
C <sub>4</sub> plant consumers				
Hipparion lybicum	-0.8	0.2 to -2.0	0.9	5
Notochoerus capensis	-0.8	−0.6 to −1.0	0.3	2
Parmularius braini	0.7	1.2 to -0.2	0.7	4
<i>Parmularius</i> sp. nov.	0.7	1.3 to -0.2	0.8	3
Redunca darti	-1.3	1.3 to – 4.5	2.4	4
C <sub>3</sub> plant consumers				
Aepyceros sp.	-12.2	–11.0 to –13.0	1.1	3
Ancylotherium hennigi	-10.3	–10.1 to –10.6	0.3	3
Cephalophus sp.	-11.5	–11.4 to –11.6	0.1	2
Diceros bicomis	-11.6	–10.8 to –13.1	1.3	3
Gazella gracilior	-11.6	–10.7 to –12.4	1.2	2
Gazella vanhoepeni	-11.9	–10.9 to –12.8	0.9	4
Giraffa jumae	-11.3	–10.5 to –12.6	0.8	7
Neotragini sp.	-11.6	–11.2 to –12.4	0.5	4
Oreotragus cf. oreotragus	-11.6	–11.4 to –11.7	0.2	2
Tragelaphus sp. aff. angasi	-11.7	–9.5 to –12.7	1.5	4
Tragelaphus pricei	-11.8	–10.9 to –12.5	0.8	3
Mixed $C_3$ and $C_4$ consumers				
Makapania broomi	-3.4	–1.0 to –5.3	1.8	4
Simatherium cf. kohllarseni	-4.0	-3.4 to -4.4	0.5	4
Carnivores				
Hyaena makapani	-8.7	–8.1 to –9.3	0.8	2
Primates				
A. africanus	-8.2	–5.6 to –11.3	2.4	4
Modern primates				
Papio cynocephalus ursinus	-12.3	–10.3 to –14.2	1.1	17
Cercopithecus aethiops	-12.1	–7.8 to –14.3	3.7	3

**Tabelle 4:** Vergleich von <sup>13</sup>C im Zahnschmelz von Australopithecus africanus und kon-<br/>temporärer Fauna (Sponheimer 1999)



Tafel 10: Die Küstenebene des südwestlichen Cape, Südafrika (Sealy 1985)

	Table 1	$\delta^{13}$ C values of dated archa	aeological human skeletons		
Archaeometry lab. no.	Skeletal register no.	Locality	Date (yr bp)	δ <sup>13</sup> C (‰)	
Coastal					
UCT 1050	SAM-AP 1153	False Bay	Associated pottery (?)	-15.1	<2,000 вр
UCT 622	UCT 158	Sandy Bay	Associated pottery (?)	-15.0	
UCT 623	UCT 159	Sandy Bay	Associated pottery (?)	-13.6	
UCT 625	UCT 248	Noordhoek	Associated pottery (?)	-12.9	
UCT 459	SAM-AP 5083	Ysterfontein	Pta-926 1,490 ± 55	-14.5	
UCT 1048	UCT 60	Saldanha	Pta-2,005 955 ± 50	-14.6	
UCT 451	SAM-AP 4813	Bokbaai	Associated pottery (?)	-15.1	
UCT 1049	SAM-AP 1443	Gordon's Bay	Pta-2,309 2,050 ± 50	-11.8	2,000-4,000 уг вр
UCT 1052	UCT 162	Ysterfontein	Pta-929 2,880 ± 50	-11.5	
UCT 1092	-	Eland's Bay	Pta-1,754 3,835 ± 50	-14.7	
UCT 1051	UCT 112	Darling Coast	Pta-2,003 $4,445 \pm 50$	-11.2	4,000-8,000 yr bp
UCT 1091	-	Eland's Bay	Pta-1,829 8,000 ± 95	14.6	>8,000 BP
UCT 206	-	Eland's Bay	Pta-3,086 9,750 ± 100	-12.3	
UCT 202	-	Eland's Bay	OxA-478 10,860 ± 180	-12.5	
Inland					
UCT 457	SAM-AP 1449	Clanwilliam	$OxA-453 = 2,230 \pm 100$	-17.3	2,000-4,000 yr BP
UCT 203	UCT 334	Andriesgrond	OxA-457 3,850±80	-20.2	
UCT 1093	-	Klipfonteinrand	Pta-1,642 3,540 ± 60	-19.6	
UCT 1053	UCT 331	Wyegang	Pta-1,649 6,900 ± 70	-18.4	4,000-8,000 yr BP

Tabelle 5: Messungen an 18 Skeletten des südwestlichen Cape, Südafrika (Sealy 1985)



Tafel 11: Lage der Höhlen Gua Cha (1) und Niah (2) in Malaysia (Krigbaum 2007)



Tafel 12: Isotopenwerte von Vlasac und Lepenski Vir (Boric 2004)



**Tafel 13:** Stickstoffzyklus von Kühen bei verschiedenen Zuchtregimen, gerechnet mit der doppelten Milchleistung relativ zum Bedarf eines Kalbes (Millard 2000). Durchgezogen und kurz gestrichelt: Mastkälber, lang gestrichelt und strichpunktiert: natürliche Entwöhnung, jeweils für jährliches und zweijährliches Kalben.



**Tafel 14:** Stickstoffzyklus von Kälbern bei verschiedenen Zeitpunkten für die Entwöhnung (Millard 2000). Durchgezogen: Milchwirtschaft, lang gestrichelt: Fleischwirtschaft, kurz gestrichelt: natürliche Entwöhnung



(a) Fraktionierung von  $^{13}C$  in Milch- und Körperfett



Tafel 15: a) Fraktionierung von <sup>13</sup>C in Pflanzen sowie Milch- und Körperfett und b) Meßwerte der Fettsäuren aus Tonscherben der neolithischen Fundplätze Windmill Hill (a), Hambledon Hill (b) und Eton Rowing Lake (c) (Copley 2003)



Tafel 16: Lage der Gräberfelder von Trebur, Herxheim und Poundbury



**Tafel 17:** Isotopenwerte von Trebur und Herxheim aufgeschlüsselt nach Männern und Frauen (Dürrwächter 2003b)



**Tafel 18:** Schwankungsbereiche für  $\delta^{15}N$  und  $\delta^{13}C$  in terrestrischer und mariner Flora und Fauna (Ambrose 1993)



**Tafel 19:** Vergleich der nach zwei Methoden extrahierten Kollagengenproben in Abhängigkeit vom C:N-Verhältnis (Bocherens 1997)



**Tafel 20:** Zusammensetzung der Kollagenproben vor und nach der kontrollierten Degradation (Balzer 1997), Ordinatenwerte: molare Prozente

Sample	C/N ratio	$\delta^{13}C[\%]_{PDB}$	$\delta^{I5}N[\%]_{AIR}$
Purified cells of:		*	
Alcaligenes pichaudii	4.71	-13.8	7.9
Bacillus subtilis	5.32	-14.6	8.8
Pseudomonas fluorescens	4.43	-14.2	8.1
Actinomadura madurae	4.90	-13.6	10.4
Aeromonas hydrophila	4.71	-14.4	9.8
Klebsiella oxytoca	5.15	-13.7	10.1
Pseudomonas maltophilia	5.48	-15.3	9.8
Bone collagen from pine marten:			
Control	3.40	-20.1	0.9
Inoculated with <i>Alcaligenes</i> , raised in:			
nutrient broth	1.94	-21.4	0.2
nutrient broth + pea	3.52	-22.0	2.9
nutrient broth + wheat	3.06	-23.0	
nutrient broth + maize	1.73	-22.3	-1.6
Inoculated with Bacillus, raised in:			
nutrient broth	2.83	_	4.5
nutrient broth + pea	4.09	-22.5	_
nutrient broth + wheat	2.69	-21.3	5.0
nutrient broth + maize	3.28	-21.2	3.8
Inoculated with <i>Pseudomonas fl.</i> , raised in:			
nutrient broth	2.76	-20.3	5.9
nutrient broth + pea	3.72	-22.6	4.2
nutrient broth + wheat	1.45	-22.3	1.6
nutrient broth + maize	4.70	-21.9	
Inoculated with Actinomadura, raised in:			
nutrient broth + wheat	n.d.	-21.4	4.0
nutrient broth + maize	n.d.	-21.5	3.6
Inoculated with Aeromonas, raised in:			
nutrient broth	n d	-20.0	6.5
	n.u.	-20.0	0.5
Inoculated with <i>Klebsiella</i> , raised in:	. 1	<u> </u>	<i>.</i> -
nutrient broth	n.d.	-20.3	6.7
Inoculated with Pseudomonas m., raised in:			
nutrient broth	n.d.	-21.0	6.2

n.d.: non determinandum; dashes: amount of material not sufficient for measurement.

**Tabelle 6:** Isotopenwerte von im Labor mit verschiedenen Bakterienkulturen kontrolliert<br/>degradiertem Kollagen (Balzer 1997)