

DIE STRONTIUMISOTOPENANALYSE:
EINE NATURWISSENSCHAFTLICHE METHODE
ZUR ERFASSUNG VON MOBILITÄT
IN DER UR- UND FRÜHGESCHICHTE

Einleitung	590	Nicht regelhafte Mobilität: Mobilität in sesshaften Gemeinschaften	632
Forschungsgeschichte	591	Terminologie	633
Geochemische Grundlagenforschung	591	Die Rolle von Mobilität in sesshaften Gemeinschaften in der ur- und frühgeschichtlichen Forschung	634
Biologische Grundlagenforschung	591	Hinweise auf Wanderungen in der materiellen Kultur	637
Geschichte der archäologischen Anwendungen von Strontiumisotopenanalysen	592	Schwierigkeiten des archäologischen Nachweises von Wanderungen	638
Andere biogeochemische Methoden	594	Der Beitrag der Strontiumisotopenanalyse zur Erfassung von Mobilität in sesshaften Gemeinschaften	639
Interaktion von Untersuchungen an menschlichem Skelettmaterial und materiellen Hinterlassenschaften	595	Nachweismöglichkeiten verschiedener Formen von Wanderungen in sesshaften Gemeinschaften	641
Methodische Grundlagen der Strontiumisotopenanalyse	595	Bisherige Untersuchungen	646
Geologische Grundlagen	595	Archäologische und naturwissen- schaftliche Aussagemöglichkeiten: Ein Vergleich	653
Biologische Grundlagen	599	Regelhafte Mobilität in nicht oder teilweise nicht sesshaften Gemeinschaften	655
Strontium in der Nahrungskette	599	Mobilität in Jäger- und Sammlergesellschaften	655
Zähne	600	Pastoralismus	657
Zahnschmelz	601	Formen pastoraler Wirtschaftsweise	657
Dentin	603	Pastoralismus in der ur- und frühgeschichtlichen Forschung	659
Knochen	609	Forschungsbeitrag der Strontiumisotopenanalyse	660
Differenzierung von Einheimischen und Zuwanderern	616	Mobilität von Tieren	662
Vergleich von Zahnschmelz und Knochen des gleichen Individuums	616	Archäologische Fragestellungen	663
Problematik des Vergleichs mit Gesteins- und Bodenproben vom Fundort	617	Forschungsbeitrag der Strontiumisotopenanalyse	663
Vergleich mit Oberflächen- und Grundwasser ..	620	Erfassung von regelmäßiger, saisonaler Mobilität	664
Vergleich mit biologisch verfügbarem Strontium am Fundort	620	Erfassung von unregelmäßiger oder einmaliger Mobilität	668
Vergleich verschiedener Kriterien zur Erkennung von Zuwanderern	624	Andere Anwendungen der Strontiumisotopenanalyse	668
Regionale Einordnung von Zuwanderern	626	Das Potential von Strontiumisotopenanalysen: Forschungsstand und Forschungsaufgaben	670
Gesteins-, Boden- und Wasserproben	626	Anhang: Probenaufbereitung und Messung von Strontiumisotopenverhältnissen	671
Biologisch verfügbares Strontium	627	Literatur	672
Kombination mit anderen naturwissenschaftlichen Daten	627		
Ermittlung des Migrationszeitpunktes	628		
Zähne: Spiegel von Wanderungen im Kindesalter	628		
Knochen: Spiegel von Wanderungen im Erwachsenenalter	628		
Grundlagen der Strontiumisotopenanalyse: eine Zusammenfassung	629		
Archäologische Anwendungen der Strontiumisotopenanalyse	632		
Das Erkennen von menschlicher Mobilität	632		

EINLEITUNG

Räumliche Mobilität ist ein grundlegender Bestandteil menschlichen Lebens und war seit Beginn der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit der ur- und frühgeschichtlichen Vergangenheit des Menschen im Bewusstsein der Archäologen¹. Wanderungen galten als Erklärung für scheinbar plötzlichen Wandel in der materiellen Kultur, standen Pate für die Benennung von Zeitstufen wie die »Völkerwanderungszeit« oder von Spezialisten wie die »Wanderhandwerker«. Sie wurden entweder unreflektiert vorausgesetzt, scharfsinnig aus den materiellen Hinterlassenschaften des Menschen abzuleiten versucht oder teilweise aufgrund von Misserfolgen bei diesen Bemühungen nahezu gänzlich ignoriert.

Seit Beginn der 1980er Jahre erschließen naturwissenschaftliche Analysen eine neue Quellengattung, um regelhafte und sporadische Ortswechsel von Mensch und Tier zu erfassen. Diese neuen Quellen sind Absolutgehalte und isotopische Zusammensetzungen von Spurenelementen in den Überresten des Menschen oder der Tiere selbst, d.h. in ihren Zähnen und Knochen. Die bisher am weitesten entwickelte diesbezügliche Methode, die sogenannte Strontiumisotopenanalyse, ist Gegenstand dieser Arbeit.

Sie beruht im wesentlichen darauf, dass Strontium mit einer ortstypischen Isotopensignatur aus den Gesteinen im Untergrund durch Verwitterung in den Boden und ins Grundwasser gelangt, wo es biologisch verfügbar ist, d.h. von Pflanzen aufgenommen werden kann. Über die Nahrungskette wird es über verschiedene Stufen bis zum Menschen transportiert, wo es an Stelle von Calcium in Knochen und Zähne eingebaut wird. Zahnschmelz bildet sich in der Kindheit und bleibt über das gesamte Leben in derselben Zusammensetzung bestehen. Sein Strontiumisotopenverhältnis ist daher ein Hinweis auf die Region, in der das entsprechende Individuum aufgewachsen ist. Knochen unterliegt ständigen Umbauprozessen, wodurch sich seine isotopische Zusammensetzung nach einem Wohnortwechsel ändern kann. Hinweise auf Mobilität liegen vor, wenn Zahnschmelz und Knochen desselben Individuums unterschiedliche Strontiumisotopenverhältnisse aufweisen, oder das ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-Verhältnis im Zahnschmelz eines Individuums nicht mit dem des biologisch verfügbaren Strontiums des Sterbeortes übereinstimmt.

Obwohl bereits Mitte der 1980er Jahre erstmals auf das Potential von Strontiumisotopenanalysen in Bezug auf archäologische Fragestellungen hingewiesen wurde (Erison 1985; Krueger 1985), und seitdem Untersuchungen zu verschiedenen Themen erfolgten, ist diese Methode in der Ur- und Frühgeschichtswissenschaft noch keineswegs gut bekannt. Dies liegt vor allem daran, dass sich die meisten

¹ Der vorliegende Aufsatz entstand aus meiner im Jahre 2002 am Institut für Ur- und Frühgeschichte und Archäologie des Mittelalters der Eberhard-Karls-Universität Tübingen angefertigten Magisterarbeit. Der Text wurde 2003 für den Druck gekürzt und teilweise überarbeitet. Bis dahin neu erschienene Literatur wurde, soweit sie mir bekannt geworden ist, ergänzt.

Für ihre engagierte Betreuung bedanke ich mich sehr herzlich bei meinen Hochschullehrern, Herrn Prof. H.-P. Uerpmann und Herrn Prof. M. K. H. Eggert. Für ihre großzügige Unterstützung bei Laborarbeiten bin ich den Herren Prof. T. D. Price und Dr. J. H. Burton (Madison, WI, USA), Prof. M. Sator, Prof. E. Pernicka, Dr. W. Siebel und E. Reitter (Tübingen), Dipl.-Ing. (FH) J. Adam sowie Dipl.-Min. B. Höppner (Freiberg) sehr zu Dank verpflichtet. Für die Bereitstellung von Probenmaterial sei Herrn Prof. Uerpmann, Frau Dr. E. Stephan und Herrn Dr. P. Schmidt-Thomé (Landesdenkmalamt Baden-Württemberg) sowie Herrn H. Schaller (Pfreimd) und Herrn Dr. N. Harre (Groß-Gerau) herzlich gedankt. Vielzählige Diskussionen mit Frau M. Ronniger M.A., Frau Dr. S. Schiegl, Herrn Dr. R. Schreg, Herrn Ph. Stockhammer

M.A. (Tübingen), Herrn Dr. R. A. Bentley (London), Frau Dr. K. J. Knudson (Madison), Herrn Dr. Y. Hu (Hefei, VR China), Frau Dipl. Min. D. Eckstein und Frau Dipl.-Archäol. B. Winterholler (Freiberg) trugen maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei.

Frau M. Ronniger M.A., Herr Dr. R. Schreg, Frau Dr. S. Schiegl, Frau cand. phil. S. Meyer (Tübingen) sowie Frau Prof. L. Fisher (Springfield, IL, USA) bin ich für zahlreiche Hinweise und Korrekturvorschläge zu besonderem Dank verpflichtet. Mein außerordentlicher Dank gilt der Studienstiftung des deutschen Volkes, durch deren Unterstützung mir das Studium der Ur- und Frühgeschichte und zwei Aufenthalte am Laboratory for Archaeological Chemistry, University of Wisconsin-Madison (WI, USA) ermöglicht wurden. Sehr zu Dank verpflichtet bin ich den Herren Dr. D. Quast und Prof. M. Egg (Mainz), die eine Publikation der Arbeit im Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums ermöglichten.

Nicht zuletzt sei meinen Eltern für ihre stete Hilfsbereitschaft und ihr Interesse am Fortgang meines Studiums gedankt.

bis dato erschienenen Publikationen auf einzelne Fallbeispiele beschränken und zudem sehr weit gestreut vorgelegt sind. Obwohl T. D. Price et al. (2002) eine erste systematische Erörterung zentraler methodischer Problempunkte vorlegten, fehlt es bisher an einer zusammenfassenden Darstellung der methodischen Grundlagen und vor allem der archäologischen Anwendungsmöglichkeiten von Strontiumisotopenanalysen. Die vorliegende Studie macht sich daher zum Ziel, diesem Desiderat entgegenzuwirken, indem sie diese beiden Aspekte systematisch und kritisch beleuchtet.

FORSCHUNGSGESCHICHTE

Die Geschichte der Strontiumisotopenforschung lässt sich in drei Stränge einteilen. Der erste betrifft Strontium und dessen isotopische Zusammensetzung in Gesteinen bzw. Grund- und Oberflächenwasser, der zweite das Verhalten von Strontium in der Nahrungskette und den Einbau in Knochen und Zähne. Diese beiden in der Geochemie bzw. Biologie verankerten Richtungen der Grundlagenforschung wurden nicht primär zur Beantwortung archäologischer Fragestellungen durchgeführt. Der dritte Strang greift auf ihre Ergebnisse zurück und wendet sie an, um Mobilität von Mensch und Tier in ur- und frühgeschichtlichen Zeiten zu untersuchen.

Geochemische Grundlagenforschung

Kriterium für das Erkennen von Zuwanderern und die Bestimmung ihrer Herkunft ist das Verhältnis der Strontiumisotope ^{87}Sr und ^{86}Sr zueinander ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). ^{87}Sr entsteht durch radioaktiven Zerfall von Rubidium 87 (^{87}Rb), was in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entdeckt wurde. Das Strontiumisotopenverhältnis in Gesteinen variiert in Abhängigkeit von deren ursprünglichem Rubidiumgehalt und Alter. Diese Tatsache wird in der geochemischen Forschung zur Datierung der Entstehung von Gesteinen genutzt. Erste Analysen waren bei hohem Rubidiumgehalt in den späten 1930er Jahren möglich und wurden verstärkt seit den 1950er Jahren eingesetzt, als geeignete Massenspektrometer zur Bestimmung von Strontiumisotopenverhältnissen, Möglichkeiten zur Messung des Absolutgehaltes von Rubidium und Strontium sowie zur Abtrennung dieser Elemente von einem Gesamtaufschluss eines Gesteins mittels Kationenaustauschchromatographie vorhanden waren (Faure/Powell 1972, 9; Faure 1986, 117). Geochemische Fachaufsätze der 1960er, 70er und 80er Jahre enthalten Strontiumisotopenverhältnisse, aber auch Angaben zum Absolutgehalt von Rubidium und Strontium in Gesteinen als Ausgangsdaten für die Rb/Sr-Altersbestimmung und die Untersuchung von Variationen des Strontiumisotopenverhältnisses im Meerwasser. Die meisten Untersuchungen sind dabei magmatischen und metamorphen Gesteinen sowie marinen Sedimenten gewidmet. Für klastische Sedimente – Gesteine aus mehreren, u. U. unterschiedlich alten Komponenten – liegen kaum geochemische Daten vor (Faure 1986, 129-134).

Biologische Grundlagenforschung

Die biologische Richtung der Grundlagenforschung widmet sich dem Verhalten von Strontium in der Nahrungskette und seinem Einbau in das Knochenmaterial. Obwohl schon in den 1940er und in der ersten Hälfte der 1950er Jahre einige Studien zu Strontium im Knochen durchgeführt wurden, waren dies Ausnahmen, da man nur wenig zuverlässige analytische Methoden besaß, und auch eine klare Frage-

stellung bzw. Forschungsmotivation fehlte. Dies änderte sich in der Mitte der 1950er Jahre, als man erkannte, dass das bei Atomtests produzierte, radioaktive Isotop ^{90}Sr in menschliches und tierisches Knochengewebe eingebaut wird und stark gesundheitsschädigend wirkt. Aus diesem Grunde wurden hauptsächlich in den späten 1950er und 1960er Jahren, zunächst an Tieren und später auch an Menschen, das Verhalten und der Transport der Elemente Strontium und Calcium durch die Nahrungskette und ihr Einbau in verschiedene Gewebe untersucht². Die archäologische bzw. anthropologische Forschung griff auf die daraus resultierenden Erkenntnisse zurück, indem sie die Tatsache, dass der relative Gehalt von Strontium im Knochen mit zunehmender Trophiestufe in einer Nahrungskette sinkt (vgl. Abb. 4), zur Rekonstruktion von Ernährungsweisen in der Ur- und Frühgeschichte nutzte (z.B. Schoeninger 1979; Sillen/Kavanagh 1982; Price et al. 1985; Burton 1996).

Die für die Frage nach Wanderungen interessanten Isotope ^{87}Sr und ^{86}Sr traten seit den 1980er Jahren in den Blickpunkt der biologischen Forschung. Nachdem bereits zuvor herausgestellt wurde, dass bei geochemischen Prozessen wie der Verwitterung von Gesteinen Strontiumisotopen nicht fraktioniert werden (Dasch 1969, 1521), fand man ebenso wenig Hinweise darauf, dass dies beim Transport von Strontium durch die Nahrungskette der Fall wäre (Gosz et al. 1983, 25). Dies bedeutet, dass sich die isotopische Zusammensetzung von Strontium nicht ändert, wenn es von einer Trophiestufe in die nächste gelangt. Damit gewannen Strontiumisotopenuntersuchungen Bedeutung in der Erforschung von Ökosystemen. Hier wurden sie als *Tracer* zur Feststellung der Herkunft der für Pflanzen verfügbaren Nährstoffe genutzt (Straughan et al. 1981; Graustein/Armstrong 1983; Chadwick et al. 1999).

Geschichte der archäologischen Anwendungen von Strontiumisotopenanalysen

Die seitens der Geochemie und Biologie unabhängig von archäologischen Fragestellungen geleisteten Grundlagenforschungen wurden zusammengeführt und auf archäologische Problemstellungen angewandt. Der erste Hinweis auf die Möglichkeit des Erkennens von Wanderungen mit Hilfe von Strontiumisotopenanalysen geht auf einen Vortrag von Jonathan E. Ericson im Jahre 1981 zurück. 1985 folgte eine knappe systematische Auseinandersetzung mit den methodischen Grundlagen und archäologischen Anwendungen der Methode sowie erste Untersuchungen von menschlichen Knochen und Zähnen aus dem Malibu Canyon bei Los Angeles (Kalifornien, USA) (Ericson 1981; Ericson 1985). Ericson betonte die Forschungsmöglichkeiten in Bezug auf Mobilität und Landnutzung prähistorischer Gemeinschaften.

Eine andere in frühen Arbeiten verfolgte Fragestellung ist die Unterscheidung von mariner und terrestrischer Nahrung. Seit den 1960er Jahren versucht man, aus Absolutgehalten der Spurenelemente Strontium und Barium oder der isotopischen Zusammensetzung von Stickstoff und Kohlenstoff Aussagen über menschliche Ernährungsgewohnheiten abzuleiten. Strontiumisotopen wurden in Betracht gezogen, um zwischen vorwiegend mariner oder terrestrischer Nahrung zu unterscheiden. Dieser Ansatz beruht darauf, dass Strontium in mariner Nahrung eine durch das Meerwasser geprägte isotopische Zusammensetzung aufweist, die sich von der in terrestrischer Nahrung unterscheidet. So stellte H. W. Krueger (1985) Strontiumisotopenmessungen an Menschen- und Tierknochen verschiedener Fundstellen in Kentucky, Maine, Alaska und Mittelamerika vor. Unabhängig davon publizierten B. K. Nelson et al. (1986) eine Studie zu Strontiumisotopen in Knochen mariner und terrestrischer, bodengelagerter und rezenter Fauna aus Grönland. Eine ebenfalls der Erforschung prähistorischer Ernährung gewidmete Studie an rezenter Fauna Südafrikas unterschied erstmals nicht nur Wasser- und Landtiere anhand ihrer Isotopie, sondern stellte auch innerhalb der Landtiere – je nachdem, ob sie ihre Nahrung

² Kurze Zusammenfassungen der Forschungsgeschichte in Bezug auf ^{90}Sr und Strontium in der Nahrungskette mit

Hinweisen auf eine sehr umfangreiche Primärliteratur bieten Comar 1963 und Sillen/Kavanagh 1982.

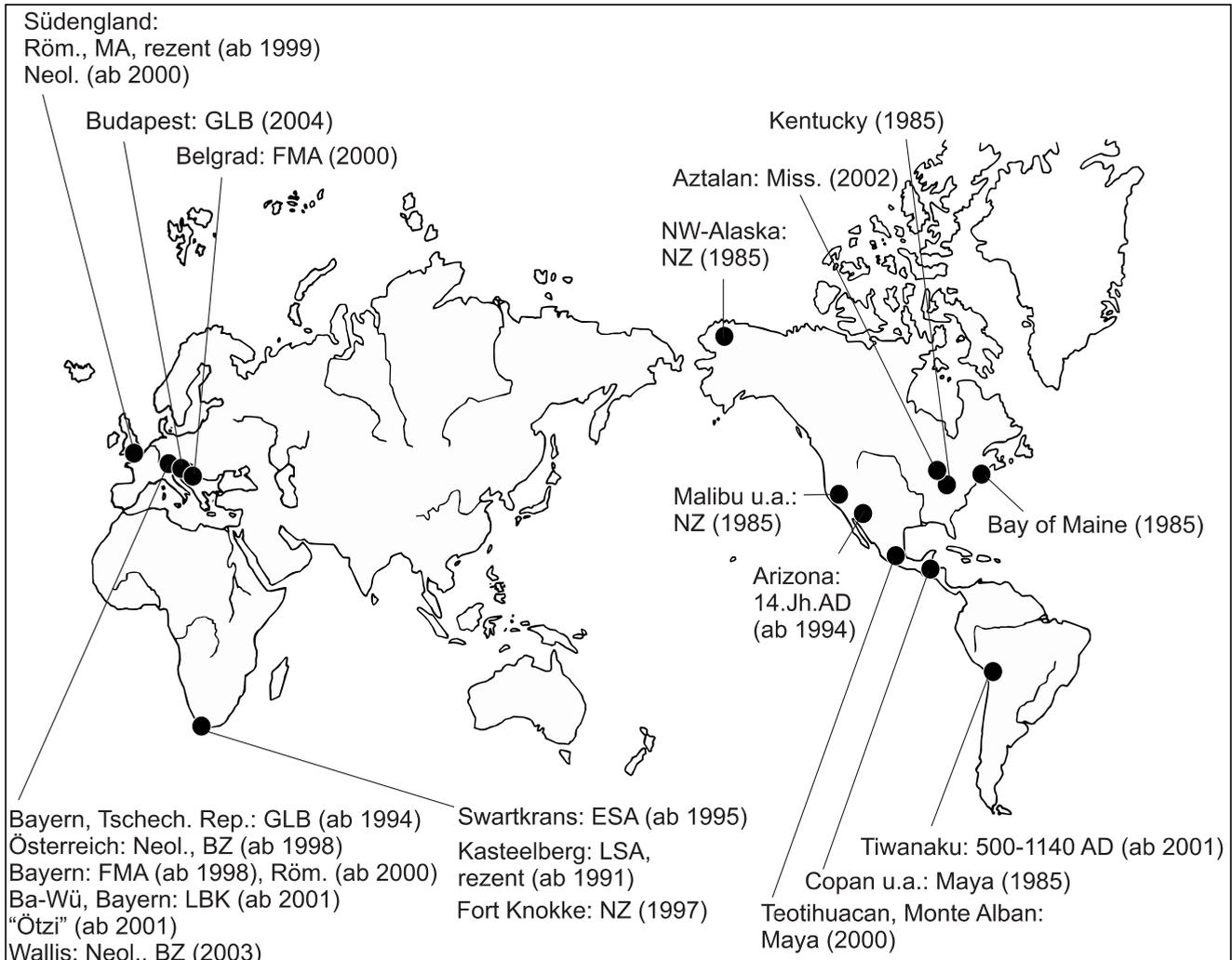


Abb. 1 Strontiumisotopenanalysen an menschlichen und tierischen Knochen und Zähnen zur Erforschung von Ortswechsellern und Ernährung. Fundorte oder Regionen: Datierung (Publikationsjahr). ESA: Early Stone Age, LSA: Late Stone Age, Neol.: Neolithikum, GLB: Glockenbecherkultur, LBK: Linearbandkeramik, BZ: Bronzezeit, Röm.: Römisch, MA: Mittelalter, FMA: Frühmittelalter, Miss: Mississippian, NZ: Neuzeit.

von Küstensanden oder verschiedenen Sedimenten des Hinterlandes bezogen – Unterschiede im Strontiumisotopenverhältnis der Knochen fest (Sealy et al. 1991). Eine Anwendung dieser Ergebnisse im Hinblick auf Mobilität wurde allerdings noch nicht thematisiert.

Die genannten, hauptsächlich an Ernährungsfragen interessierten Studien behandelten das von Beginn der Strontiumisotopenforschung an erkannte Problem der Kontamination von Knochenmaterial während der Bodenlagerung. Dieses Problembewusstsein ist auch bei der Auswertung von Analyse-
daten in Hinblick auf Wanderungen von essentieller Bedeutung.³

³ Die einschlägigen Studien kamen wiederholt zu dem Schluss, dass Zahnschmelz während der Bodenlagerung am beständigsten ist, während Dentin und Knochen aufgrund ihrer Porosität anfälliger für Veränderungen sind

(vgl. Nelson et al. 1986; Sealy et al. 1991; Sillen et al. 1995; Sillen/Sealy 1995; Budd et al. 2000; Hedges 2002; Chiaradia et al. 2003; Hoppe et al. 2003; Trickett et al. 2003).

Fragestellungen im Zusammenhang mit menschlicher Mobilität – genauer gesagt mit menschlicher Mobilität in sesshaften Gemeinschaften – dominieren bisher die Strontiumisotopenforschung. Zum einen geht es dabei um die Erforschung von Populationsdynamik bzw. Zuwanderungen an einzelnen Fundorten, und zum anderen stehen historische oder kulturelle Phänomene, die mit Mobilität in Zusammenhang gebracht werden, im Mittelpunkt. Für beide Forschungsrichtungen liegen seit den frühen 1990er Jahren erste Publikationen vor⁴ (Abb. 1).

Im Zusammenhang mit regelhafter, saisonaler Mobilität, die z.T. durch Tierhaltung wirtschaftlich bedingt ist, sind Studien an archäologischer und rezenter Fauna Südafrikas (Balasse et al. 2002), Süddeutschlands (Schweissing/Grupe 2003b) und an Faunenresten sowie Knochen bzw. einem Zahn von Australopithecinen der südafrikanischen Fundstelle Swartkrans (Sillen et al. 1995; Sillen et al. 1998) zu nennen.

Nachdem es sich bei diesen Beispielen um Einzelstudien zu einer bestimmten archäologischen Fragestellung handelt, liegt mit Price et al. (2002) die erste projektübergreifende Analyse des Forschungsstandes und der auftretenden Probleme vor.

Strontiumisotopenuntersuchungen sind nicht nur an menschlichen und tierischen Überresten möglich, sondern können auch zur Herkunftsbestimmung von Rohmaterialien und Artefakten dienen und damit zum Verständnis von Handels- und Distributionssystemen beitragen. Diesbezügliche Studien werden seit Beginn der 1980er Jahre für Obsidian (Gale 1981), Bauhölzer (English et al. 2001), Keramik (Knacke-Loy 1994; Knacke-Loy et al. 1995) und Glas (Wedepohl/Baumann 2000) durchgeführt.

Andere biogeochemische Methoden

Neben der Strontiumisotopenanalyse gibt es einige andere biogeochemische Methoden, die zum Erkennen von Zuwanderern in prähistorischen Bestattungsgemeinschaften herangezogen werden können. Dazu zählt seit Beginn der 1990er Jahre die Sauerstoffisotopenanalyse⁵. Das Verhältnis der Isotope ¹⁸O und ¹⁶O – für gewöhnlich als $\delta^{18}\text{O}$ ausgedrückt – im menschlichen und tierischen Skelett steht im kausalen Zusammenhang mit der Sauerstoffisotopie des Wassers, das der Organismus als Trinkwasser oder mit seiner Nahrung aufnimmt. Dieses variiert in Abhängigkeit vom Klima – insbesondere der Temperatur –, der Entfernung vom Meer, der Höhenlage sowie der relativen Luftfeuchtigkeit⁶, was es ermöglicht, Zuwanderer aus wärmeren oder kälteren Regionen oder von höher oder niedriger als der Fundort gelegenen Orten zu erkennen.

Ebenso wie Sauerstoffisotopenverhältnisse variieren Kohlenstoffisotope in Abhängigkeit von der Temperatur und können Hinweise auf Zuwanderer geben (Richards et al. 1998). Außerdem haben Knochen und Zähne von Tieren und Menschen in trockeneren Regionen höhere $\delta^{15}\text{N}$, bzw. ¹⁵N/¹⁴N-Verhältnisse als in feuchteren (Dupras/Schwarz 2001). Kohlen- und Stickstoffisotopenuntersuchungen wurden in der bisherigen Mobilitätsforschung kaum eingesetzt. Die Tatsache, dass beide Isotopenverhältnisse nicht nur mit der Umwelt, sondern vor allem auch mit der Ernährung variieren, könnte sich sehr einschränkend auf ihr Potential hinsichtlich einer Bestimmung von Mobilität auswirken.

Neben diesen umweltabhängigen Indikatoren gibt es Hinweise auf Zuwanderer, die auf regionalen Unterschieden im Gehalt oder der isotopischen Zusammensetzung von Gesteinen beruhen. Hier wurden bisher vor allem Blei-⁷ und Schwefelisotopen (Richards et al. 2001) sowie Sr/Ca und Ba/Ca-Verhältnisse⁸ betrachtet.

⁴ Für eine genauere Vorstellung einiger Beispiele s. S. 646ff.

⁵ Sie kommt in folgenden Studien zur Anwendung: Schwarz et al. 1991; White et al. 1998; Dupras/Schwarz 2001; Müller et al. 2003.

⁶ Erläuterungen der methodischen Grundlagen von Sauerstoffisotopenanalysen an menschlichen und tierischen

Skelettresten finden sich u.a. bei White et al. 1998; Sponheimer/Lee-Thorp 1999; Stephan 2000; Paulus 2000 und Dupras/Schwarz 2001.

⁷ Carlson 1996; Gulson et al. 1997; Knudson et al. 2001; Chiaradia et al. 2003.

⁸ Burton/Price 2002; Knipper 2002; 2003; 2005; Burton 2003.

Interaktion von Untersuchungen an menschlichem Skelettmaterial und materiellen Hinterlassenschaften

Als 1981 bzw. 1985 das Potential von Strontiumisotopenforschungen im Zusammenhang mit menschlicher Mobilität erstmals angesprochen wurde (Ericson 1981; Ericson 1985), war die deutsche archäologische Forschung weitgehend von der Klassifikation und chronologischen Ordnung von Funden bestimmt, und die anglophone der *New Archaeology* verschrieben, in der Wanderungen kaum thematisiert wurden. Die ersten Strontiumisotopenforschungen, die zunächst ohnehin weniger auf die Erfassung von Wanderungen als vielmehr auf das Erkennen von Wirtschaftsbereichen (Ericson 1985) und die Rekonstruktion von Ernährung (Krueger 1985; Nelson et al. 1986; Sealy et al. 1991) ausgerichtet waren, wurden durch die Möglichkeit des Rückgriffs auf geochemische und biologische Grundlagenforschung angestoßen und von Wissenschaftlern durchgeführt, die sich bereits zuvor mit archäometrischen Analysen biogener Materialien, insbesondere der Ernährungsrekonstruktion, beschäftigten. In den vergangenen 20 Jahren hat die Diskussion um Wanderungen und Mobilität innerhalb der Archäologie an Bedeutung gewonnen. Sie kann aber keinesfalls als Auslöser für die Beschäftigung mit Strontiumisotopenanalysen gelten. Neuere, allgemein bzw. theoretisch orientierte Arbeiten werden in der Strontiumforschung zwar als Begründung der Notwendigkeit einer weiteren, von der materiellen Kultur unabhängigen Methode herangezogen (vgl. Price et al. 1998, 405; Price et al. 2004) oder fließen gelegentlich auch in die Interpretation der Daten ein (vgl. Ezzo et al. 1997, 461-465; Ezzo/Price 2002, 513-517), beeinflussen aber kaum die Fragestellung oder Forschungsstrategie der Strontiumforschung. Während die rein archäologisch ausgerichteten neueren Auseinandersetzungen mit Wanderungen zumindest von einigen an Strontiumisotopenanalysen arbeitenden Wissenschaftlern – insbesondere der Arbeitsgruppe um T. D. Price – wahrgenommen und teilweise auch angewendet werden, haben nicht naturwissenschaftlich arbeitende Archäologen die Möglichkeiten der Strontiumisotopenforschung bisher kaum zur Kenntnis genommen. Dies liegt möglicherweise an der Vielzahl einzelner Fallstudien, die teilweise – aus archäologischer Sicht – entlegen publiziert sind. Erschwerend kommt – insbesondere in der deutschen Forschung – sicherlich eine gewisse Reserviertheit bzw. Unsicherheit der Archäologen gegenüber naturwissenschaftlichen Methoden hinzu, wie sich dies insbesondere in der Auseinandersetzung mit der ^{14}C -Datierung während der 1950er bis 70er Jahren feststellen ließ (Eggert 1988).

METHODISCHE GRUNDLAGEN DER STRONTIUMISOTOPENANALYSE

Das Feststellen von menschlicher Mobilität – und hier insbesondere von Mobilität in sesshaften Gesellschaften – ist bisher das Hauptanwendungsgebiet von Strontiumisotopenanalysen in der archäologischen Forschung. Deshalb werden sich die folgenden Ausführungen zu den methodischen Grundlagen primär an dieser Fragestellung orientieren. Auf eventuelle Modifikationen oder Besonderheiten in Bezug auf andere Anwendungsmöglichkeiten wird an den entsprechenden Stellen eingegangen werden.

Geologische Grundlagen

Strontium (Sr) und Rubidium (Rb) sind in fast allen Gesteinen und Böden, die letztendlich auf die Verwitterung von Gesteinen im Untergrund zurückgehen, in messbaren Konzentrationen als Spurenelemente enthalten. Der Sr-Gehalt ist allerdings je nach Gesteinsart unterschiedlich. Da Sr-Ionen chemisch den Calciumionen (Ca-Ionen) sehr ähnlich sind und diese im Kristallgitter ersetzen können, enthalten

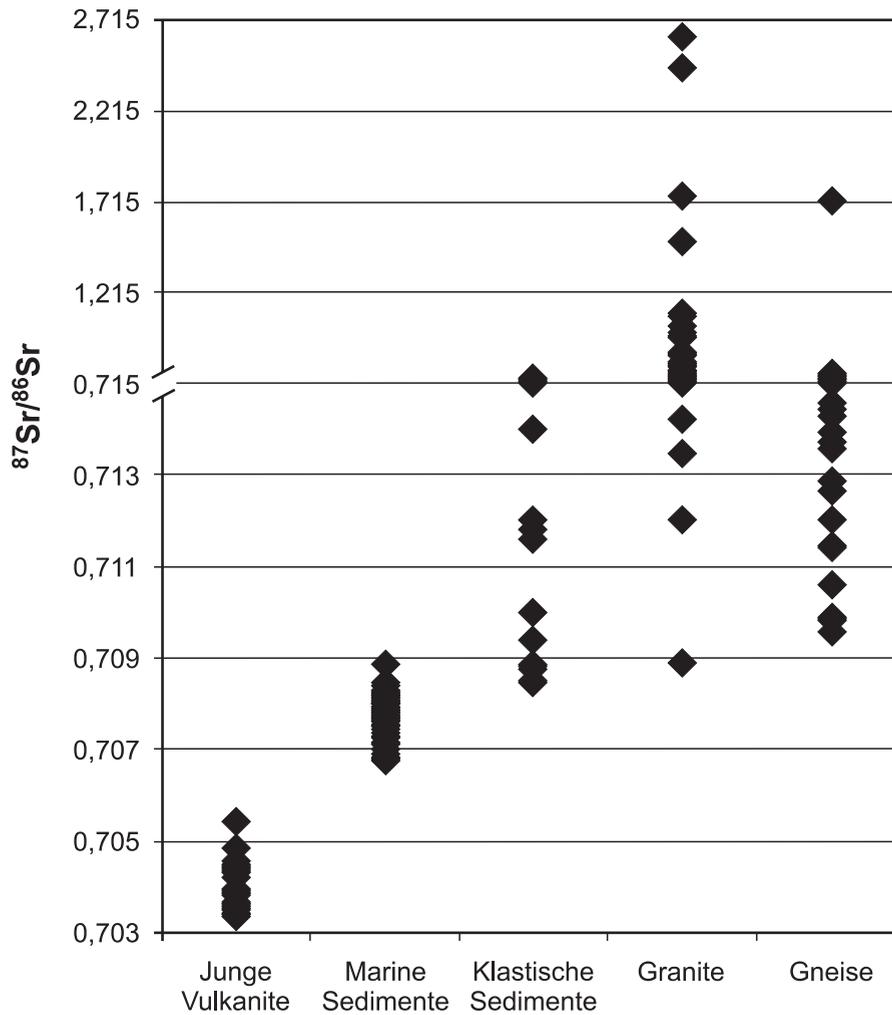


Abb. 2 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in Gesteinen Süddeutschlands. Man beachte die Unterbrechung in der Skalierung der y-Achse bei 0,715.

Ca-reiche Gesteine – wie Kalksteine – mehr Strontium als Ca-arme – wie z.B. ultrabasische Ergussgesteine oder Granite (Faure/Powell 1972, 4-5 mit Tab. I 4).

Das Entscheidende für die Strontiumisotopenanalyse sind allerdings nicht die unterschiedlichen Sr-Gehalte der Gesteine, sondern Varianzen in dessen isotopischer Zusammensetzung. Strontium besitzt vier stabile Isotope: ^{88}Sr (82,53%), ^{87}Sr (7,04%), ^{86}Sr (9,87%) und ^{84}Sr (0,56%)⁹. Darunter ist ^{87}Sr radiogenen Ursprungs; das heißt, es ist ein Zerfallsprodukt eines radioaktiven Isotops. Im Falle von ^{87}Sr ist dies ^{87}Rb . Die Halbwertszeit von ^{87}Rb beträgt $48,8 \times 10^9$ Jahre (Faure 1986, 119), was bedeutet, dass der relative Gehalt an ^{87}Sr umso höher ist, je mehr Rb – und damit ^{87}Rb – im Gestein vorhanden war, und je älter das Gestein ist – d.h. je mehr Zeit die ^{87}Rb -Isotope zum Zerfallen hatten. Obwohl der radioaktive Zerfall von ^{87}Rb Grundlage für die Rb-Sr-Altersbestimmung von Gesteinen ist (Faure/Powell 1972, 9-21; Faure 1986, 117-140), geschieht er so langsam, dass er in archäologisch relevanten Zeiträumen

⁹ Die Isotope eines Elements sind durch die gleiche Anzahl an Protonen und Elektronen und durch eine unterschied-

liche Anzahl an Neutronen und damit durch eine unterschiedliche Atommasse gekennzeichnet.

nicht von Bedeutung ist. Deshalb kann man das in der Gegenwart gemessene $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis in den für archäologische Fragestellungen betrachteten Zeiträumen als charakteristisch für das jeweilige Gestein annehmen.

Wegen des eingangs erwähnten unterschiedlichen Sr-Gehaltes von Gesteinen, betrachtet man ^{87}Sr nicht als absoluten Wert, sondern setzt ihn ins Verhältnis zu einem anderen Isotop, dessen Anteil konstant ist, da es nicht auf radioaktive Zerfallsprozesse zurückgeht. Im Falle von ^{87}Sr nimmt man dafür das Isotop ^{86}Sr in Anspruch, da es in einer ähnlichen Konzentration wie ^{87}Sr vorkommt¹⁰. Die entscheidende Größe für den Nachweis von Mobilität ist also das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis. Es wird mit Hilfe eines Massenspektrometers ermittelt, das in der Lage ist, die ^{87}Sr und ^{86}Sr -Ionen in einer Probe zu zählen. Die beiden Konzentrationen werden normalerweise in ppb (*parts per billion* = Teilchen pro Milliarde) angegeben. Da bei der Division der beiden Werte die Einheiten wegfallen, steht das Strontiumisotopenverhältnis ohne Einheit.

Strontiumisotopenverhältnisse in Gesteinen liegen im allgemeinen zwischen 0,702 und 0,750. Für Gneise und Granite konnten auch Werte über 1 festgestellt werden. Diese Variation scheint relativ klein. Sie ist allerdings signifikant, wenn man bedenkt, dass moderne Massenspektrometer $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse bis auf die fünfte und teilweise sechste Stelle nach dem Komma zuverlässig ermitteln.

Gesteine mit den niedrigsten Strontiumisotopenverhältnissen sind junge (tertiärzeitliche oder jüngere) vulkanische Gesteine mit $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen zwischen ca. 0,702 und 0,706. Durch Kontamination mit Krustengesteinen, die das Magma durchdrang, oder Meerwasser werden teilweise auch höhere Werte erreicht (Faure/Powell 1972, 28-35; Faure 1986, 164-171 mit Fig. 10. 6). Geochemisch sind junge Vulkanite meist sehr gut untersucht, da aus den Daten wichtige Rückschlüsse auf die Magmenquellen und -entstehung gezogen werden können¹¹ (Abb. 2).

Die Gesteinsgruppe mit den nächsthöheren Strontiumisotopenverhältnissen sind marine Kalke und Dolomite. Sie variieren zwischen ca. 0,7067 und 0,7090. Das Strontiumisotopenverhältnis des Meerwassers verändert sich im Laufe der Zeit, weil die an der Landoberfläche anstehenden geologischen Einheiten zu unterschiedlichen Anteilen und unterschiedlich schnell verwittern, und deshalb unterschiedliche Mengen an Strontium mit unterschiedlicher isotopischer Zusammensetzung in die Meere getragen werden (Dasch 1969; Lavelle/Armstrong 1993). Diesbezügliche Daten wurden in einer Kurve zusammengetragen (Abb. 3)¹².

Regional betrachtet ist die isotopische Zusammensetzung des Strontiums im Wasser jedoch zu einem je spezifischen Zeitpunkt überall in den Weltmeeren gleich. Deshalb haben alle gleichzeitig gebildeten marinen Gesteinseinheiten heute dieselbe Strontiumisotopensignatur, unabhängig davon, wo sie an der Erdoberfläche austreichen. Infolgedessen können Strontiumisotopenverhältnisse von einer gut untersuchten Stelle auf weniger gut untersuchte übertragen werden, sofern es sich um zur gleichen Zeit gebildete marine Gesteine handelt.

Vergleichsweise hohe und variable Strontiumisotopenverhältnisse weisen magmatische Tiefengesteine wie Granite und Granulite sowie metamorphe Gesteine wie Gneise oder Schiefer auf, deren $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in der Regel über 0,71 liegen. Im Rahmen geochemischer Forschungen zur Bestimmung der Entstehungszeit dieser Gesteinskomplexe wurden umfangreiche Rb-Sr-Datierungen durchgeführt. Aus den in diesem Zusammenhang vorgelegten $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen lässt sich ein guter Überblick über die

¹⁰ Die Schwankungen des ^{87}Sr -Anteils bewegen sich in einem so kleinen Bereich, dass der Anteil an ^{87}Sr dem Anteil an ^{86}Sr immer ähnlicher als dem der anderen Strontiumisotope ist.

¹¹ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse für junge Vulkanite in Süddeutschland finden sich z.B. bei Calvez/Lippolt (1980) und Mengel et al. (1984). Die Werte schwanken hier zwischen 0,7032 und 0,7054.

¹² Zusammenfassende Darstellungen der Entwicklung des Strontiumisotopenverhältnisses von Meerwasser vom Kambrium bis heute bieten: Peterman et al. 1970; Brass

1976; Burke et al. 1982; McArthur 1994; Veizer et al. 1997; Veizer et al. 1999. Daneben gibt es Untersuchungen zu ausgewählten geologischen Zeitaltern wie dem Kambrium: Montañez et al. 2000. – Ordovizium und Silur: Qing et al. 1998. – Trias: Korte 1999. – Jura: Jones et al. 1994a; McArthur et al. 2000. – Jura und Kreide: Jones et al. 1994b. – Kreide bis heute: Palmer/Elderfield 1985; Hess et al. 1986. Abweichungen einzelner Proben von der Meerwasserkurve können auf diagenetische Veränderungen oder leichte Metamorphose sowie Verunreinigungen der Gesteine zurückgeführt werden.

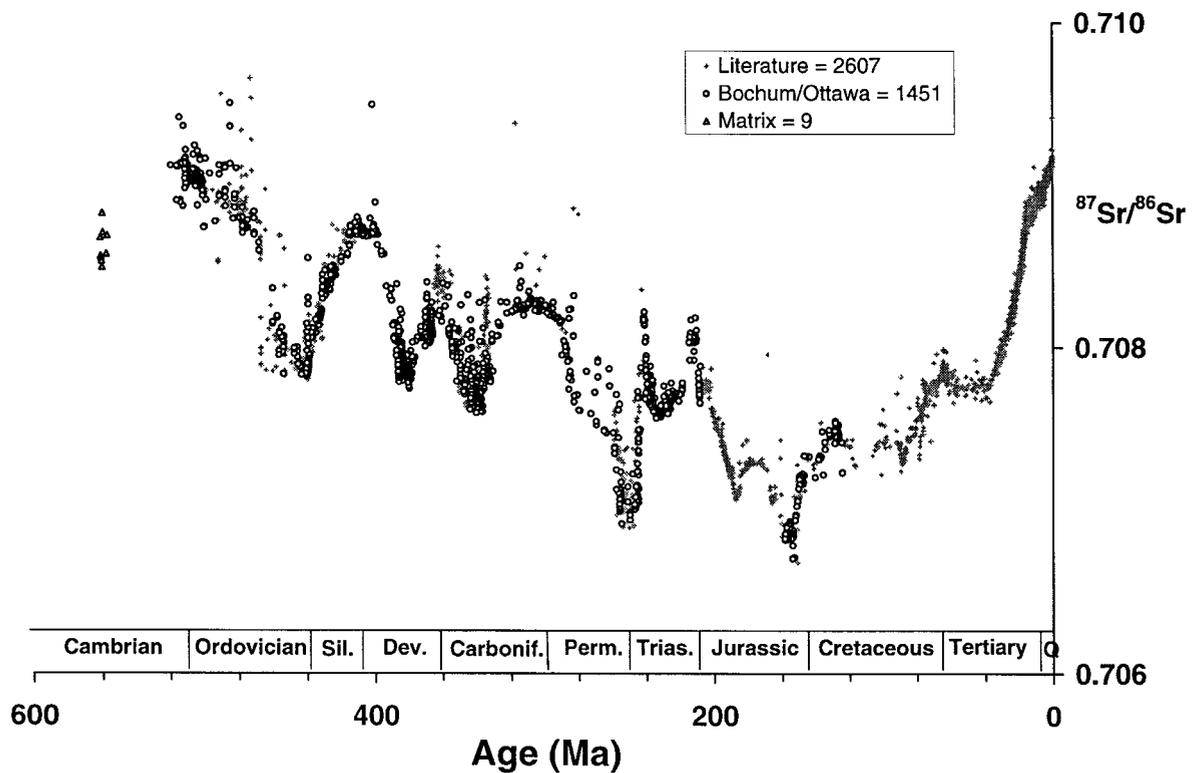


Abb. 3 Variation des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisses im Meerwasser vom Kambrium bis heute (Veizer et al. 1999, Fig. 4).

Variationen von Strontiumisotopenverhältnissen in diesen geologischen Einheiten der Grundgebirge gewinnen¹³.

Weit weniger Interesse galt bislang den klastischen Sedimenten. Da sie aus mehreren Komponenten z.T. unterschiedlichen Alters bestehen, und ihr Ablagerungszeitpunkt nur schwerlich mit Rb/Sr-Datierungen festgestellt werden kann, liegen nur einzelne Studien vor, die Strontiumisotopen unter Aspekten der Gesteinsgenese oder Herkunft von Einzelkomponenten betrachten. Je nach dem, aus welchen Ausgangsgesteinen klastische Sedimente gebildet wurden, ist ihre Strontiumisotopie sehr variabel.

Der Mangel an geochemischen Daten für klastische Sedimente ist für archäologisch orientierte Strontiumisotopenstudien sehr von Nachteil, da der überwiegende Teil der Erdoberfläche durch sie geprägt ist und gerade die kaum erforschten Löss- und Flusssedimente einen sehr großen Anteil an den Hauptsiedellandschaften ausmachen¹⁴.

Strontium mit der je nach Gestein unterschiedlichen isotopischen Zusammensetzung gelangt durch Verwitterung zum einen in den Boden¹⁵ und zum anderen in das Grund- und Oberflächenwasser¹⁶. Liegt es dort in gelöster Form vor, kann es von Pflanzen aufgenommen und in ihr Gewebe eingebaut werden.

¹³ Für Gesteine und Einzelminerale der Grundgebirge Süddeutschlands finden sich Strontiumisotopenverhältnisse z.B. in folgenden Publikationen: Schwarzwald: Hofmann/Köhler 1973; Brewer/Lippolt 1973; Drach et al. 1974; Brewer/Lippolt 1974; Lippolt et al. 1983; Schleicher et al. 1983; Kalt et al. 1994; Altherr et al. 1999 – Bayern: Arnold/Scharbert 1973; Köhler et al. 1974; Grauert et al. 1974; Köhler/Müller-Sohnius 1980; Köhler/Müller-Sohnius 1985; Teufel 1987; Siebel 1995.

¹⁴ Beispiele für die sehr spärlichen Daten für Löss in Europa sind: Kaiserstuhl: 0,70956 und 0,71001, NW-Frankreich: 0,7130-0,7162, England: 0,7257 und Belgien: 0,7277-0,7302 (Taylor et al. 1983; Gallet et al. 1998).

¹⁵ Vgl. Dasch 1969; Brass 1975; Graustein 1988; Miller et al. 1993; Bullen et al. 1997.

¹⁶ Vgl. Katz/Bullen 1996; Négrel et al. 1997; Othman et al. 1997; Land et al. 2000, 320-321; Aubert et al. 2002.

In Abhängigkeit vom geologischen Untergrund weisen Pflanzen daher regionale Unterschiede in ihrer Strontiumisotopie auf. Die Isotopenverhältnisse des in Pflanzen biologisch umgesetzten Strontiums müssen jedoch – wie später noch zu zeigen sein wird – nicht zwingend mit den Ergebnissen von Isotopenanalysen an Gesamtaufschlüssen der Festgesteine im Untergrund übereinstimmen.

Biologische Grundlagen

Strontium in der Nahrungskette

Strontium wird als Spurenelement mit der Nahrung aufgenommen und in biogenes Gewebe eingebaut. Da Strontium und Calcium u.a. einen ähnlichen Ionenradius haben, kann Calcium im Kristallgitter durch Strontium ersetzt werden¹⁷. Dies ist sowohl in pflanzlichen als auch in tierischen und menschlichen Geweben möglich. Bei Tieren und Menschen finden sich 99% des im Organismus enthaltenen Strontiums in den Knochen und Zähnen, was diese Gewebe, die in den archäologischen Hinterlassenschaften oft das einzig Erhaltene dieser Lebewesen sind, für Strontiumanalysen geeignet macht (Burton/Wright 1995, 274).

Strontium wird durch die Nahrungskette von einer Trophiestufe zur nächsten übertragen. Dabei fällt allerdings auf, dass alle Organismen zugunsten von Calcium und gegen Strontium, für das bisher keine spezifische Aufgabe im Körper bekannt ist, selektieren. Dies bedeutet, dass im Vergleich zum Calcium nur ca. 20% des aufgenommenen Strontiums auch im Organismus eingebaut werden, und dass somit das Sr/Ca-Verhältnis mit zunehmender Trophiestufe abnimmt. Die höchsten Sr/Ca-Verhältnisse sind im Boden zu finden, geringer sind sie bereits in Pflanzen und noch niedriger bei Pflanzenfressern. Am Ende der Nahrungskette stehen Fleischfresser mit den niedrigsten Sr/Ca-Verhältnissen. Dieses als biologische Purifikation von Calcium bezeichnete Phänomen (Elias et al. 1982; Burton/Wright 1995) wird in einer Studie von Burton et al. (1999) in deren Rahmen Tausende von Proben aus dem nördlichen Wisconsin untersucht wurden, besonders deutlich (Abb. 4).

Die beschriebenen Unterschiede zwischen Pflanzen- und Fleischfressern wurden in der anthropologischen Forschung in unzähligen Untersuchungen herangezogen, um für verschiedene Populationen den Anteil an pflanzlicher und tierischer Nahrung zu ermitteln und daraus z.B. auf Statusunterschiede innerhalb einer Gesellschaft zu schließen¹⁸.

Für Strontiumisotopenanalysen sind nicht wie in den ernährungsbezogenen Studien der Absolutgehalt an Strontium oder dessen Menge im Verhältnis zu Calcium entscheidend, sondern die isotopische Zusammensetzung. Eine Veränderung der isotopischen Zusammensetzung beim Einbau in eine neue Verbindung nennt man Fraktionierung. Fraktionierung bedeutet, dass ein oder mehrere Isotope gegenüber anderen bevorzugt eingebaut werden, und sich die isotopische Zusammensetzung des betreffenden Elements dadurch ändert. Sie tritt regelhaft bei leichten Elementen auf, bei denen die relativen Massenunterschiede zwischen den einzelnen Isotopen sehr groß sind. Das schwerste Element, bei dem Massenfraktionierung nachgewiesen werden konnte, ist Kupfer mit den Massen 63 und 65 (Gosz et al. 1983, 25). Strontium mit seinen Massen 84, 86, 87 und 88 ist schwerer und wird daher weder bei geochemischen noch bei biologischen Prozessen fraktioniert (Graustein 1988, 491, 494; Lavelle/Armstrong 1993, 534).

Dies bedeutet, dass das aus dem Boden aufnehmbare Strontium in derselben isotopischen Zusammensetzung in Pflanzen und in Knochen und Zähnen von Tieren und Menschen, die sich von diesen ernähren, zu finden ist. Die Vertreter aller Trophiestufen sollten daher – unabhängig von ihrem unter-

¹⁷ Vgl. Comar et al. 1957, 485; Schoeninger 1979, 297; Sillen/Kavanagh 1982, 69; Burton et al. 1999, 609 mit weiterer Literatur.

¹⁸ Zusammenfassend: Sillen/Kavanagh 1982.

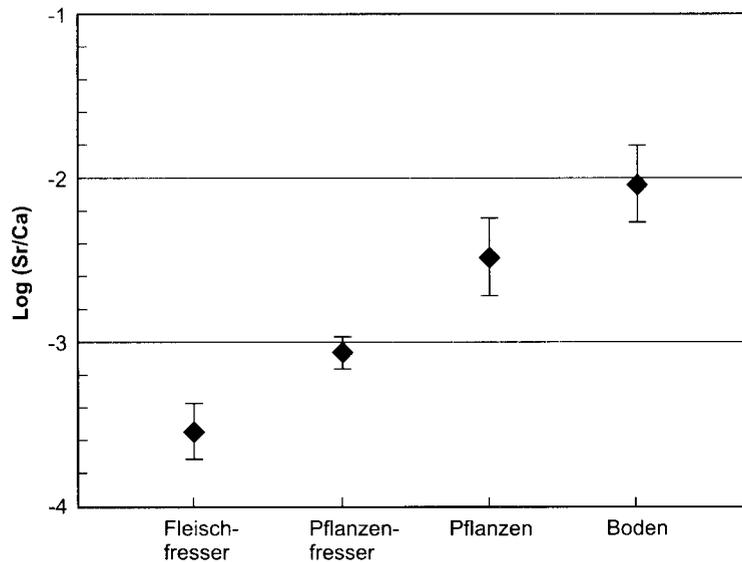


Abb. 4 Mittelwert und Standardabweichung des log (Sr/Ca) für Böden, Pflanzen, Pflanzenfresser und Fleischfresser aus dem nördlichen Wisconsin, USA (umgezeichnet nach: Burton et al. 1999, Fig. 2).

schiedlichen Absolutgehalt an Strontium – dieselben Strontiumisotopenverhältnisse aufweisen, sofern sie ihre Nahrung aus demselben Gebiet beziehen. Diese Tatsache ist der Schlüssel zur Herkunftsbestimmung von Menschen und Tieren. Die Strontiumisotopenverhältnisse in ihren Hartgeweben stehen in kausalem Zusammenhang mit dem Gebiet, in dem sie gebildet wurden¹⁹.

Um Aussagen über Mobilität zu treffen, werden Daten für die Zähne (Zahnschmelz und Dentin) und die Knochen erhoben. Aufgrund von Unterschieden in ihrem anatomischen Aufbau und der unterschiedlichen Fähigkeit, zu Lebzeiten umgebaut zu werden, bieten diese Hartgewebe unterschiedliche Aussagemöglichkeiten.

Zähne

Zähne bestehen aus einer Krone (*Corona dentis*), die aus dem Kiefer bzw. dem Zahnfleisch in die Mundhöhle ragt, und einer oder mehreren Wurzeln (*Radix dentis*), mit denen sie in den Zahnfächern (*Alveoli dentales*) des Kieferknochens verankert sind. Den Bereich, in dem Krone und Wurzel zusammentreffen, bezeichnet man als Zahnhals (*Collum dentis*). Der größte Teil des Zahnes besteht aus Dentin (*Substantia eburnea* oder Zahnbein), aus dem sowohl die Zahnkrone als auch die Wurzeln aufgebaut sind. Während das Dentin im Bereich der Krone von Zahnschmelz (*Substantia adamantina*, *Enamelum*) überzogen ist, liegt ihm im Bereich der Wurzel eine Schicht aus knochenähnlichem Zement (*Cementum dentis*, *Substantia ossea*) auf (Abb. 5).

Die Pulpahöhle (*Cavum dentis*) ist ein zentraler Hohlraum im Dentin, der im Bereich der Wurzel in den Wurzelkanal (*Canalis radialis dentis*) übergeht (Buddecke 1981, 2; Schumacher et al. 1990, 13-16).

Für Strontiumisotopenanalysen sind besonders Zahnschmelz, aber auch Dentin von Bedeutung. Zement ist wegen seines relativ geringen Anteils am Zahn, der schlechten Abtrennbarkeit vom Dentin, und weil es sich um ein weiches, knochenähnliches Material handelt, zur Strontiumisotopenanalyse vergleichs-

¹⁹ Für diese grundlegenden Überlegungen zu Strontiumisotopenanalysen zum Nachweis von Mobilität vgl. z.B.: Sealy et al. 1991, 399-400; Price et al. 1994a, 320; Mont-

gomery et al. 2000, 371; Price et al. 2000, 906; Price et al. 2004, 12-15.

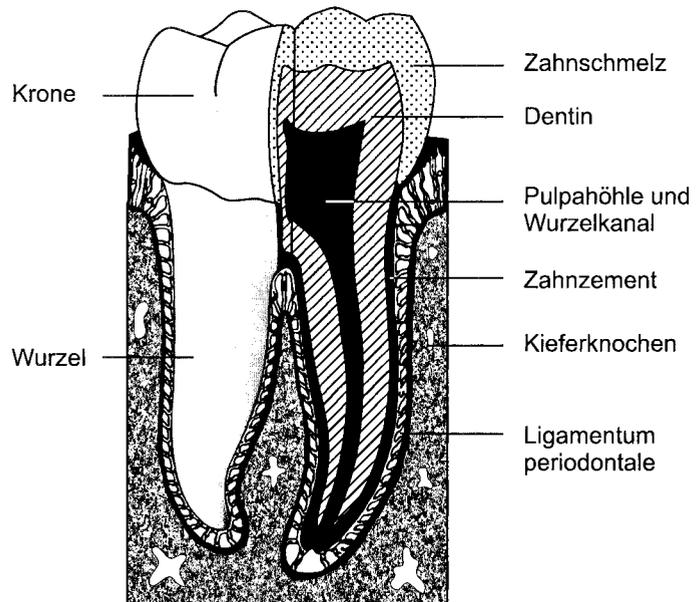


Abb. 5 Anatomischer Aufbau eines unteren menschlichen Molaren (umgezeichnet nach: Schumacher 1990, Abb. 3).

weise ungeeignet²⁰. Es sei nur angemerkt, dass Zement kein »konstantes« Material ist, da sich – ähnlich wie Jahrringe – mit zunehmendem Alter immer mehr Zementlagen um die Wurzel herum bilden, und seine Dicke mit der Zeit zunimmt (Lipsinic et al. 1986; Miller et al. 1988). Mit der derzeitigen Beprobungstechnik ist es jedoch nicht möglich, einzelne Zementlagen voneinander zu trennen. Deshalb würde das Strontiumisotopenverhältnis immer einen Mittelwert aus möglicherweise verschiedenen Aufenthaltsorten darstellen.

Zahnschmelz

Chemische Zusammensetzung und histologischer Aufbau: Zahnschmelz ist die weiße, äußere Auflage der Zahnkrone mit einer Dicke von bis zu 2,5 mm (Boyde 1989, 309-311; Buddecke 1981, 69).

Er ist die härteste Substanz im menschlichen und tierischen Organismus und hat die Aufgabe, Nahrung zu zerkleinern, ohne dabei selbst beschädigt oder zerstört zu werden. Grund für seine große Härte ist, dass er zu 95% bis 98% – nach einigen Autoren sogar zu 100% – aus anorganischer Substanz besteht. Der Rest sind organische Verbindungen²¹ sowie Wasser (Buddecke 1981, 7; Boyde 1989, 309; Schumacher et al. 1990, 304-306). Den größten Anteil an seiner anorganischen Substanz hat das Calciumphosphat Hydroxylapatit oder Dahllit – so die mineralogische Bezeichnung – mit der Summenformel $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$. Neben den Hauptelementen Calcium (32-39%) und Phosphor (16-18%) sind verschiedene andere Elemente und Verbindungen am Aufbau von biogen gebildetem Hydroxylapatit beteiligt, so z.B. Karbonat, Natrium, Magnesium, Chlorid, Kalium, Fluorid und verschiedene Spurenelemente wie Barium, Eisen, Blei, Schwefel, Silizium, Zinn und – für Strontiumisotopenanalysen entscheidend – natürlich Strontium²². Die Apatitkristalle bilden sehr regelmäßig geformte und zueinan-

²⁰ Beschreibungen von Zahnzement findet man u.a. bei: Buddecke 1981, 72-73; Schroeder 1987, 144-169.

²¹ Den Hauptanteil der organischen Komponente des Zahnschmelzes bildet das Eiweiß Amelogenin bzw. Enamelin. Daneben kommen auch andere glycinreiche Proteine vor (Buddecke 1981, 16, 52; Schumacher et al. 1990, 330-338; Lowenstam/Weiner 1989, 183-185). Da organisches Mate-

rial im Zahnschmelz nur einen sehr geringen Anteil hat und ohnehin kaum Strontium enthält, ist es für die Strontiumisotopenanalyse nicht von Bedeutung.

²² Für tabellarische Auflistungen der durchschnittlichen Anteile der Haupt- und Spurenelemente in Zahnschmelz siehe: Buddecke 1981, 11 und 13; Lowenstam/Weiner 1989, 152; Boyde 1989, 344.

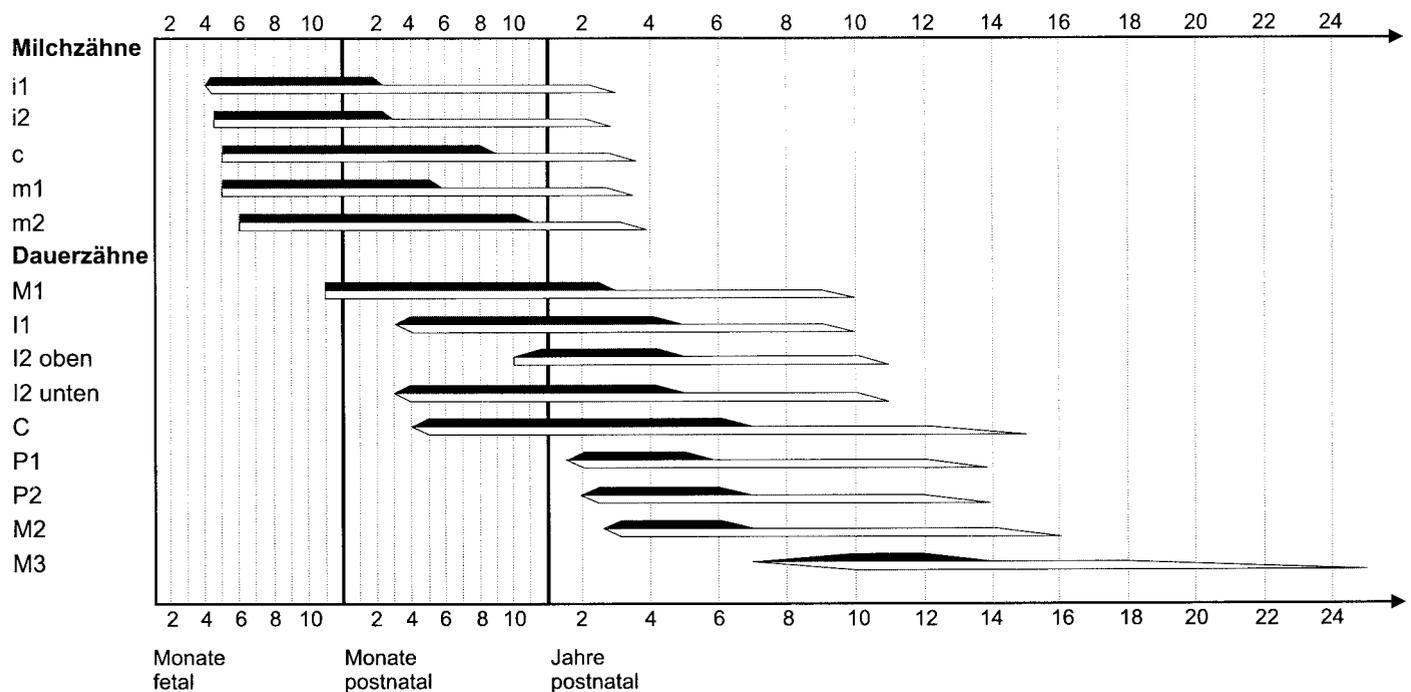


Abb. 6 Bildungszeiträume von Zahnschmelz (schwarz) und Dentin (weiß). (Daten nach Schumacher et al. 1990, Tab. 3 und Schroeder 1987, 28-29).

der parallel angeordnete Schmelzprismen (*Prisma enameli*). Diese durchziehen den Schmelz radiär ohne Unterbrechung von der Schmelz-Dentin-Grenze bis zur Schmelzoberfläche (Boyde 1989, 345-347; Höhling 1989, 475; Lowenstam/Weiner 1989, 175-176; Schumacher et al. 1990, 15, 156). Im Querschnitt können sie verschiedene Formen wie die eines Hufeisens oder eines Schlüsselloches annehmen. Zahnschmelz enthält keine lebenden Zellen.

Bildungsmechanismen und Zeitpunkt der Mineralisation: Die Bildung von Zahnschmelz beginnt an der Zahnspitze bzw. an den höchsten Punkten der Zahnhöcker und schreitet dann zur Basis der Krone fort²³. Die Mineralisation des Zahnschmelzes beginnt bereits vor der Geburt und erstreckt sich über einen Großteil der menschlichen Wachstumsperiode. Die Bildung der Milchzähne beginnt zwischen dem vierten und dem sechsten Fetalmonat und endet zwischen dem zweiten und dem dritten Monat nach der Geburt für die Schneidezähne und reicht bis ins letzte Viertel des ersten Lebensjahres für die Canini und die zweiten Milchprämolaren (Abb. 6).

Die Bildung des Schmelzes des Dauergebisses beginnt mit dem ersten Molaren (M1) kurz vor oder nach der Geburt und ist mit dem M3 in der Regel zwischen dem zwölften und 14. Lebensjahr abgeschlossen. Die Bildungszeiträume der einzelnen Zähne überlappen sich oft sehr stark und erstrecken sich in der Regel über ca. vier Jahre. Die Kronen der meisten Zähne sind bis zum ca. siebten Lebensjahr vollständig ausgebildet. Lediglich der M3 wird deutlich später mineralisiert.

Stoffwechsel im lebenden Organismus: Zahnschmelz ist ein zellfreies Gewebe und unterliegt nach dem Abschluss seiner Mineralisation keinem aktiven Stoffwechsel oder regelmäßigem Umbau mehr, bei dem Strontium mit einer veränderten isotopischen Zusammensetzung eingelagert werden könnte (Buddecke 1981). Eine andere Möglichkeit intravitale Veränderungen der mineralischen Substanz des Zahn-

²³ Über die Bildung der Schmelzprismen durch Ameloblasten informieren detailliert: Buddecke 1981, 52, 70-71; Schumacher et al. 1990, 87-89, 90.

schmelzes ist physikalischer Stoffaustausch mit Ionen, die in durch den Zahnschmelz diffundierenden Wässern gelöst sind. Da die Apatitkristalle im Schmelz im Vergleich zu Dentin und Knochen allerdings sehr groß und dicht gelagert sind, ist Zahnschmelz nach seiner Reifung nur in begrenztem Maße durchlässig (Buddecke 1981, 71-72; Schumacher et al. 1990, 15). Lediglich im Bereich der Oberfläche kann es gelegentlich zu Austauschprozessen kommen (Buddecke 1981, 69, 53). In der Regel bleibt jedoch der in der Kindheit mineralisierte Hydroxylapatit mit seinem spezifischen Gehalt an Spurenelementen und deren spezifischer isotopischer Zusammensetzung das ganze Leben über bestehen.

Bedeutung für Strontiumisotopenanalysen mit archäologischer Fragestellung: Zahnschmelz ist für die Erforschung von Mobilität in der Ur- und Frühgeschichte von entscheidender Bedeutung. Er wird je nach Zahn zu unterschiedlichen Zeiten im Laufe der Kindheit gebildet und unterliegt dann keinen aktiven Stoffwechsel- oder Umbaumechanismen mehr. Lediglich im Bereich der Oberfläche, die bei der Aufbereitung der Proben ohnehin entfernt wird, konnte intravitaler Stoffaustausch nachgewiesen werden. Zahnschmelz ist außerdem ein sehr dichtes Material mit nur geringen Anteilen organischer Substanz, die ihn nach ihrer Dekomposition porös machen könnte. Deshalb erfährt Zahnschmelz während der Bodenlagerung, wenn Knochenerhaltung an sich möglich ist, kaum Veränderungen und kann als zuverlässiges Reservoir für biogenes Strontium gelten. Die Isotopie des Strontiums im Zahnschmelz ist daher Spiegel des oder der Aufenthaltsorte des untersuchten Individuums während seiner Kindheit.

Dentin

Chemische Zusammensetzung und histologischer Aufbau: Dentin bildet sowohl den Hauptanteil der Zahnkrone als auch der Wurzelpartien und ist das häufigste Material in Zähnen. Es ist vier bis fünf mal weicher als Zahnschmelz, jedoch härter als Knochen und Zement und besteht zu ca. 70% (nach Gewicht) aus anorganischem, zu 20% aus organischem Material sowie zu 10% aus Wasser (Frank/Nalbandian 1989b, 175). Die mineralische Phase von Dentin bildet das bereits für Zahnschmelz beschriebene Hydroxylapatit. Die anorganischen Hydroxylapatitkristalle sind in eine organische Matrix aus – je nach Autor – zwischen 80 und 95% Kollagen eingebettet (Buddecke 1981, 16; Frank/Nalbandian 1989b, 176; Schumacher et al. 1990, 339-352). Die organische Matrix enthält im Vergleich zu den mineralischen Bestandteilen des Dentins kaum Strontium und ist deshalb für Strontiumisotopenanalysen nicht von Bedeutung.

Nach Bildungszeitpunkt und -umständen unterscheidet man drei Arten von Dentin: Primärdentin, Sekundärdentin und Tertiärdentin (Frank/Nalbandian 1989b, 177). Primärdentin ist Dentin der Zahnkrone und -wurzel, das bis zum Abschluss des Wurzelwachstums gebildet wird. Danach wird die Dentinbildung allerdings nicht eingestellt, sondern schreitet als »Sekundärdentinbildung« am Rand der Pulpahöhle fort (Buddecke 1981, 69; Schumacher et al. 1990, 87). Tertiärdentin – auch »reparatives« oder »Reizdentin« genannt – entsteht, wenn eine bestimmte Stelle des Zahnes durch Abrasion, Karies, chemischen oder thermischen Stress gereizt oder beschädigt wird und ist sehr unregelmäßig aufgebaut (Schumacher et al. 1990, 87; Frank/Nalbandian 1989b, 177; Smith 2000).

Dentin wird durch Odontoblasten gebildet, deren Zellkörper sich auch nach Abschluss der Dentinbildung am äußeren Rand der Pulpahöhle befinden. Odontoblasten haben charakteristische Odontoblastenfortsätze, die sich in Dentinkanälen (*Tubuli dentales*) befinden, die radiär das gesamte Dentin, von der pulpanahen Dentinoberfläche bis zur Schmelz-Dentin-Grenze in der Krone oder zur Zement-Dentin-Grenze in der Wurzel, durchziehen (Schumacher et al. 1990; Frank/Nalbandian 1989b, 178, 207-209) (Abb. 7 und Abb. 8).

Kronendentin enthält mehr Dentinkanäle pro Flächeneinheit als Wurzeldentin und pulpanahes mehr als pulpafernes. Pro Quadratmillimeter gibt es je nach Position im Zahn 15000 bis 65000 solcher Röhren, deren Durchmesser nur wenige μm beträgt. Er ist im pulpanahen Dentin etwas größer als im pulpafernen (Schumacher et al. 1990, 179; Frank/Nalbandian 1989b, 207-209). Zunächst befindet sich das Dentin nur außerhalb der Dentinkanäle. Man bezeichnet es als »Intertubulärdentin«. Mit zunehmendem Alter kommt es auch innerhalb der Dentinkanäle zur Bildung von Dentin, das man »Peritubulärdentin« nennt

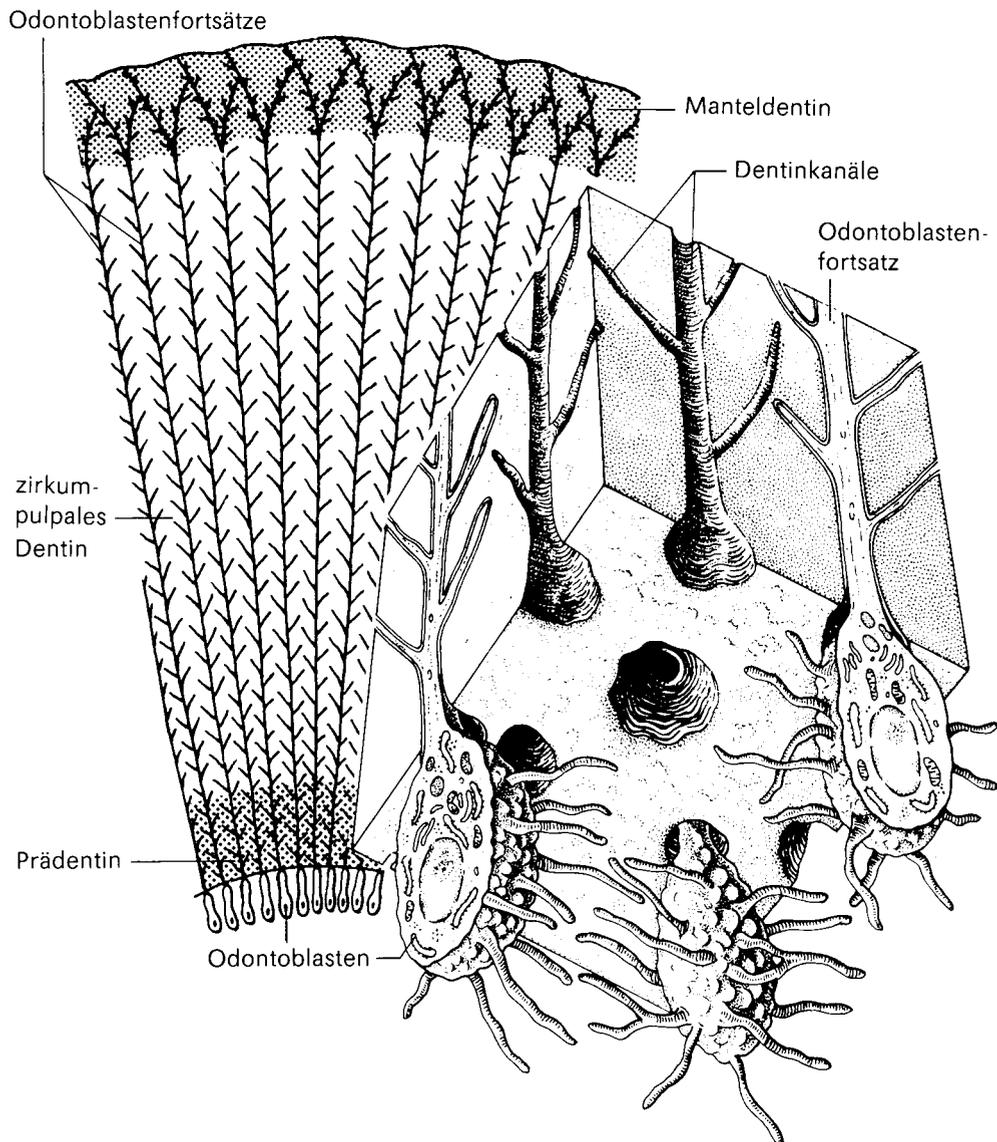


Abb. 7 Odontoblasten an der pulpanahen Dentinoberfläche. Die Odontoblastenfortsätze reichen in das Dentin bis zur Schmelz-Dentin-Grenze hinein (Schumacher et al. 1990, Abb. 138).

(Frank/Nalbandian 1989b, 177, 212-216). Außerdem gibt es im Dentin noch weitere, kleine, unregelmäßig verteilte Hohlräume, die als »Interglobulärräume« bekannt sind (Schumacher et al. 1990, 180, 182). *Bildungsmechanismen und Zeitpunkt der Mineralisation:* Die Bildung von Dentin durch die Odontoblasten beginnt ebenso wie die von Zahnschmelz im Bereich der Kronenspitze und schreitet dann nach unten über den gesamten Kronenbereich und, wenn deren Bildung abgeschlossen ist, bis zur Wurzel fort (Frank/Nalbandian 1989a, 141, 147, 152; Schumacher et al. 1990, 76). Die Bildung von Primärdentin dauert je nach Zahn ca. drei bis über zehn Jahre länger als die des Zahnschmelzes. Der Aufbau der Wurzel des dritten Molaren ist in der Regel erst zwischen dem 19. und 25. Lebensjahr abgeschlossen. Einen Überblick über die Bildungszeiträume von Primärdentin in den Zahnwurzeln und -kronen gibt Abb. 6. Die Bildung von Sekundärdentin in der Pulpahöhle und innerhalb der Dentinkanäle findet auch nach Abschluss der Wurzelbildung noch statt.

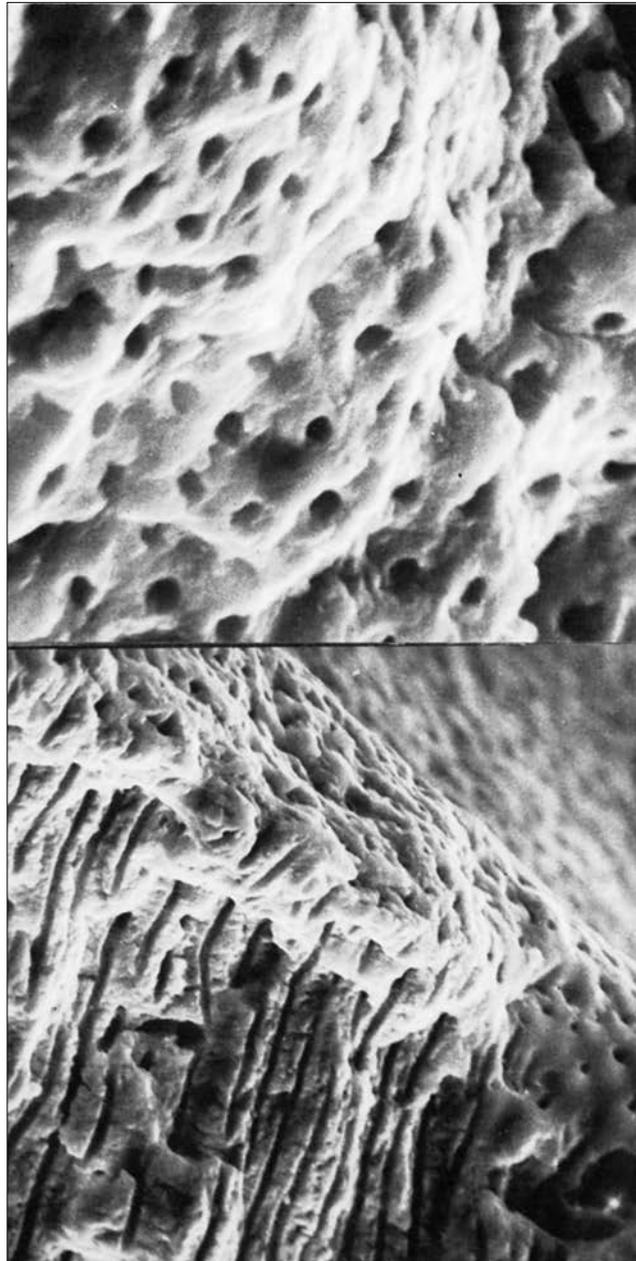


Abb. 8 Dentinkanäle im rasterelektronenmikroskopischen Bild. Oben: Oberflächenstruktur von Dentin. Unten: Dentinkanäle im Längsschnitt an einer Bruchfläche (Schumacher et al. 1990, Abb. 142).

Änderung der stofflichen Zusammensetzung im Laufe des Lebens: Obwohl die Fortsätze der Odontoblasten, deren Zellkörper sich außerhalb des Dentins befinden, in dieses hineinreichen, wird Dentin als zellfreies Gewebe bezeichnet. Die Odontoblasten sind nicht teilungsfähig und werden daher nach ihrem Absterben nicht ersetzt (Smith 2000, 83, 87).

Im Dentin gibt es keine ständigen Umbauprozesse, wie das im Knochen der Fall ist. Deshalb ist davon auszugehen, dass Dentin in derselben Zusammensetzung, wie es in der Kindheit gebildet wurde, über das ganze Leben hinweg bestehen bleibt (Lowenstam/Weiner 1989, 147; Benzian 1987, 8-9).

Diese Aussage muss allerdings insofern eingeschränkt werden, als sie nur für das Intertubulärdentin gilt.

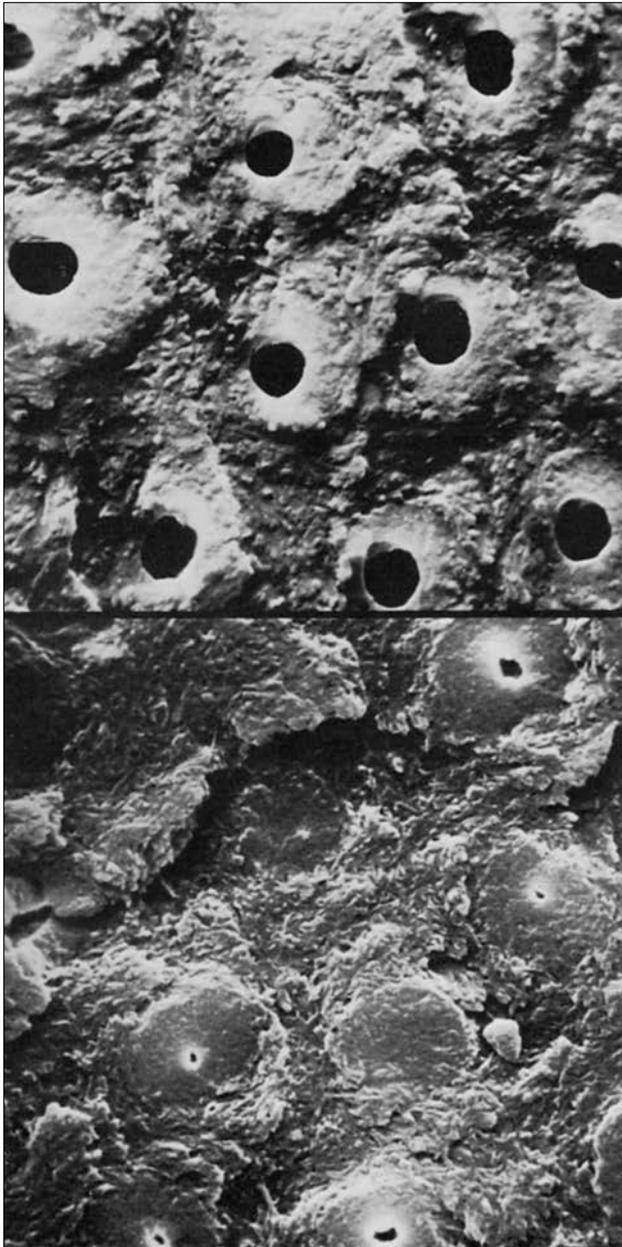


Abb. 9 Dentinkanäle werden mit zunehmendem Alter durch Peritubulärdentin gefüllt. Oben: Eckzahn eines 60 Jahre alten Mannes, Kanaldurchmesser etwa 1,2µm. Unten: Weisheitszahn einer 55 Jahre alten Frau. Dentinkanäle z.T. obliteriert. Kanaldurchmesser etwa 0,2µm (Schumacher et al. 1990, Abb. 144).

Mit zunehmendem Alter des Menschen bildet sich in den Dentinkanälen das Peritubulärdentin, wodurch sie immer enger und schließlich ganz zugesetzt werden können (Abb. 9, Tab. 1). Man spricht von »Sklerosierung«, die besonders für den pulpanahen Bereich nachgewiesen ist²⁴.

Wenn im Laufe des Lebens ein Ortswechsel erfolgte, kann in das Dentin, das sich erst im Erwachsenenalter in den Dentinkanälen bildet, Strontium mit einem Isotopenverhältnis eingelagert werden, das sich von dem im intertubulären Dentin unterscheidet. Da man bei der bisher angewandten Beprobungstechnik mit Hilfe eines Zahnarztbohrers intertubuläres und peritubuläres Dentin nicht trennen kann, sind Dentinwerte von erwachsenen Individuen schwer zu interpretieren, da eine Mischung von Strontium

²⁴ Frank/Nalbandian 1989b, 230-235; Schumacher et al. 1990, 179 mit Tab. 18; Buddecke 1981, 69.

Alter (Jahre)	Pulpanahes Dentin		Mittleres Dentin		Peripheres Dentin	
	Durchmesser (µm)	Fläche (%)	Durchmesser (µm)	Fläche (%)	Durchmesser (µm)	Fläche (%)
16-30	3,98	79	3,09	27	1,73	4
30-50	3,12	49	2,46	19	1,71	4
50-75	2,91	42	2,36	16	1,75	4

Tab. 1 Durchmesser der Dentinkanäle in µm und ihr flächenmäßiger Anteil in Prozent in verschiedenen Bereichen des Kronendentins von 33 menschlichen Schneidezähnen (Schumacher et al. 1999, Tab. 18. nach W. Ketterl, Studie über das Dentin der permanenten Zähne des Menschen. Stoma 14, 1961, 79-96, 148-163).

aus der Kindheit und aus späteren Lebensabschnitten mit potentiell unterschiedlichen Isotopenverhältnissen vorliegen kann.

Obwohl Dentin keinen regelhaften Umbauprozessen unterliegt, könnte eine weitere Möglichkeit der Alteration im Austausch von Elementen durch Diffusion liegen. In Tierversuchen prüfte man durch intravenöses Spritzen von radioaktiven Materialien (z.B. ^{32}P , ^{90}Sr oder ^{224}Ra), ob und mit welcher Geschwindigkeit neue Materialien in bereits bestehendes Zahnmaterial eingebaut werden (Buddecke 1981, 52). Da die radioaktiv markierten Stoffe in begrenztem Maße im Dentin nachzuweisen waren, wurde daraus geschlossen, dass möglicherweise doch ein begrenzter Umbau von Dentin vorliegt (Buddecke 1981, 52-53; Frank/Nalbandian 1989b, 186). Aus den Studien geht allerdings nicht hervor, ob die Markerstoffe wirklich in die anorganische Komponente des Dentins eingebaut werden, oder ob es sich um Anreicherungen in den Odontoblastenfortsätzen, die sich in den Dentinkanälen befinden, handelt.

Neben dem bisher besprochenen Primärdentin gibt es nach Abschluss der Zahnbildung in der Pulpaöhle abgelagertes Sekundärdentin und als Reaktion auf äußere Einflüsse gebildetes Tertiärdentin. Beide Dentinarten können sich, wenn sie nach einem Ortswechsel gebildet wurden, in ihrem Strontiumisotopenverhältnis vom Primärdentin unterscheiden. Deshalb ist bei der Beprobung von Dentin stets darauf zu achten, dass die Proben nur aus dem Bereich des Primärdentins genommen werden, oder gezielt Sekundär- bzw. Tertiärdentin beprobt wird.

Bedeutung für Strontiumisotopenanalysen mit archäologischer Fragestellung: Dentin wird nicht primär zum Nachweis von Ortswechseln herangezogen, hat aber eine sehr wichtige Funktion für das Erkennen von postmortalen Veränderungen während der Bodenlagerung.

Besonders bei jungen Individuen, bei denen die Dentinkanäle noch weitgehend offen sind, sollte sowohl der Absolutgehalt an Strontium als auch sein isotopisches Verhältnis demjenigen des unmittelbar darüberliegenden Zahnschmelzes ähneln²⁵. Beide Materialien werden ca. gleichzeitig gebildet und unterliegen danach keinen regelhaften Umbauprozessen mehr.

Was dagegen Dentin und Zahnschmelz grundlegend unterscheidet, sind ihr Anteil an organischer Substanz und ihre Struktur. Während Zahnschmelz sehr dicht ist, ist Dentin aufgrund der dieses durchziehenden Dentinkanäle eher porös, womit es Knochenmaterial ähnelt. Diese Porosität ist Ursache für eine leichtere Kontaminationsanfälligkeit während der Bodenlagerung, als das für Zahnschmelz der Fall ist. Im Boden zirkulierende Wässer können leicht durch die Kanäle in das Dentin eindringen und dort fremde Mineralien – mit anderen Strontiumisotopenverhältnissen – ausfallen oder wahrscheinlich auch im Dentinmaterial direkt für Austauschprozesse sorgen.

²⁵ Für die Homogenität des Strontiumgehaltes in einem Dentin und Schmelz umfassenden Zahnquerschnitt vgl. <http://iummix.terra.unimi.it/www/scoulagnm/mueller.rft> Fig. 1 und Montgomery et al. 1999, Fig. 1 und 2. Da bei

Strontium keine Fraktionierung bei der Einlagerung in verschiedene Gewebe zu erwarten ist, ist auch für die isotopische Zusammensetzung von einer Homogenität im Zahnquerschnitt auszugehen.

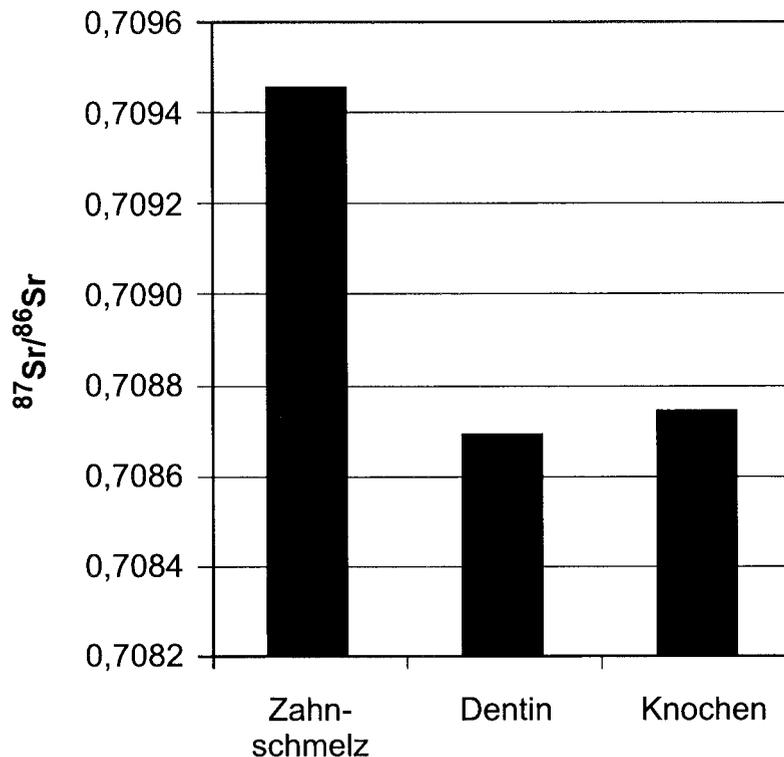


Abb. 10 Strontiumisotopenverhältnisse in einem Schweinezahn aus dem römischen Militärlager von Dangstetten. Die deutlichen Unterschiede zwischen Zahnschmelz und Dentin und die Ähnlichkeit zwischen Dentin und Knochen weisen auf eine Alteration des Strontiumisotopenverhältnisses von Dentin und Knochen während der Bodenlagerung hin.

Unterscheiden sich nun bei jungen Individuen die Strontiumisotopenverhältnisse zwischen Dentin und Zahnschmelz, so kann das als Hinweis auf Kontamination des Dentins angesehen werden. Das Wissen um Kontamination von Dentin wäre noch kein großer Erkenntnisfortschritt, da Dentin gar nicht direkt zum Erkennen von Mobilität herangezogen wird. Knochen hat allerdings eine ähnlich poröse Struktur wie Dentin und ist daher in der gleichen Weise für Kontamination anfällig.

Unterscheiden sich Strontiumisotopenverhältnisse zwischen Knochen und Zahnschmelz, so könnte dies zum einen aufgrund des ständigen Knochenumbaus (s. S. 609ff.) als Hinweis auf einen Ortswechsel angesehen werden. Es kann aber zunächst ebenso nicht ausgeschlossen werden, dass dieses Ergebnis auf Alterationen während der Bodenlagerung zurückzuführen ist. Unterschiede in den Messwerten der beiden Zahngewebe können als deutlicher Hinweis gewertet werden, dass auch Knochenmaterial kontaminiert ist. Dies wird umso deutlicher, je ähnlicher sich die Daten für Dentin und Knochen sind²⁶.

Dies wird z.B. aus den Daten eines Schweinezahnes aus dem römischen Militärlager von Dangstetten (Ldkr. Waldshut, Baden-Württemberg) deutlich (Abb. 10). Während sich Dentin und Zahnschmelz deutlich voneinander unterscheiden, ist das Strontiumisotopenverhältnis von Dentin und Knochen sehr ähnlich, was auf eine Alteration der beiden letztgenannten Materialien während der Bodenlagerung hinweist.

Der Untersuchung von Dentin kommt insgesamt eine wichtige und bislang in der Forschung kaum wahrgenommene Bedeutung bei der Einschätzung der Kontaminationsgefahr im jeweiligen Boden-

²⁶ Für Veränderungen von Strontiumisotopenverhältnissen in Dentin und deren Anwendung in Hinblick auf die Feststellung von Kontamination von Knochenmaterial vgl. Budd et al. 2000. Ähnliche Ergebnisse erbrachten Untersu-

chungen der Elemente Strontium und Barium in den drei biogenen Geweben von Faunenresten aus Süddeutschland (Knipper 2005).

milieu zu. Sie lässt über einen Analogieschluss Aussagen darüber zu, inwieweit Knochenmaterial in Bezug auf menschliche Mobilität interpretierbar ist.

Knochen

Die dritte biogene Hartschubstanz im menschlichen und tierischen Organismus ist Knochen. Der äußeren Form nach unterscheidet man drei Arten von Knochen: Langknochen der Extremitäten, Plattenknochen wie Becken oder Schädel und Kurzknochen mit unregelmäßigen Formen, wie z.B. die Hand- und Fußwurzelknochen (White/Arend Folkens 2000, 23).

Nach ihren strukturellen Eigenschaften differenziert man zwischen Kompakta und Spongiosa. Die Kompakta – auch »Corticalis« genannt – ist sehr dichtes Gewebe, das die äußere Umgrenzung von Knochen bildet. Wegen ihrer Dicke ist die Kompakta im Schaftbereich der Langknochen, besonders des Femurs, für Strontiumisotopenanalysen von besonderer Bedeutung. Die Spongiosa ist aufgelockertes Knochenmaterial mit vielen Hohlräumen. Sie bildet das Innere von Langknochen im Bereich der Gelenkenden und füllt Wirbel, Kurz- und Plattenknochen aus (White/Arend Folkens 2000, 23; Christiansen 2001, 7). Die molekulare und zelluläre Struktur der beiden Knochentypen ist identisch. Der einzige Unterschied besteht in der Porosität.

Chemische Zusammensetzung und histologischer Aufbau: Auch Knochen ist ein Kompositgewebe aus einer organischen und einer anorganischen Phase. Die anorganische Phase gibt ihm Härte, während der organische Anteil für seine Elastizität verantwortlich ist (White/Arend Folkens 2000, 25). Knochen besteht zu ca. 50% aus anorganischer, zu 25-30% aus organischer Substanz und zu 20-25% aus Wasser. Hydroxylapatit hat auch in Knochen mit ca. 86% den größten Anteil an der anorganischen Komponente. In ihm sind zahlreiche Spurenelemente – darunter Strontium – eingelagert (Mörrike et al. 1989, 2-36). Knochen hat im Vergleich zu anderen biogen entstandenen Materialien sehr kleine Apatitkristalle, die in eine organische Matrix eingebettet sind, die zu – je nach Autor – zwischen 85 und 95% aus Kollagen besteht²⁷. Die restlichen 5%-15% der organischen Substanz werden von über 200 »nicht-kollagenen« Proteinen gebildet (Lowenstam/Weiner 1989, 152-153, 158-162). Der organische Anteil des Knochens ist nahezu frei von Strontium.

Knochenproben für Strontiumisotopenanalysen werden zumeist aus der Kompakta entnommen, weshalb auf deren histologischen Aufbau und die Bedeutung, die ihre Entstehung für die Strontiumisotopenanalyse hat, etwas genauer eingegangen werden soll. Ihre histologischen Grundbausteine sind die sog. Havers'schen Systeme oder Osteone, zylinderförmige Gebilde mit einem Durchmesser von ca. 0,3 mm und einer Länge von 2 bis 5 mm (Abb. 11).

Das Zentrum eines jeden Osteons bildet ein Kanal mit Bindegewebe und Blutgefäßen zur Ver- und Entsorgung des Knochengewebes, der von vier bis acht Knochenlamellen umgeben wird (White/Arend Folkens 2000, 26; Christiansen 2001, 7; Mörrike et al. 1989, 2-42). In kleinen Löchern oder Vertiefungen (*Lakunen*) in den Knochenlamellen befinden sich die Osteozyten, Knochenzellen, die durch sehr kleine Kanälchen (*Canaliculi*) miteinander in Verbindung stehen und versorgt werden (White/Arend Folkens 2000, 26; Christiansen 2001, 7). Jedes Havers'sche System wird von einer fast ausschließlich aus anorganischer Substanz bestehenden Zementschicht umgrenzt (Christiansen 2001, 7).

Spongiosa ist wesentlich feineres Knochenmaterial. Sie besteht zwar auch aus Knochenlamellen, besitzt aber keine Havers'schen Systeme (White/Arend Folkens 2000, 26; Christiansen 2001, 7; Mörrike et al. 1989, 2-42).

Knochenumbau und Änderung der stofflichen Zusammensetzung im Laufe des Lebens: Die Havers'schen Systeme sind das Produkt eines ständig stattfindenden Umbaus des Knochens, ein für die Mobilitätsentwicklung grundlegender Prozess. Knochenumbildung oder -umbau (engl. *turnover* oder *remodeling*) meint einen während des gesamten Lebens stattfindenden Auf- und Abbauprozess von Knochen, der keine grundlegenden Veränderungen in der Menge, Geometrie oder Größe des Knochens zur Folge

²⁷ Mörrike et al. 1989, 2-36; Lowenstam/Weiner 1989, 152-156; White/Arend Folkens 2000, 25.

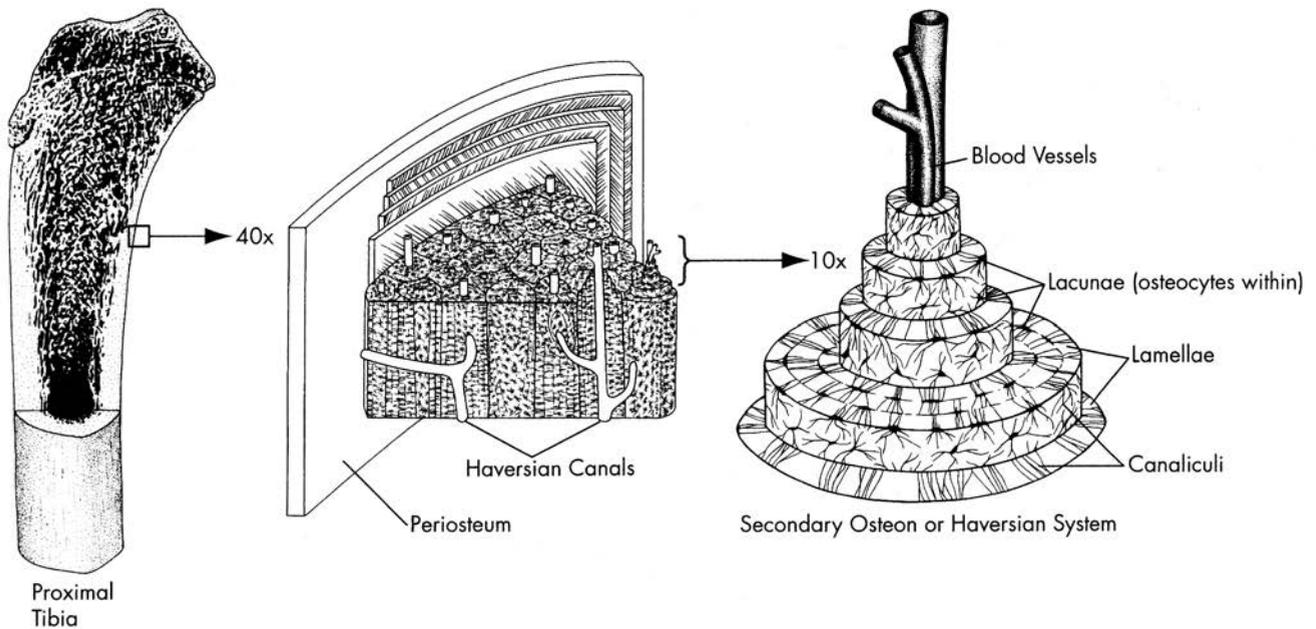


Abb. 11 Makro- und Mikrostruktur von kompaktem Knochen. Deutlich wird der Aufbau aus Havers'schen Systemen (White/Arend Folkens 2000, Fig. 2, 7).

hat (Frost 1969, 212; Parfitt 1984, S38; Eriksen 1986, 397). Knochenumbau hat den Zweck, Beschädigungen zu reparieren und den Knochen an veränderte physische Belastungen anzupassen (Christiansen 2001, 9).

Zwei verschiedene Knochenzellarten, die Osteoklasten und die Osteoblasten, sind maßgeblich an den Umbauvorgängen beteiligt. Die Osteoblasten (Knochenaufbauzellen) sind für die Synthetisierung von neuem Knochenmaterial an den Stellen, an denen es vorher durch Osteoklasten (Knochenabbauzellen) abgebaut wurde, verantwortlich (White/Arend Folkens 2000, 27; Mörike et al. 1989, 2-40).

Der Knochenumbau²⁸ wird mit der Bildung von Osteoklasten eingeleitet, die an einer bestimmten Stelle beginnen, Knochen abzubauen. Dabei bildet sich eine Kavität mit rundem Querschnitt. Die Abbaufont bewegt sich für ca. vier bis sechs Wochen mit einer Geschwindigkeit von ca. 5-10µm pro Tag senkrecht zur Abbauoberfläche. Im Skelett eines normal großen erwachsenen Menschen beginnt etwa alle 10 Sekunden irgendwo ein solcher Knochenabbauprozess (Parfitt 1984, S39). Kommt der Knochenabbau zur Ruhe, bildet sich an der Wand der entstandenen Kavität eine hoch mineralisierte Zementschicht, die die äußere Begrenzung des neu entstehenden Osteons ist. In der darauffolgenden Knochenbildungsphase füllen die Osteoblasten den Hohlraum wieder mit aus konzentrischen Lamellen bestehendem Knochenmaterial auf.

Ist eine solche Umbausequenz durchlaufen, liegt ein neues, aus neuem Knochenmaterial bestehendes Osteon oder Havers'sches System vor (Frost 1985, 216). Die zeitliche Dauer eines solchen Zyklus wird in der Literatur sehr unterschiedlich angegeben. Je nach Autor schwankt sie zwischen drei (Frost 1985, 217, 220) und fünf bis sechs Monaten (Christiansen 2001, 9).

Auch in der Spongiosa laufen ständig Knochenumbauprozesse ab. Die Resorption verläuft hier allerdings nicht senkrecht, sondern waagrecht zur Knochenoberfläche. Es entstehen zwar auch neue Knochenlamellen. Diese gehörten allerdings nicht zu Havers'schen Systemen wie in der Kompakta.

Entscheidend für die Strontiumisotopenanalyse ist, dass mit dem Knochenumbau auch ein ständiger Austausch des Calciums und des Phosphats sowie der Spurenelemente, incl. Strontium, stattfindet (Bud-

²⁸ Parfitt 1984; Steiniche 1995, 6-7; Jaworski 1984; Eriksen 1986, 379-380.

decke 1981, 62). Somit wird nach einem Ortswechsel Strontium mit einer anderen isotopischen Zusammensetzung in den Knochen eingebaut, womit sich die Strontiumisotopensignatur von Knochen an den jeweiligen Aufenthaltsort anpassen kann.

Knochenumbaugeschwindigkeit: Die Geschwindigkeit des Knochenumbaus oder die Knochenumbauzeit bezieht sich nicht auf die Dauer eines oben beschriebenen Knochenumbauzyklus zur Bildung eines neuen Osteons, sondern berücksichtigt auch die Ruhezeiten zwischen den einzelnen Umbauzyklen und bezeichnet die Zeit bis zum völligen Austausch des Knochenmaterials. Knochenumbauzeiten werden in %/a angegeben.

Die Kenntnis über diese Knochenumbauzeiten erlaubt es einzuschätzen, wie lange einmal gebildeter Knochen bestehen bleibt, und wie viel Knochenmaterial in bestimmten Zeiteinheiten, ausgetauscht wird. Mit diesen Informationen wäre es möglich, die isotopische Zusammensetzung von Knochen im Hinblick auf Mobilität des untersuchten Individuums zu interpretieren und ggf. Aussagen über den Zeitpunkt von Ortsverlagerungen zu treffen oder zu erkennen, ob mit einem oder mehreren Wohnortwechseln zu rechnen ist.

Im folgenden sollen Knochenumbauraten für einige Skelettelemente nach Literaturlage²⁹ vorgestellt und Probleme, die ihre Anwendung für die Rekonstruktion des Migrationszeitpunktes innerhalb eines Individuallebens hat, diskutiert werden.

Die Knochenumbauraten werden untersucht, indem man den Probanden in bestimmten zeitlichen Abständen Markerstoffe verabreicht und deren Einbau in den Knochen später im Hinblick auf die Geschwindigkeit der Knochenneubildung auswertet (Frost 1969). In einer anderen Methode werden allein aus histologischen Eigenschaften, d.h. zumeist aus dem Verhältnis von vollständigen und unvollständigen Osteonen und aus der Menge der gleichzeitig bestehenden Stellen des Knochenab- und aufbaus pro Flächeneinheit, Schlüsse auf Knochenumbauaktivitäten gezogen. Für diese Analysen sind keine Marker nötig. Sie können auch noch an bodengelagertem Knochenmaterial durchgeführt werden (Wu et al. 1970; Stout/Teitelbaum 1976).

Die in der medizinischen Literatur vorgestellten Untersuchungsergebnisse zeichnen sich meist durch sehr große Variationsbreiten aus. Daten für dieselbe Position im Skelett unterschiedlicher Individuen sind oft bereits innerhalb einer Studie sehr verschieden. Noch größere Unterschiede in den Umbauraten ergeben sich zwischen verschiedenen Studien.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass Spongiosa schneller umgebaut wird als Kompakta (Price et al. 2002, 130, mit Fig. 7). Die Unterschiede zwischen den beiden Formen von Knochengewebe werden in der Literatur jedoch sehr variabel angegeben³⁰, wobei auch für die beiden Arten von Knochengewebe jeweils mit erheblichen Schwankungen zu rechnen ist³¹. Einfluss auf diese Schwankungen können das untersuchte Skelettelement, das Alter eines Menschen oder auch Krankheiten haben. Besonders gut erforscht ist die Geschwindigkeit der Knochenumbildung im Bereich der Spongiosa des Beckenkamms (*Crista Iliaca*). Hier liegt der Knochen dicht unter der Haut und ist demzufolge auch an lebenden Probanden gut zu untersuchen. Daten für den Knochenumbau der *Christa Iliaca* sind in Tab. 2 zusammengestellt.

²⁹ Als problematisch bei der Bearbeitung dieses Kapitels erwies sich, dass die Daten in der medizinischen Literatur sehr weit verstreut und unter den verschiedensten Fragestellungen publiziert sind. Eine neuere, zusammenfassende Arbeit, in der die Knochenumbauraten von verschiedenen Skelettelementen sowie deren Veränderungen mit zunehmendem Lebensalter zusammengestellt wären, ist mir leider nicht bekannt. Viele der in Einzelstudien publizierten Daten wurden an Patienten mit sehr unterschiedlichen Leiden erhoben und sind nicht uneingeschränkt auf gesunde Menschen übertragbar.

³⁰ Je nach Studie schwanken die Angaben zwischen einem viermal schnelleren (Kompakta: 2,5%/a, Spongiosa:

10%/a: Pate 1994, 165), einem doppelt so schnellen (Cochran et al. 1994, 396) und einem ca. um 10% schnelleren (Christiansen 2001, 20) Umsatz von Spongiosa im Vergleich zur Kompakta.

³¹ So geben z.B. Pødenphant/Engel (1987, Tab. 2) für Spongiosa eine Umbaurate von durchschnittlich 22,7%/a mit Einzelwerten zwischen 0 und 93,1%/a und für Kompakta durchschnittlich 13,7%/a mit Einzelwerten zwischen 0,3 und 69,7%/a an. Die Daten wurden an 43 an Osteoporose erkrankten Frauen erhoben. Dabei ist zu bedenken, dass die erheblichen Schwankungen durch die Krankheit hervorgerufen sein können, und die Werte nicht unbedingt für gesunde Menschen repräsentativ sind.

Personen	Umbaurate in %/a (Anzahl)	Quelle
Männlich (gesund)	82 ± 51 (7)	Christiansen 2001, Tab. 5
Weiblich (gesund)	52 ± 23 (13)	Christiansen 2001, Tab. 5
Gesamt (gesund)	62 ± 40 (29)	Christiansen 2001, Tab. 5
Gesamt (gesund)	52	Steiniche 1995, Fig. 10
Männlich (gesund)	62 [28-154] (8)	Lindholm 1991, Tab. 3
Männlich (Dialysepatienten)	36 ± 41 (15)	Cochran et al. 1994, Tab. 1
Weiblich (Dialysepatienten)	29 ± 34 (8)	Cochran et al. 1994, Tab. 1
Gesamt (Dialysepatienten)	33 ± 38 (23)	Cochran et al. 1994, Tab. 1
1 Osteoporosepatientin (Probenentnahme an verschiedenen Stellen der Crista Iliaca)	18 ± 12 (5)	Pødenphant/Engel 1987, Tab. 2

Tab. 2 Umbauraten für Spongiosa der Crista iliaca [Wertebereich], (Anzahl der Individuen).

Körperteil	Jährliche Umbauraten in %
Wirbel	8,3
Rippen	4,7
Femur	2,9
Schädel	1,9
Tibia	wenige %

Tab. 3 Umbauraten verschiedener Skelettelemente nach Pate 1994, 165 und Lacroix 1971, 132.

Altersklasse	Knochenumbaurate in %/a [Min.-Max.] (Anzahl)		
	30-41	15,1 ± 2,7	[0-32]
55-73	31,1 ± 4,9	[10-59]	(10)

Tab. 4 Knochenumbaugeschwindigkeiten der Spongiosa der Crista Iliaca für Frauen verschiedenen Alters nach Eastell et al. 1988, 744, Tab. 1 und Fig. 1.

Der Knochenumbau aller anderen Skelettelemente ist weniger gut bekannt, jedoch scheinen die Umbauraten hier durchgängig unter denen der Crista Iliaca zu liegen. Zu den sich schneller umbauenden Knochen zählen die Rippen und das Becken, während die Extremitätenknochen wie Tibia, Radius, Ulna, Mittelhand- und Mittelfußknochen niedrigere Umbauraten aufweisen (Frost 1969, 217) (Tab. 3).

Daten über altersbedingte Veränderungen der Knochenumbaugeschwindigkeit sind verschiedenen medizinischen Studien zu entnehmen. Knochenumbau findet bereits während des Wachstums in der Kindheit statt, da insbesondere das Dickenwachstum von Langknochen nur möglich ist, indem an der inneren Begrenzung der Kompakta (zur Markhöhle hin) Knochen abgebaut, und die Markhöhle damit erweitert wird, während gleichzeitig ein Anbau von Knochensubstanz an der Außenwand des Knochens erfolgt (Mörke et al. 1989, 2-42; White/Arend Folkens 2000, 28). Klinische Studien zeigen eine Abnahme der Knochenumbaugeschwindigkeit mit zunehmendem Alter bei Kindern³².

Über die Veränderung der Knochenumbauraten im Erwachsenenalter gibt es in der einschlägigen Literatur unterschiedliche Meinungen und auch Analyseergebnisse. Während in einigen Studien eine Erhöhung der Knochenumbaugeschwindigkeit mit zunehmendem Alter vertreten wird (Parfitt 1979; Pødenphant/Engel 1987; Eastell et al. 1988) (Tab. 4), gehen andere davon aus, dass sich der Knochen-

³² So ergaben z.B. Untersuchungen zum Knochenumbau bei 58 Kindern und Jugendlichen im Alter von 1,4 bis 23 Jahren Werte zwischen >150%/a bei Ein- bis Zweijährigen und 25 bis 50% bei jungen Erwachsenen von über 20 Jah-

ren. Die Schwankungen innerhalb der einzelnen Altersklassen waren erheblich, wie z.B. Umbauraten zwischen 25 und 100% im Jahr in der Altersgruppe 10-15 Jahre zeigen (Parfitt et al. 2000).

Methode (Anzahl der untersuchten Individuen)	Alter				
	12,5 bis 23	bis 32	bis 38	bis 51,9	bis 58,9
Tetracyclin-Markierung (267)	17,7	13,8	11,6	10,3	9,5
Osteonenverhältnisse (189)	18,5	14,5	12,4	10,9	9,6

Tab. 5 Jährliche Umbauraten der 6. Rippe in % (Wu et al. 1970, Tab. 3).

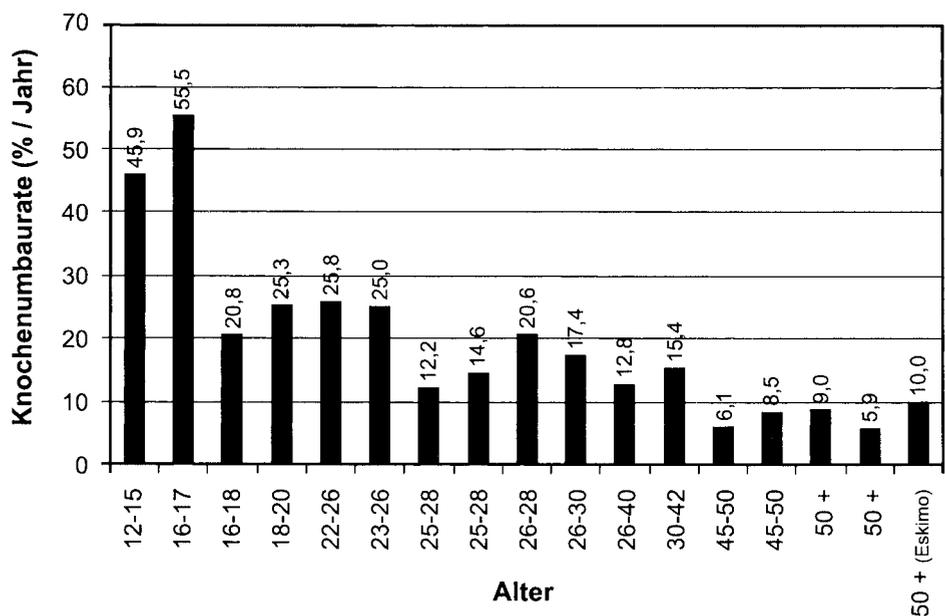


Abb. 12 Jährliche Knochenumbauraten von Rippenkompakta in % (Stout/Teitelbaum 1976, Tab. 1).

umbau mit zunehmendem Alter verlangsamt (Ortner 1975; Melsen/Mosekilde 1978; Jaworski 1984; Eastell et al. 1988, 746-747)³³.

Letzteres konnte besonders für die Rippen statistisch gut belegt werden (Tab. 5, Abb. 12). Über alle Altersgruppen hinweg ergibt sich aus den Daten in Wu et al. (1970) und Stout/Teitelbaum (1976) ein durchschnittlicher Knochenumbau der Rippen von 17%/a, was deutlich über dem von Pate 1994 aufgeführten Wert von 4,7%/a liegt (vgl. Tab. 3). So niedrige Werte wurden in den beiden anderen Studien nie festgestellt. Sie könnten möglicherweise auf ein Missverständnis aufgrund un-

³³ Diese Diskrepanz wurde mit einer »Konsolidierungsphase« des menschlichen Skeletts zwischen 18 und 35 Jahren begründet, in der die Umbaugeschwindigkeit des Knochenmaterials noch abnimmt, während danach mit einer Zunahme der Umbaufrequenzen zu rechnen ist (Eastell et

al. 1988). Verschiedene, voneinander unabhängige Studien konnten diese Annahme jedoch nicht bestätigen, sondern zeigten jeweils abnehmende Umbaufrequenzen zwischen zwölf und über 50 Jahre alten Individuen (Wu et al. 1970; Stout/Teitelbaum 1976).

terschiedlicher Einheiten, in denen Knochenumbildungsdaten angegeben werden, zurückzuführen sein³⁴.

Weiterhin können Krankheiten erheblichen Einfluss auf die Umbaufrequenzen von Knochenmaterial haben. Sie rufen vielfach noch variabelere Knochenumbauzeiten als bei gesunden Menschen hervor (Eriksen 1986, 383; Parfitt 1979, 2). Verschiedene Studien an Osteoporosepatienten belegten sowohl normale als auch höhere und niedrigere Umbaufrequenzen (Steiniche 1995, 24; s. auch: Jowsey/Gordan 1971)³⁵. Auch für Krankheiten wie Hyperparathyroidismus (Christiansen 2001) oder auch Alkoholismus (Lindholm et al. 1991) sind Einflüsse auf die Knochenumbautätigkeit belegt.

Interpretation der Knochenumbauzeiten: In verschiedenen Studien, die sich die Strontiumisotopenmethode zur Erfassung von Mobilität in der Ur- und Frühgeschichte zu Nutze machen, wird von sehr kurzen Knochenumbauzeiten ausgegangen. Wiederholt wurde angenommen, dass je nach Skelettelement nach 5 bis 20 Jahren mit einem vollständigen Knochenumbau zu rechnen sei, und dann nach einem Wechsel des Aufenthaltsortes die Knochen die Strontiumisotopensignatur des neuen Nahrungszugangsbereiches angenommen hätten³⁶. Diese kurzen Umbauzeiten beruhen auf einer Fehlinterpretation der oben angegebenen Prozentzahlen für den jährlichen Austausch von Knochenmaterial. Ihnen liegt sicherlich die Annahme zugrunde, dass es sich beim Knochenumbau um einen »linearen« Prozess handele, von dem immer nur das jeweils älteste Knochenmaterial betroffen ist. Dies würde bei einem durchschnittlichen jährlichen Knochenumbau von 10% bedeuten, dass nach 10 Jahren die gesamte Knochensubstanz erneuert ist.

Das ist jedoch nicht der Fall, da der Knochenabbau durch die Osteoklasten nicht immer genau im Zentrum eines bereits bestehenden Osteons einsetzt. In den Resorptionskanälen kann statt dessen gleichzeitig zu unterschiedlichen Osteonen gehörendes Knochenmaterial, das damit auch unterschiedlichen Alters ist, abgebaut werden. Daraus ergibt sich, dass in den einzelnen Skelettelementen neueres und älteres Knochenmaterial nebeneinanderher bestehen. Es kann vorkommen, dass eine bestimmte Stelle im Knochen schon mehrmals die gesamte Knochenumbausequenz durchlaufen hat, während eine andere in derselben Zeit kein einziges Mal vom Knochenabbau betroffen war. Daraus folgt, dass man bei einer jährlichen Knochenumbaurate von 10% erst nach ca. 50 Jahren mit einem vollständigen Austausch der Knochensubstanz rechnen kann (Abb. 13, Kurve 3).

Im histologischen Bild eines Knochens kann man die beschriebenen Prozesse daran erkennen, dass nur die zuletzt gebildeten Osteone vollständig erhalten sind. Ältere dagegen werden meist durch andere »abgeschnitten«. Die Knochenlamellen, die zu bereits beschädigten Osteonen gehören und als »Schaltlamellen« bezeichnet werden, befinden sich zwischen den vollständigen, später gebildeten Havers'schen Systemen (Mörke et al. 1989, 2-42).

Für die Strontiumisotopenanalyse bedeutet das, dass bereits vor einem Wohnortwechsel angelegte Schaltlamellen teilweise noch sehr lange erhalten bleiben können, und bei der Beprobung eine Mischung zwischen Strontium, das vor dem Wohnortwechsel im Knochen abgelagert wurde, und solchem, das erst danach in das Gewebe gelangte, entsteht. Bei der herkömmlichen Probenentnahme kann Material aus vollständigen Osteonen und solches aus möglicherweise viel älteren Schaltlamellen nicht getrennt werden.

³⁴ Je nach dem, ob man den Knochenumbau auf die jeweils untersuchte Oberfläche, auf das Gewebevolumen oder auf das Knochenvolumen bezieht oder angibt, wie oft an einer bestimmten Stelle Osteoklasten mit dem Knochenabbau beginnen (Aktivierungsfrequenz), werden Knochenumbaudaten in der Literatur in unterschiedlichen Einheiten angegeben und sind somit oft nicht direkt miteinander vergleichbar. Eine Gegenüberstellung gleicher Daten in unterschiedlichen Einheiten enthält z.B. Parfitt et al. (2000).

³⁵ Besonders detaillierte Daten liegen für eine 74jährige Patientin vor, die im Rahmen einer Studie zu Knochenumbau

der Crista Iliaca Knochenmarker verabreicht bekommen hatte und unverhofft, vor Abschluss der Untersuchungen, verstarb. Über das Skelett verteilt wurden 48 Proben sowohl aus der Kompakta als auch der Spongiosa untersucht. Dabei wurden Umbauraten zwischen 0 und 37%/a festgestellt, wobei es teilweise erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Körperseiten gab. In einzelnen Fällen gab es sogar Hinweise auf einen schnelleren Umbau von Kompakta im Vergleich zur Spongiosa (Pødenphant/Engel 1987).

³⁶ Price et al. 1994a, 414; Price et al. 2000, 906-907; Ezzo/Price 2002, 501.

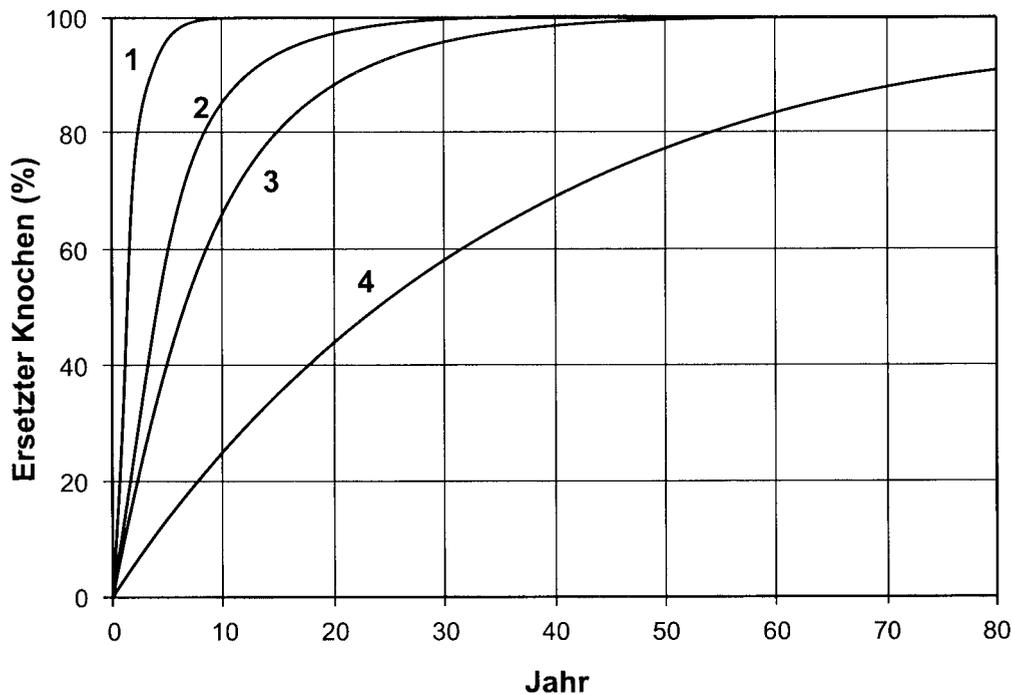


Abb. 13 Geschätzter Verlauf des Knochenumbaus für verschiedene Skelettelemente. Für die einzelnen Knochen wurden folgende jährliche Umbauraten zugrunde gelegt: 1. *Crista Iliaca*: 50% (Steiniche 1995; Christiansen 2001); 2. Rippe: 17% (aus oben dargestellten Daten errechnet); 3. Gesamtskelett: 10% (Frost 1969; Christiansen 2001); 4. Femur: 2,9% (Pate 1994).

Legt man die oben angeführten Umbaumechanismen zugrunde, so ist bei sich schnell umbauendem Knochenmaterial wie der Spongiosa der *Crista Iliaca* mit jährlichen Umbauraten von 50% nach ca. 10 Jahren mit einer vollständigen Anpassung an die Strontiumisotopie der neuen Umgebung zu rechnen, während dieser Prozess bei Rippen ca. 20 bis 30 Jahre dauert. Kompakta des Oberschenkelknochens baut sich nur ausgesprochen langsam um (2,9% im Jahr nach Pate 1994), so dass für diesen Knochen auch nach einer Wanderung im frühen Erwachsenenalter kaum mit einer vollständigen Anpassung an die neue Strontiumisotopie zu rechnen ist (Abb. 13).

Bei einer noch während des Dickenwachstums der Langknochen im Kindesalter stattfindenden Wanderung hingegen, ist es möglich, dass Knochenmaterial untersucht wird, das ausschließlich nach dem Wohnortwechsel gebildet wurde und keine älteren Schaltlamellen enthält. Ein noch im Dickenwachstum befindlicher Knochen ist im Bereich seiner äußeren Oberfläche jünger als in Bereichen, die weiter von dieser entfernt liegen.

Ein weiteres Problem bei der Interpretation der Knochenumbauzeiten liegt darin, dass die Bestandteile des von den Osteoklasten resorbierten Knochens möglicherweise nicht vollständig aus dem Körper ausgeschieden und durch neue ersetzt werden. So ist nach einer Studie von Eastell et al. (1988, 745) mit einem zunehmenden Knochenumbau im Alter nicht auch gleichzeitig ein zunehmender Austausch von Calcium festzustellen. Für die Strontiumisotopenanalyse würde das bedeuten, dass sich bereits längere Zeit im Körper befindliches Strontium, das sich in seiner Isotopie von dem des aktuellen Wohnortes unterscheiden kann, nach einer Resorption der Knochensubstanz, in der es eingelagert war, nicht ausgeschieden wird, sondern einen weiteren Einbau erfahren kann. Dies würde heißen, dass ein vollständiger Umsatz des Knochenmaterials nicht gleichzeitig einen vollständigen Austausch seiner Grundbausteine (und Spurenelemente) bedeutet, sondern diese auch noch länger im Körper verweilen können. Ein weiteres Argument für diesen Sachverhalt ist die Tatsache, dass der Gehalt von nicht essentiellen Spurenelementen mit zunehmendem Alter eines Individuums ansteigt (Horn et al. 1997, 145).

Diese hier angerissene Problematik bedarf in Zukunft noch weiterer Grundlagenforschung.

Bedeutung von Knochen für die Strontiumisotopenanalyse: In den bisher durchgeführten Strontiumisotopenanalysen spielen Knochen eine entscheidende Rolle. Durch die nachgewiesenen ständigen Umbauprozesse erfolgt auch ein ständiger Austausch von Spurenelementen wie Strontium. Das bedeutet, dass nach einem Ortswechsel in eine Region mit sich vom vorherigen Aufenthaltsort unterscheidendem geologischen Untergrund Strontium mit anderer isotopischer Zusammensetzung in den Knochen eingebaut, und die Isotopensignatur zunehmend in Richtung des aktuellen Aufenthaltsortes verändert wird. Wenn also Zahnschmelz, der nach seiner Bildung in der Kindheit nicht oder kaum verändert wird, und Knochen desselben Individuums unterschiedliche Strontiumisotopensignaturen aufweisen, ist daraus zu schließen, dass der Zahnschmelz des Individuums nicht an dem Ort gebildet wurde, von dem das in den letzten Jahren vor dem Tod in die Knochen eingebaute Strontium stammt. Es liegt also nahe, dass ein Ortswechsel zwischen der Kindheit und den letzten Jahren vor dem Tod stattgefunden hat³⁷.

Differenzierung von Einheimischen und Zuwanderern

Aus den bisher dargestellten Grundlagen lassen sich verschiedene Kriterien zur Differenzierung von Einheimischen und Zuwanderern in einer Population ableiten. Einige davon gingen regelhaft in die bisherigen Forschungen ein, während andere kaum Beachtung fanden. Sicher ist jedoch, dass die verschiedenen Kriterien teilweise zu sehr unterschiedlichen Zuwandererquoten führen, und in diesem Bereich noch weitere Grundlagenforschung nötig ist.

Vergleich von Zahnschmelz und Knochen desselben Individuums

Wie bereits ausführlich erörtert, spiegeln die verschiedenen Hartgewebe der Zähne und Knochen unterschiedliche Lebensabschnitte eines Individuums wider. Sehr allgemein kann man deshalb sagen, dass bei einem Individuum ein Ortswechsel vorlag, wenn sich die Strontiumisotopie des Zahnschmelzes, der in der Kindheit gebildet wird, und jene von Knochen, der spätere Lebensabschnitte widerspiegelt, signifikant unterscheiden.

In einer Probenserie mehrerer Individuen gibt es meist solche, bei denen sich Zahnschmelz und Knochen so deutlich voneinander unterscheiden, dass man sie rein intuitiv als Zuwanderer ansprechen möchte. Bei anderen ist die Strontiumisotopie beider Gewebe ähnlicher, aber nicht identisch. In solchen Fällen bedarf es eines objektiveren Kriteriums zur Abgrenzung von Zuwanderern und Einheimischen.

Es muss also ein Mindestunterschied zwischen Knochen und Zahnschmelzwerten festgelegt werden, der als signifikant für einen Ortswechsel angesehen wird. Obwohl dieser Wert in Anlehnung an die Unterschiede der Strontiumisotopenverhältnisse zwischen den geologischen Einheiten der Region festgelegt werden sollte, in der der oder die betrachteten Fundorte liegen, muss er mehr oder weniger willkürlich gewählt werden. Für Studien in Südbayern wurde so z.B. ein Unterschied von 0,001 zwischen dem Strontiumisotopenverhältnis von Zahnschmelz und Knochen desselben Individuums als Grenzwert festgelegt.³⁸

Es bleibt zu bedenken, dass nach diesem Kriterium nur Zuwanderer erkennbar sind, die bereits einige Zeit vor ihrem Tod in der Zielregion gelebt haben: Je verschiedener das biologisch verfügbare Strontium (vgl. S. 620ff.) zwischen der Herkunfts- und der Zielregion ist, desto schneller wird die Differenz von 0,001 zwischen Knochen und Zahnschmelz erreicht sein. Dennoch besteht gerade bei Wanderungen

³⁷ Price et al. 1998, 407; Price et al. 2000, 906-907; Price et al. 2001, 596; Price et al. 2004, 14.

³⁸ Dieser Wert kam in Untersuchungen an glockenbecherzeitlichen (Grupe et al. 1997, 520; Price et al. 2004, 30),

völkerwanderungszeitlichen (Schweissing/Grupe 2000, 100) und spätrömischen (Schweissing/Grupe 2003a, 1375) Individuen aus der Region zum Einsatz.

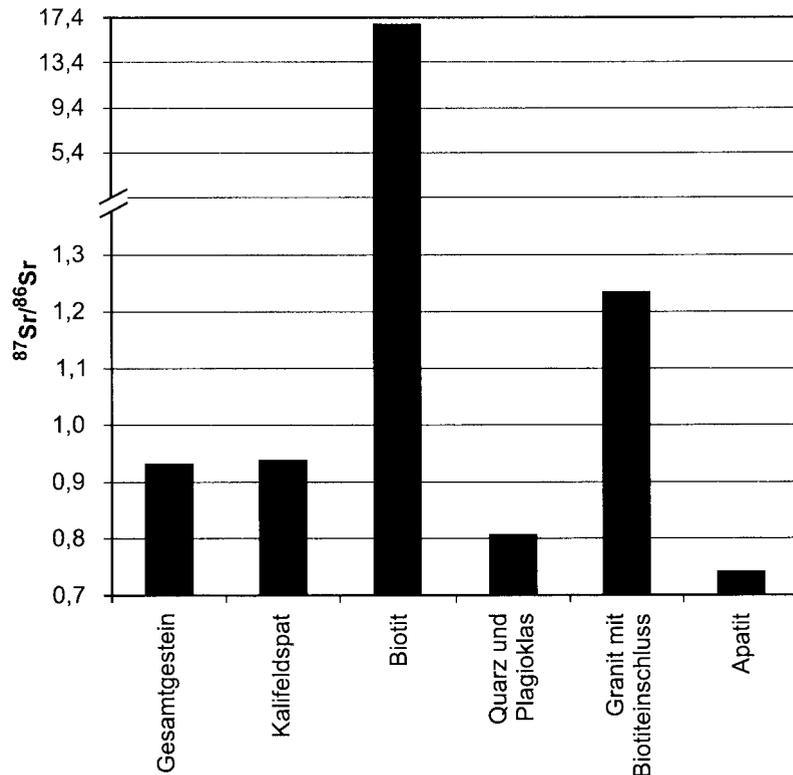


Abb. 14 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in verschiedenen Mineralen eines bei Marbach in Niederösterreich anstehenden Granulits (Daten nach Arnold/Scharbert 1973, Tab. 1 und 2).

zwischen geologisch recht ähnlichen Regionen die Gefahr, dass Zuwanderer aufgrund einer zu kurzen Aufenthaltsdauer in der Zielregion nach diesem Kriterium unerkentt bleiben.

Problematik des Vergleichs mit Gesteins- und Bodenproben vom Fundort

Aufgrund der Tatsache, dass das biologisch verfügbare Strontium auf Verwitterungsprodukte von Gesteinen zurückgeht, liegt es nahe, die für menschliche Zähne und Knochen erhobenen Daten mit Strontiumisotopenverhältnissen der jeweils am Fundort anstehenden geologischen Einheiten zu vergleichen und diese als Kriterium für das Erkennen von Zuwanderern heranzuziehen. Dagegen sprechen jedoch mehrere Unsicherheitsfaktoren:

1. Die Zusammensetzung von Gesteinen aus verschiedenen Mineralen mit unterschiedlichen Verwitterungsraten:

Die meisten magmatischen und metamorphen Gesteine sowie klastischen Sedimente sind polymineralische Gesteine, d.h. sie bestehen aus einem Gemisch von verschiedenen Mineralen, die höchst unterschiedliche Strontiumisotopenverhältnisse aufweisen können. Minerale mit hohen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen sind z.B. Glimmer (Biotit und Muskovit), während Feldspäte, Apatite und Hornblendens niedrige Strontiumisotopenverhältnisse aufweisen (Bullen et al. 1997, 291)³⁹ (Abb. 14).

³⁹ Strontiumisotopenuntersuchungen an Einzelmineralen oder bestimmten Teilen des Gesamtgesteins sind aus Studien an einer Reihe von unterschiedlichen Gesteinen aus verschiedenen Regionen bekannt: z.B. von Granuliten aus Niederösterreich (Arnold/Scharbert 1973), von Eklogit und Gneis der Münchberger Gneismasse in Nordostbayern (Gebauer/Grünenfelder 1979), von Gneis am südöstlichen Tauernfenster in Österreich (Cliff 1971), vom

Leuchtenberger und Flossenbürger Granit in der Oberpfalz (Köhler et al. 1974), von Granodiorit, Biotitgranit und Leukogranit des Trois Seigneurs Massif in den Pyrenäen, Frankreich (Bickle et al. 1988), von permischen Vulkaniten im Schwarzwald (Schleicher et al. 1983; Lippolt et al. 1983) und ebenfalls im Schwarzwald anstehenden Migmatiten (Kalt et al. 1994).

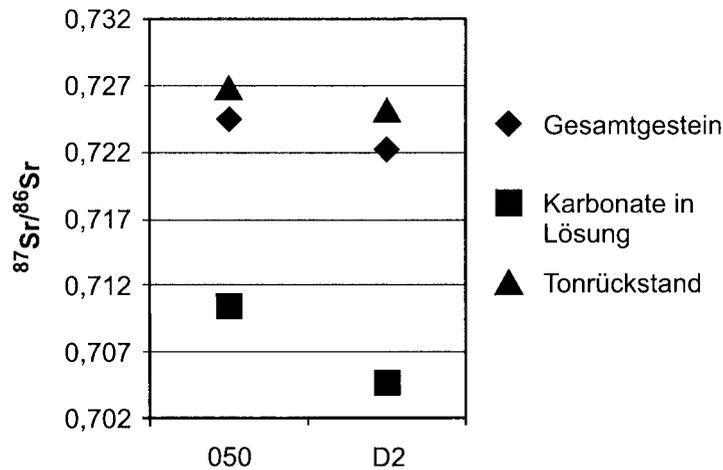


Abb. 15 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse der Oberen Süßwassermolasse am Nördlinger Ries, Süddeutschland. Deutlich sind die Unterschiede zwischen Gesamtgestein, in Ameisensäure löslichen Karbonaten und unlöslichen Tonrückständen (Daten nach: Horn et al. 1985, Tab. 2 und Tab. 3).

Problematisch für die Verwendung von Gesteinsdaten zur Erkennung von Zuwanderern sind nicht nur die unterschiedlichen Strontiumisotopenverhältnisse der Einzelminerale, sondern vor allem ihre unterschiedliche Verwitterungsanfälligkeit. Glimmer und Feldspäte sind recht unbeständige Minerale, während Quarz nur sehr langsam verwittert. Die unterschiedlichen Verwitterungsraten der einzelnen Minerale haben zur Folge, dass das in ihnen enthaltene Strontium den Pflanzen nicht gleichermaßen zur Aufnahme zur Verfügung steht. Pflanzen können nur sich in Lösung befindliches Strontium aufnehmen, weshalb leichter verwitternde Minerale das Isotopenverhältnis des biologisch verfügbaren Strontiums dominieren. Deshalb stimmt das in einer Gesamtgesteinsanalyse – d.h. durch Auflösung des gesamten Gesteins – bestimmte Strontiumisotopenverhältnis meist nicht mit dem biologisch verfügbaren Strontium überein, das einer differenzierten Lösung des Gesteins entstammt (vgl. Graustein 1988, 494; Land et al. 2000, 320). Diese Tatsache zeigt sich z.B. deutlich in Lösungsexperimenten an Gesteinsproben der Oberen Süßwassermolasse aus dem Nördlinger Ries, wo es signifikante Unterschiede zwischen dem Strontiumisotopenverhältnis des Gesamtgesteins, der in Ameisensäure löslichen Karbonate und des unlöslichen Tonrückstands gibt (Horn et al. 1985) (Abb. 15).

2. Variationen im Bodenprofil:

Diese unterschiedliche Verwitterungsanfälligkeit bzw. Löslichkeit der einzelnen Minerale bewirkt, dass sich das Strontiumisotopenverhältnis des auf einem bestimmten Gestein entstehenden Bodens im Laufe der Zeit ändern kann. Deshalb sind in einem Bodenprofil Horizonte unterschiedlichen Alters oft durch unterschiedliche Strontiumisotopenverhältnisse charakterisiert (Bullen et al. 1997; Miller et al. 1993) (Abb. 16)⁴⁰.

3. Strontium aus atmosphärischen Quellen:

Verschiedene biologische Studien beschäftigen sich mit aus der Atmosphäre – und nicht aus dem geologischen Untergrund – stammenden, durch Pflanzen aufgenommenen Nährstoffen. Diesbezügliche Analysen wurden beispielsweise in New York (Miller et al. 1993), auf Hawaii (Chadwick et al. 1999) und in New Mexico (Gosz et al. 1983; Graustein/Armstrong 1983; Graustein 1988) durchgeführt. Alle diese Studien kommen zu dem Schluss, dass der Anteil von atmosphärisch transportiertem Strontium einen

⁴⁰ Besonders im oberen Bereich des Profils ist auch mit Einflüssen von durch die Luft oder den Regen aus größeren

Distanzen herantransportiertem Strontium zu rechnen (Miller et al. 1993).

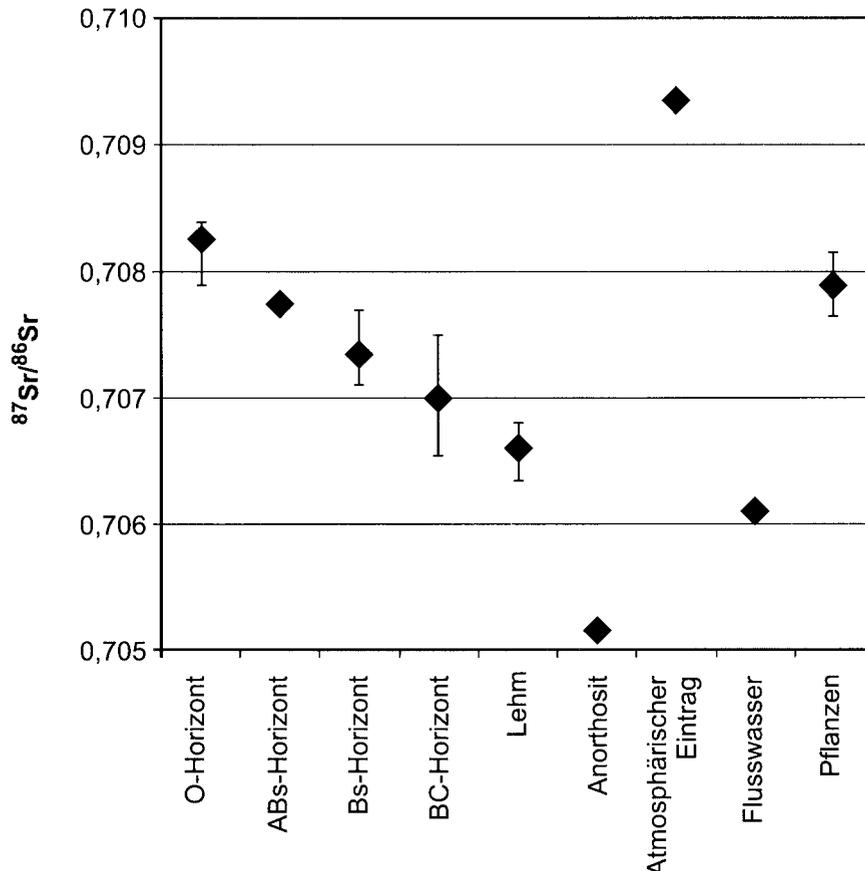


Abb. 16 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse an verschiedenen Positionen in einem Bodenprofil über einem Anorthosit (magmatisches Tiefengestein). Zusätzlich wurde Strontium aus atmosphärischem Eintrag, Flusswasser und der unmittelbar am Standort wachsenden Vegetation eingetragen. Gekennzeichnet sind jeweils der Mittelwert und eine Standardabweichung. Die Daten stammen aus einem Tannenwald am Whiteface Mountain, New York, USA (nach Miller et al. 1993, Fig. 1).

hohen Bestandteil an dem Strontium hat, das Pflanzen aufnehmen und in ihre Gewebe einbauen⁴¹; wobei es sicherlich Unterschiede zwischen offenen oder gar wüstenhaften und dicht bewaldeten, feuchten Landschaften gibt.

Im Zusammenhang mit archäologischen Anwendungen der Strontiumisotopenanalyse fand der Anteil atmosphärischen Strontiums am biologisch verfügbaren Strontium bisher kaum Beachtung⁴². Man führte die Strontiumisotopenverhältnisse einzig und allein auf den geologischen Untergrund zurück. Besonders für Mitteleuropa sind mir auch von biologischer Seite keine Forschungen zu diesem Themenkomplex bekannt geworden. Um seine Bedeutung für das biologisch verfügbare Strontium für archäologische Fundstellen einzuschätzen, bedarf es noch weiterer Grundlagenforschung.

4. Variationen im tierischen und menschlichen Einzugsbereich:

Die angesprochenen geologischen und biologischen Studien zeigen deutlich, dass sehr kleinräumige Variationen im Strontiumisotopenverhältnis von Gesteinen und Böden keine Seltenheit sind. Sie treten

⁴¹ Der Anteil des atmosphärisch transportierten Strontiums betrug z.B.: 90% bzw. 66-80% in den Sangre de Cristo Mountains (New Mexico, USA) (Gosz et al. 1983, Fig. 4; Graustein/Armstrong 1983, Tab. 3) und 53% am Whiteface Mountain (New York, USA) (Miller et al. 1993, Fig. 1).

⁴² Price et al. 2002, 119 schreiben dazu: »However, the impacts of such atmospheric contributions are probably minimal in most areas, and particularly in much of pre-history.«

– sei es durch atmosphärischen Eintrag oder durch unterschiedliche Verwitterungsraten – vertikal, d.h. zwischen verschiedenen Horizonten eines Bodenprofils auf, können aber ebenso auch in horizontaler Richtung vorkommen, wenn verschiedene geologische Schichten an der Erdoberfläche ausstreichen. Menschliche Wirtschaftsgebiete sind nicht nur auf die jeweilige Siedlung beschränkt. Vielmehr befinden sich Anbauflächen in einem bestimmten Umkreis um die Siedlungsstelle herum. Ein Wirtschaftsgebiet kann durchaus Anteil an verschiedenen geologischen Einheiten haben; sei es, dass ackerbauliche Nutzflächen auf verschiedenen Böden liegen, oder dass pflanzliche und tierische Nahrung aus geologisch unterschiedlichen Teilen des jeweiligen Wirtschaftsgebietes stammen. Deshalb sind an einer sehr geringen Probenmenge durchgeführte Gesamtgesteinsanalysen oder auch Analysen des am jeweiligen Fundort vorliegenden Bodens kaum repräsentativ für das gesamte vom Menschen aufgenommene biologisch verfügbare Strontium. Ein mit schwacher Säure gewonnenes Extrakt einer Bodenprobe vom Fundort ist auf alle Fälle repräsentativer als eine Analyse, die das gesamte Material – ungeachtet seines Lösungsverhaltens – umfasst. Aber auch diese Analysen gehen nur von einer sehr geringen Materialmenge aus, die in einem geologisch abwechslungsreichen Gebiet im menschlichen Wirtschaftsraum vorhandene geologische Variationen kaum widerspiegelt.

Vergleich mit Oberflächen- und Grundwasser

Auch Grund- und Oberflächenwasser, das Lebewesen aus Bächen, Flüssen und Seen zugänglich ist, enthält Strontium. Es geht auf Verwitterungsprodukte aus den Gesteinen zurück, über oder durch die das Wasser fließt. Da die Isotopie von im Wasser gelöstem Strontium wohl eher dem biologisch verfügbaren Strontium entspricht als Gesamtgesteinsdaten, haben auch Strontiumisotopenverhältnisse von Gewässern das Potential, als Vergleichswerte für menschliche oder tierische Organismen herangezogen zu werden.

Die Strontiumisotopie von Grund-, Quell- und Flusswasser wurde bisher im Rahmen geochemischer Studien für verschiedene Regionen untersucht.⁴³ Dabei wurde jedoch wiederholt festgestellt, dass es Zusammenhänge zwischen der jahreszeitlich bedingten Niederschlagsmenge und der Strontiumisotopie von Oberflächenwasser gibt, da das Mengenverhältnis von Niederschlags- und Quellwasser in Bächen erheblich variieren kann. Dies hat teilweise deutliche Schwankungen im Strontiumisotopenverhältnis des Wassers zur Folge (bes. Négrel et al. 1997).

Außerdem können in einer geologisch abwechslungsreichen Region Strontiumisotopenverhältnisse in Bächen auch auf kleinstem Raum sehr große Variationen aufweisen. Diese hängen von der geologischen Formation ab, die das Wasser durchfließt, und davon, in welchem Verhältnis Wasser aus verschiedenen Quellgebieten gemischt wird.

Für die archäologische Anwendung von Strontiumisotopenverhältnissen zur Erkennung von Zuwanderern sind Wasserproben aufgrund der möglichen jahreszeitlichen bzw. kleinregionalen Differenzen nicht immer ein zuverlässiges Kriterium, sondern bieten ebenso wie Gesamtgesteinsanalysen eher grobe Anhaltspunkte.

Vergleich mit biologisch verfügbarem Strontium am Fundort

Nachdem Gesteins-, Boden- und Wasserproben nur bedingt verlässliche Kriterien zur Erkennung von Zuwanderern sind, müssen andere Anhaltspunkte für das biologisch verfügbare Strontium aus dem Gebiet, aus dem der Mensch seine Nahrung bezieht, gefunden werden. Das biologisch verfügbare Strontium ist das Strontium, das Organismen über ihre Nahrung aufnehmen können.

⁴³ Z.B. für den Rhein und verschiedene seiner Nebenflüsse: Buhl et al. 1991; Flintrop et al. 1996; in der Po-Ebene: Conti et al. 2000; in Nordschweden: Land et al. 2000; im

Mittelmeerraum: Othman et al. 1997; in den Vogesen: Aubert et al. 2002; im Zentralmassiv: Négrel et al. 1997.

Die erste Station, die dieses passieren muss, sind Pflanzen. In archäologischen Studien wurde Pflanzenmaterial zur Charakterisierung des biologisch verfügbaren Strontiums allerdings bisher kaum herangezogen⁴⁴. Dies kann auf mehrere Gründe zurückgeführt werden:

1. In den archäologischen Hinterlassenschaften ist Pflanzenmaterial nur recht selten. Wenn es erhalten geblieben ist, so ist in den meisten Fällen mit erheblichen Veränderungen während der Bodenlagerung zu rechnen. Obwohl mir diesbezüglich bisher keine Studien bekannt sind, erscheint mir die Möglichkeit der Erhaltung biogener, d.h. zu Lebzeiten der Pflanze entstandener Strontiumisotopenverhältnisse sehr gering⁴⁵.
2. Eine Alternative zu archäologisch überlieferten botanischen Resten könnten rezente Pflanzenproben von den interessierenden Standorten sein. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass besonders im Bereich von landwirtschaftlichen Nutzflächen das Isotopenverhältnis des biologisch verfügbaren Strontiums durch den Eintrag von Düngemitteln heute im Vergleich zur Vergangenheit verändert sein kann (Böhlke/Horan 2000). Außerdem zeigten sich Kohlekraftwerke für die Produktion von Flugaschen verantwortlich, die das Isotopenverhältnis des durch die Luft transportierten Strontiums erheblich verändern können (Straughan et al. 1981). Aus diesen bisher sicherlich nicht ausreichend erforschten Tatsachen bleibt zu schließen, dass vom Vergleich mit rezenten Proben, wenn immer möglich, abzuraten ist.
3. Selbst wenn exzeptionelle Erhaltungsbedingungen von aus archäologischem Kontext stammendem Material oder die weitgehende Abgeschiedenheit des Untersuchungsgebietes von anthropogenen Einflüssen sicherstellen würden, dass die gemessenen Werte tatsächlich für biologisch verfügbares Strontium in der Vergangenheit repräsentativ sind, ist der Einzugsbereich, aus dem eine Pflanze Nährstoffe aufnehmen kann, recht begrenzt. Einzelne pflanzliche Proben von einer Fundstelle wären daher sicherlich kaum – und besonders nicht in geologisch abwechslungsreichen Regionen – für den gesamten Wirtschaftsbereich repräsentativ, aus dem der Mensch seine Nahrung beziehen kann.

Für die Erkennung von menschlichen Zuwanderern an einem bestimmten Ort ist daher die Kenntnis des dort *für den Menschen* biologisch verfügbaren Strontiums entscheidend. Um dieses zu erfassen, hat man in der Strontiumisotopenforschung verschiedene Methoden entwickelt, auf die im folgenden eingegangen werden soll.

Definition über menschliches Knochenmaterial: Ein Kriterium zur Bestimmung des an einem Fundort durch den Menschen aufnehmbaren Strontiums resultiert aus Strontiumisotopenverhältnissen des Knochenmaterials der menschlichen Individuen der jeweiligen Messserie. Wie oben dargestellt (s. S. 609ff.), unterliegen Knochen ständigen Umwandlungsprozessen, weshalb ihre Strontiumisotopie vom jeweiligen Aufenthaltsort des Menschen abhängig ist.

Eine Möglichkeit der Charakterisierung des an einem Fundort für den Menschen biologisch verfügbaren Strontiums ist der Mittelwert aus allen am Fundort gemessenen Knochenwerten plus oder minus zwei Standardabweichungen. Zuwanderer erkennt man über einen Vergleich der Zahnschmelzwerte der einzelnen Individuen mit dem so gebildeten Wertebereich. Alle Individuen, deren Zahnschmelzwerte über oder unter der so definierten Spanne liegen, können als Zuwanderer interpretiert werden (Price et al. 2002, 131).

Obwohl dieses Kriterium in einigen Studien an menschlichem Material zum Einsatz kam (Price et al. 2001; Price et al. 2004), gibt es zwei Gründe, die seine Anwendung in Frage stellen.

⁴⁴ Eine Ausnahme bilden Sillen et al. (1998). In einem Umkreis von 15 km um die Fundstelle Swartkrans im Sterkfontein-Tal in Südafrika wurden systematisch Gesteins- und Bodenproben, aber auch rezente Pflanzen von verschiedenen Stellen untersucht. Während zwischen den Gesteinen unterschiedlicher geologischer Einheiten selbst signifikante Unterschiede des Strontiumisotopenverhältnisses festgestellt werden konnten, waren die Werte für die Pflanzen weitaus weniger variabel. Es konnte lediglich ein

signifikanter Unterschied zwischen Pflanzen im Feuchtgebiet in Bachnähe und den daran angrenzenden Hügeln ermittelt werden.

⁴⁵ Eine Ausnahme könnten Phytolithen (silikatische Ablagerungen in Pflanzenzellen) darstellen, die meist sehr gut erhaltungsfähig sind. Unpubl. Daten von S. Schiegl (Tübingen) und P. Horn (München) zeigen, dass Strontiumisotopenanalysen an Phytolithen prinzipiell möglich sind.

Zum einen dauert es nach einem Wohnortwechsel in eine andere geologische Situation mehrere Jahre, bis sich das Strontiumisotopenverhältnis der Knochen nachweislich in Richtung des biologisch verfügbaren Strontiums am neuen Aufenthaltsort geändert hat. Wenn man das biologisch verfügbare Strontium eines Ortes aus den Knochenwerten aller untersuchten Individuen ableitet, gehen auch Werte von vielleicht kurz vor ihrem Tod zugewanderten Individuen, deren Knochen noch die Strontiumisotopie ihres früheren Aufenthaltsortes widerspiegeln, in die jeweilige Spanne ein. Dies führt dazu, dass diese breiter erscheinen kann, als sie tatsächlich ist.

Die Bestimmung der Individuen als Zuwanderer, deren Zahnschmelzwerte vom Mittelwert aller Knochenwerte \pm zwei Standardabweichungen abweichen, ist ein sehr konservatives Kriterium. Je mehr »späte Zuwanderer« es gibt, desto größer wird der so definierte Bereich und desto größer ist die Gefahr, dass Zahnschmelzwerte von Zuwanderern innerhalb dieses Bereiches liegen und damit nicht erkannt werden ⁴⁶.

Ein zweites, sehr ernst zu nehmendes Problem ist die Tatsache, dass Knochenmaterial für Veränderungen während der Bodenlagerung sehr anfällig ist. Dies ist sowohl aus Strontiumisotopendaten selbst abzuleiten, als auch aus sekundären Kriterien wie dem Urangehalt, der Kristallinität oder histologischen Veränderungen erschließbar. ⁴⁷ Inwieweit aus diesen sekundären Hinweisen auf Alterationen von Strontiumisotopenverhältnissen zu schließen ist, ist bisher noch nicht ausreichend erforscht. Mit ihrer Hilfe festgestellte diagenetische Veränderungen des Probenmaterials mahnen aber auf jeden Fall zur Vorsicht bei der Interpretation von Strontiumisotopenverhältnissen.

Verschiedentlich wurde zu bedenken gegeben, dass Kontamination durch mobiles Strontium ja nur auf den Boden der direkten Grabumgebung zurückgehen kann, und die Knochenwerte daher eher an die lokale Isotopie angeglichen werden, als scheinbar fremde Daten zu erzeugen (Grupe et al. 1999, 274; Schweissing/Grupe 2003a, 1375). Ob das diagenetische Strontium dieselbe Isotopie wie das lokal biologisch verfügbare hat, bedarf jedoch noch weiterer Untersuchungen.

Sicherlich ist der Grad der Kontamination von Knochenmaterial von Ort zu Ort unterschiedlich und von vielen verschiedenen Faktoren abhängig. Dennoch sollten Knochenwerte immer mit größter Vorsicht betrachtet und nur dann zu einer Interpretation von Zahnschmelzdaten herangezogen werden, wenn sie aufgrund von Untersuchungen zu diagenetischen Veränderungen als zuverlässiges Reservoir biogenen Strontiums herausgestellt werden konnten.

Definition über Faunenreste vom Fundort: Da menschliche Knochen aufgrund der Möglichkeit des Vorhandenseins noch »fremder« Strontiumisotopenverhältnisse und bodengelagertes Knochenmaterial allgemein wegen der Kontaminationsgefahr das Risiko in sich bergen, keine verlässlichen Anhaltspunkte

⁴⁶ Für die Erkennung von Zuwanderern unter glockenbecherzeitlichen Bestattungen aus Bayern wurde ein noch konservativeres Kriterium angewandt. Das biologisch verfügbare Strontium wurde aus den Knochendaten aller untersuchten Individuen ermittelt und nicht nach Fundorten differenziert. Alle Zahnschmelzwerte, die außerhalb dieser Spanne lagen, wurden als Anzeichen für Zuwanderer interpretiert (Grupe et al. 1997; Price et al. 1998; kritisch dazu: Horn/Müller-Sohnius 1999, 265-266).

⁴⁷ Ein Hinweis auf die Kontaminationsanfälligkeit von Knochen aus den Strontiumdaten selbst ist, dass für Zahnschmelz meist ein höheres Strontiumisotopenverhältnis als für Knochen desselben Individuums festgestellt wird (Horn/Müller-Sohnius 1999, 264-265). Dieser Trend wäre nur befriedigend mit Ortswechseln der untersuchten Individuen erklärbar, wenn man annehmen würde, dass Wanderungen hauptsächlich von einer geologischen Formation mit hohem Strontiumisotopenverhältnis in eine mit niedrigerem verlaufen würden, während entgegengesetzte Richtungen sehr viel seltener vorkommen. Weitere Hin-

weise auf diagenetische Veränderungen sind eine höhere Ähnlichkeit der Isotopie von Dentin und Knochen desselben Individuums als von Dentin und direkt darüber liegendem Zahnschmelz (s. S. 608f.; Budd et al. 2000; Trickett et al. 2003), eine Veränderung des Strontiumisotopenverhältnisses durch die Behandlung mit schwacher Essig- oder Ameisensäure (Sealy et al. 1991; Horn et al. 1994; Sillen et al. 1995), ein überhöhter Urangehalt im Vergleich zum Zahnschmelz (Kohn et al. 1999; Price et al. 2002, 128-129, mit Fig. 5) und Veränderungen der Kristallinität des Hydroxylapatits oder Einlagerung von Fremdmineralien, wie sie durch Röntgendiffraktometrie (Paulus 2000, 37, 43-46) oder Infrarotspektroskopie (Weiner/Bar-Yosef 1990; Stiner et al. 1995; Wright/Schwarz 1996; Nielsen-Marsh/Hedges 1997; Stiner et al. 2001; Surovell/Stiner 2001) zu erkennen sind. Mit Hilfe der Lichtmikroskopie von Dünnschliffen sind Veränderungen der histologischen Struktur und fremdmineralische Füllungen der Gefäßkanäle erkennbar (Fabig 2002).

für die Isotopie des lokal biologisch verfügbaren Strontiums zu geben, sollte dieses anhand von Material bestimmt werden, das von diesen Unsicherheitsfaktoren unabhängig ist.

Die Untersuchung von Fauna vom jeweiligen Fundort besitzt das größte Potential für eine verlässlichere Bestimmung des lokal biologisch verfügbaren Strontiums. Dafür kommen jedoch nur Tierarten in Frage, die ihre Nahrung nicht aus einem viel größeren Einzugsbereich als der Mensch beziehen. Tiere, die sich saisonal in verschiedenen Gebieten aufhalten oder generell einen sehr großen Aktionsradius haben, sind ungeeignet.

Im Zusammenhang mit archäologischen Studien wurden bisher Mäuse (Ezzo et al. 1997; Ezzo/Price 2002), Schneckenhäuser (Price et al. 2002), Meerschweinchen (Knudson et al. 2001) und Hasen (Price et al. 2000) zur Bestimmung von biologisch verfügbarem Strontium herangezogen.

In den meisten Fällen handelt es sich dabei um rezente Individuen. Wie schon für die Pflanzen erörtert, gilt natürlich auch für tierische Reste, dass das heutige biologisch verfügbare Strontium durch Düngemiteleintrag in den Boden (Böhlke/Horan 2000) oder durch die Luft transportiertes Strontium, das z.T. aus modernen Industrieanlagen stammt, nicht mehr repräsentativ für vergangene Zeiten sein muss (Straughan et al. 1981).

Um diese Unsicherheiten zu vermeiden, sollten als Vergleichsmaterial besser Proben aus archäologischem Kontext zum Einsatz kommen. Seit dem Neolithikum sind in weiten Teilen Europas und Vorderasiens Schweine relativ häufig vertretene Haustiere. Sie scheinen zur Ermittlung der Isotopie des lokalen biologisch verfügbaren Strontiums am besten geeignet zu sein, da sie wahrscheinlich nicht auf weit entfernte Weiden getrieben wurden, sondern ihre Nahrung aus der Siedlung selbst oder aus einem relativ begrenzten Umkreis um die Siedlung herum bezogen. Da ackerbauliche Nutzflächen des Menschen sicherlich auch nicht mehrere Kilometer von den Siedlungen entfernt lagen, ist davon auszugehen, dass Schweine einen besseren Anhaltspunkt für das biologisch verfügbare Strontium des Menschen als andere Haustiere wie Rinder, Schafe oder Ziegen geben, die möglicherweise saisonal auf Weiden in Gebiete getrieben wurden, in denen der Mensch keine Anbauflächen hatte.

Schweine vermehren sich außerdem relativ schnell, so dass man bei einem Ortswechsel sicherlich keine großen Schweinepopulationen mit an den neuen Aufenthaltsort nimmt, sondern vielmehr sich dort aus recht wenigen Individuen eine neue heranzieht. Daher bieten Schweine eine hohe Wahrscheinlichkeit, für den Ort, an dem sie gefunden wurden, auch repräsentativ zu sein. Ihre Ortskonstanz ist jedoch genaugenommen, z.B. durch die Beprobung von mehreren, zu unterschiedlichen Zeiten gebildeten Zähnen oder mehrere Analysen pro Zahn (s. S. 664 ff.) zu prüfen.

Natürlich besteht für Faunenreste genauso wie für menschliche Überreste die Gefahr von Kontamination während der Bodenlagerung. Zahnschmelz bietet meist ein verlässliches Reservoir für biogenes Strontium. Deshalb ist dringend zu empfehlen, für die Definition des lokal biologisch verfügbaren Strontiums nur auf Zahnschmelz und nicht auf Knochenmaterial zurückzugreifen. Auch Zahnschmelz sollte auf etwaige diagenetische Veränderungen während der Bodenlagerung überprüft werden (s. S. 622).

Wenn möglich sollte das archäologische Alter des menschlichen Probenmaterials und das der Faunenreste, die zum Vergleich herangezogen werden, gleich sein. Zwar sind in der Strontiumisotopensignatur der Gesteine im Untergrund in archäologischen Zeiträumen keine Veränderungen zu erwarten⁴⁸, doch kann sich der Anteil bzw. das Herkunftsgebiet von aus der Luft und dem Regenwasser stammendem Strontium im Laufe der Zeit ändern (Gosz et al. 1983).

In den bisherigen Strontiumisotopenstudien fand der Anteil atmosphärischen Strontiums am biologisch verfügbaren Strontium kaum Beachtung und wurde nicht in die Studien einbezogen. Es ist jedoch denkbar, dass – unabhängig von moderner Luftverschmutzung – durch unterschiedliche Grade der Bewaldung zu verschiedenen Zeiten Staub in unterschiedlichem Maße in die Luft aufgenommen und von ihr transportiert werden konnte. Bisher gibt es zu diesem Problem keine Untersuchungen. Um es allerdings

⁴⁸ Kleinräumige Änderungen des biologisch verfügbaren Strontiums wären durchaus möglich, wenn z.B. Erdbeben geologische Schichten freilegen, die vorher nicht an der Oberfläche anstanden.

einschätzen zu können, sollte man von einem Ort Faunenmaterial derselben, ortskonstant lebenden Art verschiedenen Alters untersuchen. Ergeben sich Unterschiede im Strontiumisotopenverhältnis der analysierten Populationen, so ist mit einer Veränderung des atmosphärisch eingetragenen Strontiums zu rechnen, und Vergleichsprobenmaterial sollte aus derselben Zeitstufe wie das zu untersuchende menschliche Material stammen. Gibt es keine Unterschiede zwischen verschiedenen alten ortsfesten Populationen eines Fundortes, so spricht dies dafür, dass atmosphärisch transportiertes Strontium entweder sehr geringen Einfluss hatte oder zumindest über den untersuchten Zeitraum hinweg konstant blieb. Ist dies der Fall, so müssen Faunenreste zum Vergleich und menschliches Material nicht aus demselben Zeithorizont stammen, sondern können durchaus verschiedenen Alters sein, solange die Ortskonstanz gewahrt bleibt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Zahnschmelz von ortskonstant lebenden Tieren aus archäologischem Kontext die beste Möglichkeit zur Erfassung des biologisch verfügbaren Strontiums bietet. Der Einzugsbereich der Tiere zur Nahrungsgewinnung sollte sich so gut wie möglich mit dem menschlichen Wirtschaftsbereich decken. Hausschweine scheinen hier eine geeignete Spezies zu sein. Die Tiere sollten möglichst zur gleichen Zeit wie die interessierende menschliche Population gelebt haben. Wenn keine zeitgleichen Faunenreste vorhanden sind, können auch ältere oder jüngere herangezogen werden. Die Gefahr von Veränderungen des lokal biologisch verfügbaren Strontiums aufgrund von Alterationen des durch die Luft und das Regenwasser transportierten Strontiums im Laufe der Zeit kann bestehen, ist jedoch bisher kaum erforscht.

Vergleich verschiedener Kriterien zur Erkennung von Zuwanderern

In den bisher an archäologischem Material durchgeführten Studien kamen hauptsächlich drei Kriterien zur Bestimmung von Zuwanderern zum Einsatz:

1. Ein Unterschied von 0,001 im $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis zwischen Knochen und Zahnschmelz.
2. Das Abweichen von Zahnschmelzwerten vom Mittelwert ± 2 Standardabweichungen aller Knochen-daten.
3. Das Abweichen von Zahnschmelzwerten vom Mittelwert ± 2 Standardabweichungen für rezente Fauna vom Fundort.

Diese drei Kriterien sind in sehr unterschiedlicher Weise anwendbar und führen auch in Bezug auf die Anzahl der Zuwanderer zu unterschiedlichen Ergebnissen. Diese Tatsache soll am Beispiel einer Studie des Fundplatzes Grasshopper Pueblo in Arizona, USA erläutert werden (Price et al. 1994a; Ezzo et al. 1997; Ezzo/Price 2002)⁴⁹. Von insgesamt 70 Individuen wurden 69 Zahnschmelz- und 16 Knochenproben untersucht (Abb. 17). Außerdem wurden Knochen und Zähne von fünf rezenten Mäusen, die am Fundplatz gefangen wurden, analysiert.

Nach dem ersten Kriterium zur Erkennung von Zuwanderern, der Differenz zwischen Knochen und Zahnschmelz, können nur Individuen beurteilt werden, von denen beide Gewebe untersucht wurden. Da in der Studie nicht von allen Individuen Knochenproben vorhanden sind, ist dieses Kriterium für die meisten Individuen (75,7%) nicht anwendbar. 35,3% der beurteilbaren Individuen wären Zuwanderer (Tab. 6).

Das zweite Kriterium, das aus Knochenwerten ermittelte lokal biologisch verfügbare Strontium, ist auch dann für alle Zahnschmelzproben beurteilbar, wenn nicht für alle Individuen einer Studie Knochen untersucht wurden. Natürlich gilt: je mehr Daten, desto sicherer ist die so definierte Spanne. Aber aufgrund der sehr arbeits- und kostenintensiven Untersuchungen ist es ein großer Vorteil, dass auch Individuen beurteilbar sind, von denen keine Knochen-, sondern nur Zahnschmelzanalysen vorliegen.

In der Grasshopper-Studie wurde nur von einem Individuum keine Zahnschmelzprobe analysiert. Der Zahnschmelz aller anderen konnte mit dem aus insgesamt 16 Knochen ermittelten lokal biologisch ver-

⁴⁹ Zur archäologischen Fragestellung und Bewertung s. S. 648f.

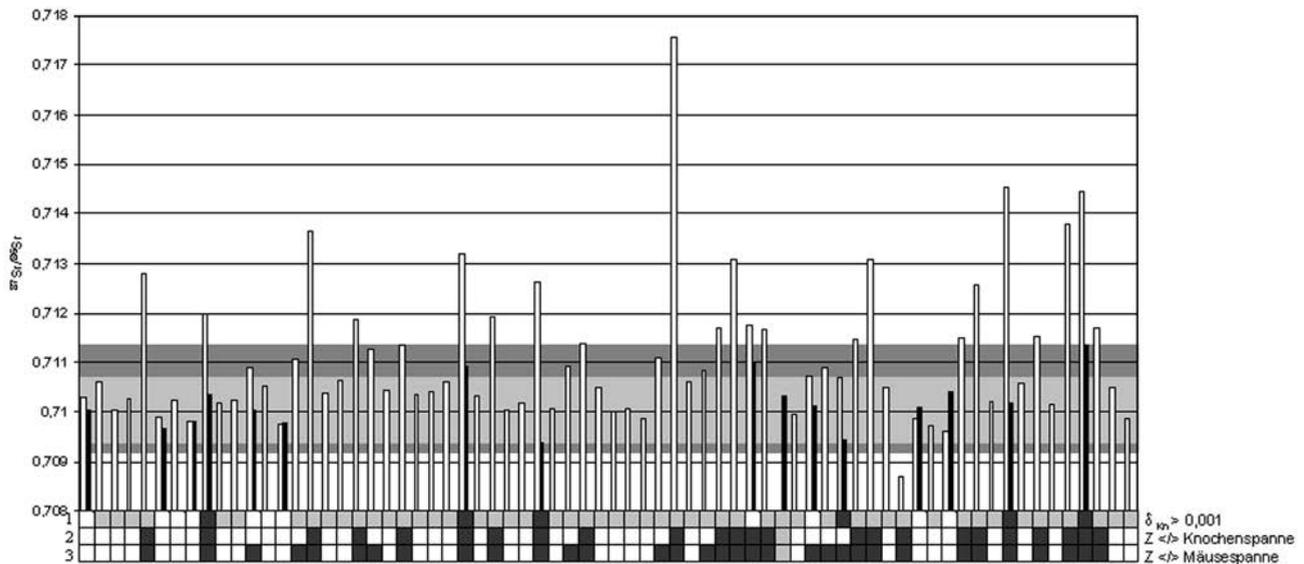


Abb. 17 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in menschlichem Zahnschmelz (Z: weiße Säulen) und Knochen (Kn: schwarze Säulen) von Grasshopper-Pueblo, Arizona, USA. Zusammengruppierte Säulen stammen vom gleichen Individuum. Die hellgraue Spanne ergibt sich aus dem Mittelwert aller Knochen Daten ± 2 Standardabweichungen (»Knochen spanne«), die dunkelgraue aus dem Mittelwert von Zahnschmelz- und Knochen Daten vom am Fundort gefangenen, rezenten Mäusen ± 2 Standardabweichungen (»Mäusespanne«). Die drei Reihen aus kleinen Kästchen zeigen die Einstufung der Individuen als Zuwanderer (dunkelgrau), Einheimische (weiß) oder nicht beurteilbar (hellgrau). Das Entscheidungskriterium der ersten Zeile ist ein Unterschied von 0,001 des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisses von Zähnen und Knochen des gleichen Individuums, das der zweiten Zeile Zahnschmelzwerte über- oder unterhalb der »Knochen spanne«, das der dritten Zeile Zahnschmelzwerte über- oder unterhalb der »Mäusespanne« (Daten nach: Ezzo et al. 1997).

	Differenz Zahnschmelz/Knochen		Mittelwert Knochen ± 2 SD		Mittelwert Mäuse ± 2 SD	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
beurteilbar*	17	24,3	69	98,6	60	98,6
nicht beurteilbar*	53	75,7	1	1,4	1	1,4
Zuwanderer**	6	35,3	24	34,8	33	47,8
Einheimische**	11	64,7	45	65,2	36	52,3

Tab. 6 Grasshopper-Pueblo, Arizona, USA. Beurteilbarkeit und Anteil der Zuwanderer nach verschiedenen Kriterien. Für Erläuterung der Kriterien s. Text. * von allen Individuen, ** von beurteilbaren Individuen (nach Daten aus Ezzo et al. 1997). (Eine ähnliche Auswertung der Daten findet sich bei Price et al. 2002, 131. Aufgrund leichter Differenzen in der Angabe der Standardabweichungen findet man dort geringe Unterschiede zu den hier aufgeführten Daten.)

für den Vergleich mit dem lokal biologisch verfügbaren Strontium verglichen werden. 24 Individuen (34,8%) wurden so als Zuwanderer klassifiziert. Die Zahnschmelzwerte von 45 (65,2%) Individuen liegen im Bereich der Knochen. Sie werden nach diesem Kriterium als Einheimische angesprochen.

Dies sind deutlich mehr als die 36 (52,3%) Individuen, die aufgrund des Vergleiches mit dem aus den Mäuseknochen und -zähnen ermittelten lokal biologisch verfügbaren Strontium im Grasshopper Pueblo aufgewachsen zu sein scheinen. Auf diese Weise erscheinen 33 (47,8%) der Individuen als Fremde am Fundort (Tab. 6).

Diese Unterschiede zwischen den einzelnen Kriterien entsprechen den Erwartungen. In das aus den menschlichen Knochenwerten ermittelte, biologisch verfügbare Strontium fließen auch Daten von Zuwanderern mit ein, denen nicht genügend Zeit vor dem Tod blieb, um sich vollständig an das lokal biologisch verfügbare Strontium anzupassen. Die Spanne erscheint damit breiter als die der lokalen Fauna, die mit höherer Wahrscheinlichkeit ihr gesamtes Leben in oder in der unmittelbaren Nähe vom Grasshopper Pueblo verbracht hat. Aus diesem Grunde scheinen Werte lokaler Fauna das zuverlässigere Kriterium zu sein.

Werden Faunenproben für die Definition des lokal biologisch verfügbaren Strontiums herangezogen, so kann auch ohne die Untersuchung von menschlichen Knochen festgestellt werden, welche Individuen ihre Kindheit wahrscheinlich am Fundort verbracht haben und welche nicht. Zahnschmelz archäologisch überlieferter Faunenreste und – wenn dieser nicht verfügbar ist – Knochen und Zähne von rezenten Fauna bieten daher auch bei schlechter Knochenerhaltung eine sehr gute Möglichkeit zur Definition des lokal biologisch verfügbaren Strontiums.

Regionale Einordnung von Zuwanderern

Sind in einer untersuchten Population verschiedene Individuen als Zuwanderer identifiziert worden, so stellt sich als nächstes die Frage nach deren potentiellen Herkunftsgebieten. Für die historische Interpretation einer Fundstelle ist es wichtig zu wissen, ob alle Zuwanderer aus derselben Region kommen, oder ob sie ihre Kindheit an unterschiedlichen Orten verbracht haben. Von Interesse ist natürlich außerdem die Entfernung der potentiellen Herkunftsorte von dem Ort, an dem die Zuwanderer letztendlich bestattet wurden. Handelt es sich um kleinräumige Mobilität, bei der z.B. nur wenige zehn km zurückgelegt wurden, oder wurden Entfernungen von mehreren hundert Kilometern überwunden? Ähnlich wie für das Erkennen von Zuwanderern gibt es auch hier mehrere Ansätze.

Gesteins-, Boden- und Wasserproben

Da das in die Zähne und Knochen eingelagerte Strontium letztendlich auf die Gesteine im Untergrund zurückgeht, und aus geochemischen Untersuchungen die Strontiumisotopenverhältnisse vieler geologischer Einheiten gut bekannt sind, lag es zunächst nahe, Aussagen zur Herkunft von Zuwanderern direkt aus Strontiumisotopenverhältnissen von Gesteinen abzuleiten. So wurde z.B. für zwei Individuen aus dem Glockenbechergräberfeld von Augsburg (Bayern), deren Zahnschmelzwerte im Bereich von Gneisen oder Graniten, wie sie im Oberpfälzer Wald oder Bayerischen Wald sowie im Schwarzwald oder Odenwald zu finden sind, auf eine Herkunft aus der Oberpfalz geschlossen. Damit wurde postuliert, dass sie, wenn sie sich entlang der Flussläufe bewegten, mindestens 200km zurückgelegt hätten (Grupe et al. 1997, 524; Price et al. 1998, 410; Grupe et al. 2001, 211).

Grundlage für solche Schlüsse ist eine Zusammenstellung von $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen in Gesteinen der verschiedenen geologischen Einheiten in der näheren und weiteren Umgebung der Fundstelle. Ähnliche Schlüsse könnten aus Daten für Boden- oder Wasserproben gezogen werden.

Aus den oben bereits für die Feststellung von Zuwanderern diskutierten Sachverhalten (s. S. 617ff.) können geochemische Daten aber allenfalls grobe Anhaltspunkte für die regionale Einordnung von Zuwanderern geben. Der Grund dafür ist, dass das biologisch verfügbare Strontium nicht mit den Daten für Gesamtgesteinsanalysen übereinstimmen muss. Differenzen können durch Diagenese des Gesteins selbst, differenziertes Lösungsverhalten einzelner Minerale (Hoogewerff et al. 2001, 987) und kleinräumige Unterschiede, die bereits innerhalb einer aus verschiedenen Mineralen zusammengesetzten geologischen Formation auftreten können, hervorgerufen werden. Aus diesem Grunde hält man sich in neueren Studien in Bezug auf die regionale Zuordnung von Zuwanderern stärker zurück, wenn keine Anhaltspunkte für die Isotopie des biologisch verfügbaren Strontiums vorliegen (Price et al. 2004).

Biologisch verfügbares Strontium

Für eine verlässlichere regionale Einordnung von Zuwanderern ist die Kenntnis des mit verschiedenen geologischen Einheiten verbundenen, biologisch verfügbaren Strontiums unumgänglich. Da dieses sich durchaus deutlich von den Werten bereits vorhandener Gesamtgesteinsanalysen unterscheiden kann, sind hierzu eigens im Rahmen archäologischer Forschungsprojekte durchzuführende Untersuchungen nötig.

Kann man bereits aufgrund des archäologischen Kontextes eine Hypothese zu einem potentiellen Herkunftsgebiet äußern, so liegt es nahe, gezielt aus dieser Region Faunenreste zu beproben, wie dies im Rahmen einer Untersuchung der Bestattungen der Nekropole von Chen Chen bei der heutigen Stadt Moquegua in Peru von K. Knudson durchgeführt wurde (Knudson et al. 2001). Die Strontiumisotopenverhältnisse des Zahnschmelzes von zwei als Zuwanderer identifizierten Individuen der Nekropole liegen im Bereich des über rezente Meerschweinchenknochen erarbeiteten biologisch verfügbaren Strontiums von Tiwanaku (Bolivien), einem Fundplatz, auf den man die Zuwanderer aufgrund archäologischer Kriterien zurückführen möchte. Mit diesen Daten liegt eine Herkunft der Zuwanderer aus Tiwanaku im Rahmen des Möglichen. Sie kann allerdings erst dann als gesichert gelten, wenn über umfangreichere Untersuchungen ausgeschlossen werden kann, dass es in der Gegend weitere Orte mit einer ähnlichen Isotopie des biologisch verfügbaren Strontiums gibt.

Die differenziertesten Möglichkeiten zur regionalen Einordnung von Zuwanderern liegen bislang für den Fundplatz Grasshopper Pueblo in Arizona (USA) vor (Ezzo/Price 2002; vgl. S. 648). Hier wurden zum einen vom Fundplatz selbst und in einem Umkreis von ca. 15km rezente Mäuse von mehreren Stellen untersucht. Zum anderen analysierte man Nagerreste aus Museumssammlungen von archäologischen Fundstellen in bis zu 100km Entfernung. Diese Daten führten zu einer detaillierten Kenntnis des biologisch verfügbaren Strontiums in der Gegend und ermöglichten eine Herausarbeitung der Herkunftsgebiete der als Fremde identifizierten Individuen.

Wie in dieser Studie bedarf es auch anderswo einer detaillierten Untersuchung des biologisch verfügbaren Strontiums im Umkreis der Fundstelle(n), um zuverlässige Aussagen über Herkunftsgebiete fremder Individuen treffen zu können. Grundlage dazu ist eine systematische Beprobung von Faunenresten aus auf verschiedenen geologischen Einheiten liegenden archäologischen Fundstellen. Daraus wäre zunächst abzuleiten, ob sich die in den Gesamtgesteinsanalysen festzustellenden Differenzen auch in das biologisch verfügbare Strontium fortsetzen. Außerdem wäre aus der Beprobung von mehreren Fundstellen pro geologischer Einheit auf die Variabilität innerhalb einer solchen zu schließen. Langfristig wird man durch eine systematische Zusammenstellung der im Rahmen verschiedener Studien publizierten Werte zu einem immer dichteren Datennetz kommen, das es ermöglichen wird, Gebiete mit ähnlicher Isotopie herauszuarbeiten und gegen andere mit deutlich verschiedenem biologisch verfügbarem Strontium abzugrenzen. Eine Kenntnis dieser »Strontiumisotopenprovinzen« ist letztendlich Voraussetzung für eine regionale Einordnung von Zuwanderern.

Kombination mit anderen naturwissenschaftlichen Daten

In Abhängigkeit vom geologischen Untergrund kann es sehr große Gebiete geben, in denen sich die Isotopie des biologisch verfügbaren Strontiums kaum unterscheidet. So wurden z.B. bei Individuen aus Gräbern der Glockenbecherkultur im Donautal in Bayern und in der fast 500km entfernten Umgebung von Budapest ähnliche Strontiumisotopenverhältnisse in den Knochen festgestellt (Price et al. 2004). Dies weist darauf hin, dass trotz der großen Entfernung ein Ortswechsel zwischen den beiden Gebieten anhand von Strontiumisotopendaten nicht erkennbar wäre.

Deshalb scheint es sehr vielversprechend, Strontiumisotopenanalysen mit anderen naturwissenschaftlichen Untersuchungen zur Feststellung von Mobilität zu kombinieren. So konnte z.B. aufgrund von Sauerstoffisotopenuntersuchungen, die in Abhängigkeit vom Klima und der Höhenlage schwanken, das Herkunftsgebiet der Eismumie vom Hauslabjoch besser eingegrenzt werden, als dies allein mit Stron-

tiumisotopendaten möglich wesen wäre (Müller et al. 2002; Müller et al. 2003)⁵⁰. Ähnliche zusätzliche Kriterien zur Herkunftsbestimmung könnten Bleiisotopen- oder Sr/Ca und Ba/Ca-Verhältnisse in Zähnen und Knochen bilden.

Ermittlung des Migrationszeitpunktes

Neben Aussagen zum potentiellen Herkunftsgebiet von Zuwanderern ist der Zeitpunkt, zu dem der Ortswechsel innerhalb des Individuallebens erfolgte, von Interesse. Dabei können aus der Untersuchung von Zahnschmelz Anhaltspunkte zum Zeitpunkt von Ortswechseln innerhalb der Kindheit abgeleitet werden, während Knochen – zumindest theoretisch – Ortswechsel im Erwachsenenalter dokumentieren.

Zähne: Spiegel von Wanderungen im Kindesalter

Schlüssel zur Feststellung des Zeitpunktes eines Ortswechsels innerhalb der Kindheit ist die Tatsache, dass die Bildung von Zahnschmelz bereits vor der Geburt einsetzt und kontinuierlich bis zum zwölften bzw. 14. Lebensjahr fortschreitet (s. S. 602 mit Abb. 6). Eine serielle Analyse der Zahnkronen kann Auskunft darüber geben, ob und wann innerhalb dieses Zeitraumes ein Ortswechsel stattgefunden hat (Bürgers et al. 2000; Schweissing/Grupe 2003a). Unter serieller Analyse von Zahnkronen oder »sequenzieller Beprobung« – wie sie im Zusammenhang mit Sauerstoffisotopenanalysen an Tierzähnen genannt wird (Balasse et al. 2002; Wiedemann et al. 1999; Paulus 2000, 36) – versteht man die Untersuchung mehrerer Proben aus einem Gebiss. Diese Proben können entweder an einem Zahn entnommen werden oder sich auf verschiedene Zähne, deren Schmelz in unterschiedlichen Zeitspannen mineralisiert wird, verteilen. Weisen alle untersuchten Proben gleiche Werte auf, so ist davon auszugehen, dass innerhalb des durch sie repräsentierten Zeitraums kein Ortswechsel stattgefunden hat. Gibt es allerdings Unterschiede zwischen verschiedenen Proben, und kann über ihre Position im Gebiss eingeschätzt werden, wann dieser Zahnschmelz ungefähr innerhalb des Individuallebens gebildet wurde, so ist daraus der Zeitpunkt des Ortswechsels abzuleiten. Liegt ein einmaliger Ortswechsel vor, so sollte die Strontiumisotopie des vor dem Ortswechsel gebildeten Schmelzes konstant sein, sich im Zeitraum des Ortswechsels ändern und dann das biologisch verfügbare Strontium am neuen Aufenthaltsort widerspiegeln⁵¹.

Knochen: Spiegel von Wanderungen im Erwachsenenalter

Wie oben bereits ausführlich dargestellt, unterliegen Knochen während des gesamten Lebens Umbauprozessen, die einen ständigen Austausch von Haupt- und Spurenelementen ermöglichen (s. S. 609ff.). Kenntnis der Umbaugeschwindigkeit des auf Strontiumisotopie untersuchten Skelettelements sowie des lokal biologisch verfügbaren Strontiums am Herkunfts- sowie am letztendlichen Aufenthaltsort kann eine Einschätzung des Zeitpunktes, zu dem die Wanderung stattgefunden hat, erlauben. Sind diese Informationen hinreichend vorhanden, könnte dazu die folgende Formel eingesetzt werden:

$$Sr_{K(n)} = \left(\frac{Sr_{K(n+1)} - (Sr_2 * Kn_2)}{Kn_1} \right)$$

dabei sind:

$Sr_{K(n)}$ = $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ im Knochen im vorherigen Lebensjahr

$Sr_{K(n+1)}$ = $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ im Knochen im aktuellen Lebensjahr

⁵⁰ Vgl. S. 649f.

⁵¹ Vgl. auch die Beprobungsstrategien zur Feststellung von

sesshafter Lebensweise (s. S. 639ff.), regelhafter Mobilität (s. S. 660f.) und Mobilität von Tieren (s. S. 664ff.).

- Sr_1 = $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ im Herkunftsgebiet, also Strontiumisotopie des Zahnschmelzes
 Sr_2 = $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ im Zielgebiet
 Kn_1 = $(100 - Kn_2) : 100$ = prozentualer Anteil des innerhalb eines Jahres *nicht* ersetzten Knochens
 Kn_2 = (prozentualer Anteil des innerhalb eines Jahres ersetzten Knochens): 100

Unter Anwendung der Formel kann auf das Strontiumisotopenverhältnis des Knochens im jeweils vorherigen Lebensjahr rückgerechnet werden. Der Migrationszeitpunkt ist über mehrere Rechenschritte erschließbar – nämlich wenn $Sr_{K(n)} \approx Sr_1$.

Diese Möglichkeit der Berechnung des Wanderungsalters ist zugegebenermaßen sehr idealistisch und kann in der Realität durch Probleme auf verschiedenen Ebenen eingeschränkt werden. Schwierigkeiten liegen zum einen in der Variabilität von Knochenumbauzeiten, zu denen es noch weiterer Grundlagenforschung oder zumindest einer umfangreicheren Zusammenstellung der diesbezüglich bisher publizierten Studien bedarf, als dies in dieser Arbeit erfolgen konnte (vgl. S. 611 ff.). Außerdem muss auch bei der Interpretation von Knochendaten in Bezug auf das Wanderungsalter sichergestellt werden, dass biogene Werte gemessen wurden, und keine Kontamination während der Bodenlagerung erfolgte.

Die aufgezeigte Berechnungsmöglichkeit setzt voraus, dass sich das Individuum nach dem Verlassen des Wohnorts seiner Kindheit direkt und ohne längere Zwischenstationen in anderen Regionen an seinen späteren Aufenthaltsort begeben hat, wo es bis zu seinem Tode blieb. In der Realität kann dies zwar als Hypothese formuliert, darf letztendlich aber nicht vorausgesetzt, sondern muss durch Messdaten und deren Interpretation überprüft werden. Eine solche Überprüfung könnte durch die Bestimmung der Strontiumisotopie verschiedener Skelettelemente mit unterschiedlichen Umbauraten erfolgen. Bei einem einmaligen Ortswechsel müssten die Berechnungen des Wanderungszeitpunktes unter Verwendung der spezifischen Knochenumbauraten jeweils auf den gleichen Wanderungszeitpunkt innerhalb des Individualalters hinweisen. Ist das nicht der Fall – d.h. die verschiedenen Skelettelemente erreichen den Strontiumisotopenwert der Zähne zu unterschiedlichen Zeitpunkten –, ist mit einem Aufenthalt an mehreren Orten zu rechnen. Derartige Schlüsse sind allerdings nur möglich, wenn die Knochenumbauraten mit zufriedenstellender Genauigkeit bekannt sind.

Grundlagen der Strontiumisotopenanalyse: eine Zusammenfassung

Strontium kommt in Gesteinen als Spurenelement meist in gut messbaren Konzentrationen vor. Es hat vier stabile Isotope, von denen ^{87}Sr radiogen ist, d.h. durch radioaktiven Zerfall von ^{87}Rb (Rubidium) entsteht. Deshalb variiert der relative Gehalt an ^{87}Sr mit der ursprünglichen Rubidiummenge und dem Alter des Gesteins. Den relativen Gehalt an ^{87}Sr drückt man als Verhältnis zu ^{86}Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) aus, das nicht radiogenen Ursprungs ist. Da die Halbwertszeit von ^{87}Rb sehr lang ist, kann man heute gemessene $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in archäologisch relevante Zeiträume zurückprojizieren. Strontiumisotopenverhältnisse variieren in Gesteinen im allgemeinen zwischen 0,703 und 0,75. Für einige Gesteine und Minerale kommen auch Werte über 1 vor. Diese Spanne scheint sehr klein, ist allerdings signifikant, wenn man bedenkt, dass moderne Massenspektrometer Strontiumisotopenverhältnisse bis zur 5., teilweise bis zur 6. Stelle nach dem Komma ermitteln können. Gesteine mit niedrigem Strontiumisotopenverhältnis sind junge vulkanische Gesteine, die von marinen Sedimenten gefolgt werden. Alte magmatische und metamorphe Gesteine wie Granite, Gneise oder Schiefer haben meist sehr hohe Strontiumisotopenverhältnisse. Klastische Sedimente weisen je nach ihrer Zusammensetzung sehr variable Werte auf.

Das Strontium aus den Gesteinen im Untergrund gelangt durch Verwitterung in die oberen Bodenschichten und ins Grundwasser, wo es für Pflanzen zur Aufnahme zur Verfügung steht. Dieses Strontium nennt man biologisch verfügbares Strontium. Über die Nahrungskette wird es an Tiere und Menschen weitergetragen, wo es zu 99% in den Hartgeweben Zahnschmelz, Dentin und Knochen an

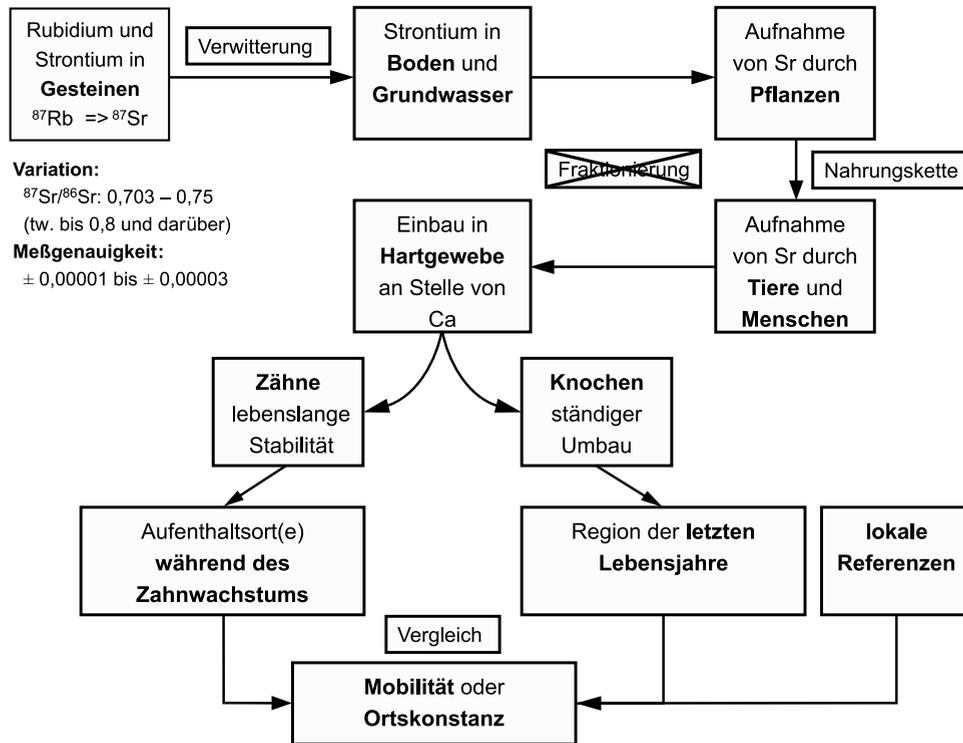


Abb. 18 Grundlagen der Strontiumisotopenanalyse zum Nachweis von Mobilität.

Stelle von Calcium eingebaut wird. Während Strontium die Nahrungskette passiert, erfahren die Isotopen keine Fraktionierung, d.h. die isotopische Zusammensetzung ändert sich von einer in die nächste Trophiestufe nicht.

Zahnschmelz wird in der Kindheit, beim Menschen bis zum 14. Lebensjahr gebildet und erfährt dann keine Veränderungen mehr; d.h. Zahnschmelz speichert über das gesamte Leben die Strontiumisotopensignatur des Ortes, an dem er gebildet wurde. Knochen unterliegt dagegen ständigen Umbauprozessen, bei denen ständig neues Strontium eingelagert wird. Erfolgt ein Ortswechsel, so wird sich das Strontiumisotopenverhältnis von Knochenmaterial im Laufe der Zeit an den neuen Aufenthaltsort anpassen. Ein Vergleich der Strontiumisotopie von Knochen und Zahnschmelz lässt daher einen Schluss auf einen lebenslangen Aufenthalt an einem Ort oder langfristigen Ortswechsel zu (Abb. 18).

Zur Unterscheidung zwischen Zuwanderern und Einheimischen kamen in der bisherigen Forschung drei verschiedene Kriterien zur Anwendung:

1. Eine Differenz zwischen Zahnschmelz und Knochen desselben Individuums von mehr als 0,001.
2. Ein Zahnschmelzwert oberhalb oder unterhalb einer sich aus dem Mittelwert aller Knochendaten der Fundstelle ± 2 Standardabweichungen ergebenden Spanne. Problematisch ist hierbei, dass späte Zuwanderer, deren Strontiumisotopenverhältnis der Knochen noch nicht vollständig an den neuen Aufenthaltsort angepasst ist, auch in diese Spanne eingehen und sie zu groß erscheinen lassen können. Einige Zuwanderer werden damit möglicherweise nicht erkannt. Außerdem stellt sich zunehmend heraus, dass Knochenmaterial für diagenetische Veränderungen während der Bodenlagerung mitunter sehr anfällig ist und daher oft keine biogenen Werte mehr widerspiegelt. Dies hat auch Einfluss auf Kriterium 1.
3. Ein Zahnschmelzwert oberhalb oder unterhalb einer sich aus dem Mittelwert von Strontiumisotopenverhältnissen von Fauna der Fundstelle ± 2 Standardabweichungen ergebenden Spanne. Für die Erstel-

		KNOCHEN		
Sr-Isotopen-signal		lokal	fremd	
ZÄHNE	lokal	1. lebenslanger Einheimischer (A) 2. Zuwanderer aus geologisch gleicher Region (B)	1. Geburt am Bestattungsort, Ortswechsel in geologisch verschiedene Region, Rückkehr kurz vor dem Tod (D) 2. Geburt in geologisch dem Bestattungsort ähnlicher Region, Wanderung in geologisch unterschiedliche Region, Ankunft am Bestattungsort kurz vor dem Tod (E)	
	fremd	Einwanderung aus geologisch verschiedener Region nach Abschluss der Zahnbildung, langer Aufenthalt am Sterbeort (C)	<i>gleich</i>	<i>unterschiedlich</i>
			Lebenslange Ortskonstanz, Wanderung zum Sterbeort kurz vor dem Tod (F)	Mehrmalige Wanderungen, Ankunft am Sterbeort kurz vor dem Tod (G)
		importierte Nahrung		

Abb. 19 Interpretationsmöglichkeiten für Zahnschmelz- und Knochenisotopendaten eines Individuums. Die in der Tabelle aufgeführten Punkte werden im unteren Teil der Abbildung grafisch verdeutlicht. Die drei grauen Felder stehen für drei unterschiedliche Strontiumisotopenprovinzen. Die Buchstaben in den schwarzen Feldern sind mit den in der Tabelle aufgeführten, eingeklammerten Großbuchstaben zu korrelieren (modifiziert und erweitert nach: Price et al. 2001, Tab. 1).

lung dieser Spanne scheint Zahnschmelz von archäologisch überlieferter, ortskonstanter Fauna (z.B. Hausschweine) am besten geeignet.

Vergleiche mit Gesamtgesteinsanalysen der am Ort vorliegenden geologischen Einheiten oder Grund- und Oberflächenwasser ergeben eher unzuverlässige Kriterien zur Differenzierung zwischen Einheimischen und Zuwanderern.

Kann für Knochen und Zahnschmelz eine Kontamination während der Bodenlagerung weitgehend ausgeschlossen werden, so ergeben sich aus der Kombination der beiden Daten für ein Individuum die in (Abb. 19) dargestellten Interpretationsmöglichkeiten.

Für eine regionale Einordnung von Zuwanderern sollte auf Daten für biologisch verfügbares Strontium der potentiellen Herkunftsorte oder, noch besser, auf eine systematische Herausarbeitung von »Strontiumisotopenprovinzen« zurückgegriffen werden. Gesamtgesteinsanalysen, Boden- oder Wasserdaten spiegeln das biologisch verfügbare Strontium meist nicht zuverlässig wider.

Grundlage für eine zeitliche Einordnung des Ortswechsels innerhalb des Individuallebens sind während der Kindheit die unterschiedlichen Bildungszeiträume der Zähne und später unterschiedliche Umbauraten von Knochen unterschiedlicher Art bzw. Skelettelemente. Letzteres ist mit größter Vorsicht zu betrachten, da Knochenumbauraten sehr variabel zu sein scheinen.

ARCHÄOLOGISCHE ANWENDUNGEN DER STRONTIUMISOTOPENANALYSE

Der folgende Teil meiner Ausführungen ist den Anwendungsmöglichkeiten von Strontiumisotopenanalysen im Rahmen der archäologischen Forschung gewidmet. Den größten Raum nimmt dabei die Erforschung menschlicher Mobilität als ein sehr vielschichtiges Phänomen ein.

Es sollen sowohl auf der materiellen Kultur als auch auf Strontiumisotopenanalysen von menschlichen Überresten basierende Anhaltspunkte für verschiedene Arten von Mobilität vorgestellt werden. Da es – wie zu zeigen sein wird – insbesondere seitens der materiellen Kultur kaum Phänomene gibt, die zwingend mit dauerhaften Ortswechseln zu interpretieren sind, verspricht eine Integration von natur- und kulturwissenschaftlichen Analysen erheblichen Erkenntnisgewinn. Deshalb ist es nötig, systematisch zu erörtern, welchen Beitrag Strontiumisotopenanalysen zur Erforschung verschiedener Mobilitätsformen leisten können, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um diese zu erkennen, welche Beprobungsstrategien eingesetzt werden sollten, und welche Ergebnisse man erwarten würde – sofern bisher noch keine konkreten Fallbeispiele vorliegen.

Neben der menschlichen Mobilität sollen im folgenden Kapitel auch andere Anwendungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit tierischer Mobilität oder der Analyse von Rohmaterialien und Artefakten angesprochen werden.

Das Erkennen von menschlicher Mobilität

Mobilität ist ein sehr weit gefasster Begriff, der zwischen einer räumlichen und einer sozialen Form unterscheidet. Heiko Steuer formuliert in seinem Stichwort »Mobilität« im Reallexikon für Germanische Altertumskunde folgende Definition: »Räumliche oder soziale Mobilität meint die freiwillige oder unfreiwillige Bewegung von Individuen oder Gruppen aus einer Position in eine andere, im geogr. Raum oder im soz. Gefüge« (Steuer 2001, 118; vgl. Brockhaus 1998). Die Strontiumisotopenanalyse ermöglicht die Erfassung von räumlicher Mobilität, und diese meint »die räumliche Bewegung von Sachen, Ideen und Menschen in Landschaften [...]« (Steuer 2001, 119).

In Anlehnung an Th. Champion, sollen im folgenden zwei Formen von Mobilität unterschieden werden (Champion 1990, 214):

1. Nicht regelhafte Mobilität (Mobilität in sesshaften Gemeinschaften)
2. Regelhafte Mobilität (Mobilität in nicht oder teilweise nicht sesshaften Gemeinschaften)

Nicht regelhafte Mobilität: Mobilität in sesshaften Gemeinschaften

»*Sedentism is the lack of movement.*« So definierte S. Kent den Begriff der Sesshaftigkeit in knappster Form und meint damit den mehr oder weniger ganzjährigen Aufenthalt an einem Ort (Kent 1989, 2).

Abgesehen von regelhaften, saisonalen Bewegungen z.B. von Hirten, die Gegenstand eines eigenen Kapitels sein werden (s. S. 657ff.), ist ein Wechsel des Aufenthaltsortes ein besonderes Ereignis, und die Zeiten der Mobilität, d.h. die Zeiten ohne festen Wohnsitz, sind relativ kurz. Man begibt sich an einen anderen Ort mit dem Ziel, sich dort dauerhaft niederzulassen. Wohnortwechsel sind selten oder gar einmalig und finden unregelmäßig statt. Wenn man sich an einem neuen Ort niederlässt, weiß man in der Regel noch nicht, ob und wann man auch von diesem wieder aufbrechen wird.

Die Bereitschaft zur Umsiedlung hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie dem Alter, dem Geschlecht und der sozialen Stellung der betroffenen Individuen, davon, ob es in einer Familie bereits Ortswechsel gegeben hat oder nicht, von wirtschaftlichen Bedingungen, vom Informationsfluss zwischen Ausgangs- und Zielgebiet eines Ortswechsels, den Transportmöglichkeiten und vielem mehr.

Gründe für einen Wohnortwechsel in sesshaften Gemeinschaften kann man im allgemeinen in Abstoßungsfaktoren (*push factors*) im Herkunftsgebiet und Anziehungsfaktoren (*pull factors*) im Zielgebiet unterteilen. Erstere sind nachteilige Verhältnisse im Herkunftsgebiet, während unter letzteren (erhoffte) bessere Bedingungen im Zielgebiet verstanden werden. In der archäologischen Auseinandersetzung mit Wanderungsphänomenen wurden als Abstoßungsfaktoren hauptsächlich Überbevölkerung und Populationsdruck, Veränderungen in den Umweltbedingungen bzw. Naturkatastrophen aber auch Zwangsausweisungen oder kriegerische Einflüsse diskutiert. Ökonomische Verhältnisse können sowohl als Abstoßungs- als auch als Anziehungsfaktor fungieren. Abstoßungsfaktoren sind sie dann, wenn die eigene ökonomische Lage als unhaltbar eingeschätzt und das Gebiet deshalb verlassen wird. Bessere ökonomische Bedingungen in einem auserkorenen Zielgebiet können ebenso zur Umsiedlung motivieren. Als anziehende Faktoren sind außerdem eine verbesserte rechtliche oder soziale Stellung sowie erhoffter Prestigegewinn denkbar⁵².

Terminologie

Sporadische Mobilität in sesshaften Gemeinschaften wird in der Literatur mit einem breiten Spektrum an Begriffen belegt, die leider oft je nach Autor und Bearbeitungsgegenstand unterschiedlich verwendet werden. Zentral sind hier Begriffe wie »Wanderung«, »Migration«, »Bevölkerungverschiebung«, »Invasion« etc.

Die Heterogenität der Verwendung dieser Begriffe soll am Beispiel von »Migration« verdeutlicht werden. Im Zusammenhang mit Mobilität in sesshaften Gemeinschaften können diesbezügliche Definitionsversuche zu zwei Gruppen zusammengefasst werden, deren Hauptunterschied in der Größe der Gruppen von Menschen liegt, die gemeinsam unterwegs sind.

In ersterer wird Migration als eine Bewegung von menschlichen Gruppen verstanden, die aus mindestens zwei Personen bestehen, aber auch größer sein können⁵³. Einige Fachvertreter sehen Migration nur als eine Bewegung von großen Bevölkerungseinheiten bzw. Massenwanderungen, die implizit das rasche Ersetzen der Population eines Raumes durch eine andere anspricht⁵⁴.

Eine zweite Möglichkeit der Definition von Migration ist unabhängig von der Gruppengröße, d.h. sie kann sowohl die Bewegung von Einzelindividuen als auch die von Gruppen umfassen. Migration bezeichnet dann allgemein eine Bewegung von Menschen im geografischen Raum mit Veränderungen im physischen und sozialen Umfeld (Andresen 2000, 554). Nach dieser Definition wird »Migration« gleichbedeutend mit »Mobilität« verwendet (vgl. S. 632). Kriterien für eine Migration können aber auch weniger die räumliche Bewegung an sich, als vielmehr das Verlassen einer sozialen Gruppe und der Anschluss an eine andere sein (Lasker/Mascie-Taylor 1988, 1).

Die Verwendung und Diskussion des Begriffs »Migration« beschränken sich nicht auf eine Auseinandersetzung mit Mobilität in sesshaften Gemeinschaften, sondern finden sich auch im Zusammenhang mit regelhafter Mobilität von Jägern und Sammlern; und auch dort stößt man auf verschiedene Begrifflichkeiten. Während G. A. Clark in Anlehnung an die oben für sesshafte Populationen aufgeführten Definitionen unter Migrationen das Vordringen in neue Gebiete, die zunächst nicht zum »Schweif-

⁵² Mit Motivationen für dauerhafte Ortswechsel in sesshaften Gemeinschaften setzen sich u.a. folgende Arbeiten auseinander: Neustupný 1981; Neustupný 1983; Anthony 1990; Chapman/Dolukhanov 1992; Anthony 1992; Hoika 1996; Chapman/Hamerow 1997a; Anthony 1997; Burmeister 1998; Burmeister 2000a.

⁵³ So z.B. bei Kristiansen 1989, 220. Anm. 1: »Migration is likewise a covering concept of the movement of people, from whole populations to smaller groups.«, Anthony 1990, 895-896: »Migration can be understood as a behavior that is typically performed by defined subgroups (often

kin-recruited) with specific goals, targeted on known destinations and likely to use familiar routes.« und Myhre/Myhre 1972, 45: »[...] at least two people who leave the geographical area they have lived in and migrate to and settle in a new geographical area. Time and space factors may vary from long to short from little to big, and the quantity factor from 2 to n.«.

⁵⁴ So z.B.: Clark 1994, 306: »[Migration is] a relatively short-term, long-range process or event involving mass population movement.«

gebiet« gehörten, versteht (Clark 1994, 312-313; vgl. Jochim et al. 1999), benutzt J. Weinstock diesen Begriff für saisonale Mobilität sowohl von Tieren als auch von Menschen (Weinstock 2000, 110, 111). In der Strontiumisotopenforschung, die bislang hauptsächlich Mobilität in sesshaften Gemeinschaften behandelt und von anglophonen Publikationen dominiert wird, wird ebenfalls von »Migration« oder alternativ auch »Movement« sowie allgemein »Mobility« gesprochen. In den deutschsprachigen Beiträgen findet man »Migration«, »Wanderung« und teilweise auch »Mobilität« ebenso synonym verwendet (vgl. Grupe et al. 2001). Gemeint ist damit jeweils, dass aufgrund der oben erörterten Kriterien zwischen der Kindheit und dem Tod ein Wechsel des Aufenthaltsortes wahrscheinlich ist.

Im folgenden werden die Begriffe Wanderung und Migration synonym verwendet und bezeichnen räumliche Mobilität, unabhängig von der Gruppengröße oder der Regelmäßigkeit. Aus dem jeweiligen Kontext sollte hervorgehen, ob z. B. die »Auswanderung« einer Dorfgemeinschaft oder »saisonale Wanderungen« von Jägern und Sammlern gemeint ist.

Bei nicht regelhafter Mobilität in sesshaften Gemeinschaften – insbesondere im Zusammenhang mit Strontiumisotopenanalysen – werden jedoch die Begriffe »Ortswechsel« oder »Umsiedlung« bevorzugt. Sie sind im Sinne eines längerfristigen Wechsels des Wohnortes zu verstehen, während man sich sowohl davor als auch danach ganzjährig an einem Ort aufhält. Die jeweils betroffenen Personen werden als »Ortsfremde« oder »Zuwanderer« bezeichnet.

Im Zusammenhang mit Mobilität in Jäger und Sammlergesellschaften oder pastoralen Wirtschaftssystemen wird von »saisonalen Mobilität« die Rede sein.

Die Rolle von Mobilität in sesshaften Gemeinschaften in der ur- und frühgeschichtlichen Forschung

Die archäologische Forschung widmete der Mobilität in sesshaften Gemeinschaften im Laufe ihrer Wissenschaftsgeschichte in sehr unterschiedlichem Maße Aufmerksamkeit. Während sie in Form von »Wanderungen«, »Migrationen«, »Invasionen« oder »Bevölkerungsverschiebungen« von einigen Fachvertretern als Hauptursache für kulturellen Wandel dargestellt wurde (z. B. Gimbutas 1994), war sie für andere nahezu bedeutungslos (z. B. Schlette 1977, 39-40).

In der frühen archäologischen Forschungsgeschichte vom Ende des 19. Jahrhunderts bis zum Zweiten Weltkrieg spielte die ethnische Deutung von materiellen Hinterlassenschaften eine entscheidende Rolle. Gruppen in der materiellen Kultur wurden als Spiegel von Menschengruppen, in der Regel von Stämmen oder Völkern, betrachtet. Scheinbar plötzlichen Kulturwandel erklärte man mit Einwanderungen oder Invasionen, d. h. mit dem Ersetzen einer Bevölkerungsgruppe durch eine andere⁵⁵.

Diesem Ideengut liegen romantisch, heroisch verklärte Vorstellungen von Völkern und deren Wanderungen zugrunde, was z. B. in den Schriften Gustaf Kossinnas deutlich wird. Seine Versuche, den Ursprung und die Ausbreitung von Germanen und Indogermanen mit Hilfe von Kartierungen z. T. nur einzelner Elemente materieller Kultur nachzuvollziehen, wurden in der späteren Auseinandersetzung mit seinem Werk als »Migrationismus« bezeichnet⁵⁶.

Recht pauschale Wanderungshypothesen finden sich auch in der frühen englischen Forschungsgeschichte. Hier spielten besonders Invasionen vom Festland auf die Britischen Inseln eine bedeutende Rolle (z. B. Crawford 1922; dazu: Clark 1966, 172-173, 187-188).

Als allgemeine Tendenz lässt sich festhalten, dass bis zum Zweiten Weltkrieg das Konzept von Völkerwanderungen in Anspruch genommen wurde, um Veränderungen in der materiellen Kultur eines Gebietes zu erklären. Wanderungshypothesen wurden zumeist sehr pauschal geäußert, ja sogar vorausgesetzt, ohne dass man sich Gedanken über die eigentlichen Mechanismen und Gründe von Wanderun-

⁵⁵ Zusammenfassende Erörterungen zu frühen Auffassungen zu Populationsverschiebungen als Grund für den Wandel in der materiellen Kultur finden sich bei: Adams 1968, 194; Chapman/Hamerow 1997a, 3; Chapman 1997, 12; Härke 1997, 64; Härke 1998, 21.

⁵⁶ Vgl. Klejn 1974, 8-9, 17. Beispiele für dieses Gedankengut im Werk Kossinnas finden sich in: Kossinna 1911; Kossinna 1912; Kossinna 1921. Zur kritischen Auseinandersetzung mit seinen Auffassungen vgl. Hachmann 1970, 145-182; Veit 1984; Adler 1987.

gen machte oder versuchte, sie kritisch anhand des archäologischen Materials herzuleiten (Adams 1968, 195-196; Clark 1966 mit zahlreichen Beispielen).

Nach dem Zweiten Weltkrieg distanzierte sich die deutschsprachige Forschung zunehmend von der ethnischen Deutung und konzentrierte sich auf die Klassifikation und zeitliche Gliederung des archäologischen Fundstoffs. Der Wanderungsgedanke wurde meist nicht mehr so explizit wie vorher geäußert, spielte aber meist implizit immer noch eine Rolle als Ursache für Kulturwandel. Man redete von »Einflüssen« und meinte damit Migrationen, im Sinne von Bevölkerungsverschiebungen oder Diffusion, die der autochthonen Entwicklung als Begründung für Kulturwandel vorgezogen wurden (Härke 1998, 20). Für die Abläufe und Hintergründe der Wanderungen selbst interessierte man sich jedoch kaum (Burmeister 2000a, 539) und setzte sich auch nicht kritisch mit ihrer Bedeutung und Nachweismöglichkeiten auseinander (Härke 1997, 63).

Ausnahmen von diesem Trend sind zweifellos die Studien R. Hachmanns, der sich im Rahmen seiner Auseinandersetzungen mit den Goten in Skandinavien umfassend und kritisch mit dem Konzept der »Völkerwanderungen« beschäftigte. Er erörtert nicht nur in systematischer Weise die Schwierigkeiten, aus archäologischen Quellen auf Wanderungen zu schließen, sondern setzt sich auch mit den verschiedenen Möglichkeiten von Wanderungen auseinander und nimmt eine Bewertung der Forschungsgeschichte vor dem Zweiten Weltkrieg unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von G. Kosinna vor. An die Seite Hachmanns ist der Historiker R. Wenkus zu stellen, der sich in seiner Habilitationsschrift »Stammesbildung und Verfassung« (Wenkus 1961) kritisch mit der Problematik der ethnischen Deutung im frühen Mittelalter auseinandersetzt. Eine reflektierende Bewertung des Ethnosbegriffes ist Voraussetzung für Aufschlüsse über Völkerwanderungen anhand archäologischer Hinterlassenschaften.

Kleinere Beiträge zur Problematik des Erkennens von in Schriftquellen überlieferten Wanderungen anhand des archäologischen Niederschlags verfassten außerdem u.a. B. Krüger und F. Schlette (Krüger 1977; Schlette 1977).

In der amerikanischen Archäologie fand in den 1960er Jahren ein Paradigmenwechsel statt. Eingeleitet durch L. Binfords Aufsatz »*Archaeology as Anthropology*« (1962) konnte sich die »*New Archaeology*« immer mehr durchsetzen (Bernbeck 1997, 35-48). Mobilität in sesshaften Gesellschaften wurde in dieser Forschungsrichtung kaum beachtet oder regelrecht abgelehnt (Burmeister 2000a, 539, mit Literaturverweisen; Chapman/Hamerow 1997a, 3).

Die *New Archaeology* beschäftigte sich mit Langzeitabläufen oder sog. »Prozessen«. Wanderungen galten nicht als Prozess, sondern als Ereignis und wurden daher als Erklärungsmodell für Kulturwandel abgelehnt (Härke 1997, 61; Champion 1990, 21)⁵⁷. Betont wurden dagegen Anpassungen an die physische und soziale Umwelt, lokale Entwicklungen und Kontinuität (Ruiz Zapotero 1997, 159; Kristiansen 1989, 211).

Für die Ablehnung von Migrationshypothesen spielt sicherlich auch die Tatsache eine Rolle, dass man sich bewusst von der traditionellen Archäologie absetzen wollte und deshalb gegensätzliche Erklärungsmodelle für Kulturwandel bevorzugte (Chapman/Hamerow 1997a, 4; Ruiz Zapotero 1997, 159). Infolge eines kritischeren Umgangs mit den Quellen erkannte man sicherlich auch die Schwierigkeiten, Wanderungen allein anhand des archäologischen Befundes nachzuvollziehen (Ruiz Zapotero 1997, 159).

Seit den 1960er Jahren begann auch in der britischen Archäologie eine Phase der Ablehnung von Wanderungshypothesen und einer Bevorzugung von vom Kontinent unabhängigen Entwicklungen, was z.B. in dem mit »*The invasion hypothesis in British archaeology*« überschriebenen Aufsatz von J. G. D. Clark (1966) deutlich wird.

Seit Ende der 1980er bzw. Beginn der 1990er Jahre erfreuen sich Wanderungen sowohl in der anglophonen als auch in der deutschsprachigen Forschung wieder verstärkten Interesses. Obwohl es

⁵⁷ Ausnahmen sind Byrne (1978) und Clarke (1968, 411-431, bes. 413), wo Wanderungen – besonders in Folge von krie-

gerischen Ereignissen – ein sehr hoher Stellenwert zugebilligt wird.

sicherlich Vorläufer wie die Publikationen von A. J. Ammerman und L. L. Cavalli-Sforza (1984) und I. Rouse (1986) gibt, können die Themensetzung »*New Perspectives on Prehistoric Migrations*« auf der Tagung der *Theoretical Archaeology Group Conference* 1989 in Newcastle, Großbritannien, und der daraus hervorgegangene Aufsatz von K. Kristiansen »*Prehistoric migration – the case of the Single Grave and Corded Ware cultures*« (1989) als Anstoß einer neuen, theoretisch orientierten Diskussion um Mobilität in sesshaften Gesellschaften gewertet werden. Nicht minder bedeutend war der 1990 von D. W. Anthony publizierte Aufsatz »*Migration in Archeology: The baby and the bathwater*« (Anthony 1990)⁵⁸.

Das neuerliche Interesse an Wanderungen spiegelt sich auch in einer Reihe von Kolloquien wider. So stand 1993 die Zusammenkunft der *Theoretical Archaeology Group* (TAG) unter dem Thema »*Migrations and Invasions in Archaeological Explanation*« (Chapman/Hamerow 1997b). Derselben Thematik widmeten sich das 46. Internationale Sachsensymposium im Jahre 1995, das mit »Die Wanderung der Angeln nach England« überschrieben war (Stud. Sachsenforsch. 11), sowie die Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte 1996 (Arch. Inf. 19, 1996; 20, 1997). Auch unabhängig von diesen Tagungen erfolgten Auseinandersetzungen mit den archäologischen Nachweismöglichkeiten von Wanderungen und ihrem Stellenwert im Leben in der Vergangenheit⁵⁹ sowie zu konkreten archäologischen Problemen wie den germanischen Wanderungen und dem Verhältnis von Germanen, Slawen und Deutschen⁶⁰.

Diese jüngeren Forschungen unterscheiden sich grundlegend von den Interpretationen vor den 1960er Jahren. Bevölkerungsverschiebungen werden nicht mehr einfach als Gründe für Kulturwandel vorausgesetzt, sondern es wird kritisch erörtert, wie sie aus den archäologischen Hinterlassenschaften zu erschließen sind. Weiterhin stehen jetzt auch die Wanderungen selbst, als Teil des ur- und frühgeschichtlichen Lebens, im Mittelpunkt. Dachte man in der früheren Forschungsgeschichte beim Begriff »Wanderungen« zumeist an Völkerwanderungen, so wurde man sich in den neueren Arbeiten des breiten Spektrums verschiedener Wanderungsformen bewusst. Von Interesse sind nicht mehr nur große Gruppen, die zuvor meist pauschal mit Völkern oder Stämmen in Verbindung gebracht wurden, sondern durchaus auch kleinere Gemeinschaften und Einzelindividuen. Außerdem erfolgt(e) eine eingehende Auseinandersetzung mit der Bedeutung von Wanderungen in der archäologischen Forschungsgeschichte und dem Einfluss der jeweiligen politischen und fachgeschichtlichen Konstellationen auf ihre Stellung im Rahmen der Forschung⁶¹.

Seit Anfang der 1990er Jahre treten Wanderungen mit der Entwicklung neuer Analysemethoden auch wieder verstärkt in das Interesse naturwissenschaftlich⁶² ausgerichteter Forschungen (vgl. S. 592 ff.). Dies zeigt sich in der jüngsten Forschungsgeschichte auch darin, dass auf dem *33rd International Symposium on Archaeometry* im Jahr 2002 das Spezialthema des Bereiches Biomaterialien mit »*Human migration and mobility as detected from the analysis of biological materials*« überschrieben war.

In der neueren kulturwissenschaftlichen Auseinandersetzung mit Wanderungen ist jedoch kaum eine Rezeption dieser Ansätze zu sehen. Diese jüngste forschungsgeschichtliche Situation unterscheidet sich damit grundlegend vom Verhältnis zwischen naturwissenschaftlichen – damals physisch anthropologisch, rassenkundlich – und auf die materielle Kultur bezogenen Ansätzen vor dem Zweiten Weltkrieg. Damals wurden die physischen Überreste des Menschen selbst sowie seine materiellen Hinterlassenschaften gleichermaßen und einander ergänzend herangezogen, um das Entstehen und die Ausbreitung von Völkern zu erklären (vgl. Kossinna 1921). Nach dem Zweiten Weltkrieg bis in die 1980er Jahre gab es seitens der archäologischen Forschung kaum noch Auseinandersetzungen mit Wanderungen, und

⁵⁸ Kritisch dazu äußerten sich: Chapman/Dolukhanov 1992. Sie warnen vor einer zu allgemeinen und ahistorischen Auseinandersetzung mit Migrationen.

⁵⁹ Adams 1968, 197; 207-209; Shennan 2000, 814; Gebühr 1997, 13; Jacomet/Kreuz 1999, 177-181.

⁶⁰ Leube 1995; Leube 1996; Brather 1996.

⁶¹ Vgl. Härke 1997; Chapman 1997; Chapman/Hamerow 1997a; Härke 1998.

⁶² Naturwissenschaftlich meint hier und im folgenden: mit naturwissenschaftlichen Methoden arbeitend, aber archäologische Fragestellungen verfolgend.

auch seitens der Anthropologie trat das Interesse an Bevölkerungsverschiebungen deutlich hinter anderen Fragestellungen zurück. Die vergleichsweise wenigen Studien, die dennoch auf beiden Seiten erstellt wurden, entstanden weitgehend unabhängig und nehmen kaum Bezug aufeinander.

Dieser Trend setzt sich bis heute fort, wo man sich beiderseits wieder verstärkt mit Wanderungen auseinandersetzt. Die jüngeren auf die materielle Kultur konzentrierten Auseinandersetzungen haben die neueren naturwissenschaftlichen Ansätze bislang kaum zur Kenntnis genommen. Menschliche Skelettreste werden nicht als Quellengattung diskutiert.

Die meisten der bisherigen Strontiumisotopenstudien gehen von einem spezifischen archäologischen Problem aus, dessen Interpretation mit Mobilität bzw. Wanderungen weit in die Forschungsgeschichte zurückreicht, und keinesfalls auf der jüngeren, eher theoretisch orientierten Auseinandersetzung fußt. Anhand dieser Beispiele ging es zunächst hauptsächlich um die Methodenentwicklung, was auch darin deutlich wird, dass viele der Studien in einschlägigen naturwissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht worden sind. Erst nachdem eine gewisse Anzahl von Proben untersucht wurde, und auch das biologisch verfügbare Strontium im Bereich einer Fundstelle und ihrem Umland ausreichend charakterisiert ist, kann mit einer zufriedenstellenden kulturwissenschaftlichen Interpretation der Daten, mit einer Zusammenschau von archäochemischen und auf der materiellen Kultur basierenden Anhaltspunkten und der darauf fußenden Formulierung von Modellen begonnen werden, wie dies in der jüngsten Publikation zur Populationsdynamik an der Fundstelle Grasshopper Pueblo in Arizona, geschah (Ezzo/Price 2002).

Die kulturwissenschaftliche Interpretation der mit naturwissenschaftlichen Methoden gewonnenen Daten bedarf einer intensiven Auseinandersetzung mit den jeweiligen Aussagemöglichkeiten. Die verschiedenen Formen von Mobilität in sesshaften Gemeinschaften sollen hier deshalb im Spiegel der verschiedenen Forschungsrichtungen betrachtet und gefragt werden, welche Probleme jeweils auftreten, und wie beide zu einer Synthese gebracht werden können.

Hinweise auf Wanderungen in der materiellen Kultur

Zur Erschließung von Mobilität stehen dem Archäologen Bodenfunde und -befunde zur Verfügung. Besonders in der jüngeren Literatur hat man zum einen auf Kriterien verwiesen, die sich aus einer Zusammenschau verschiedener Aspekte ergeben, zum anderen wurde das Potential einzelner Material- und Befundgruppen als Hinweis auf Wanderungen erörtert.

Material- bzw. befundgruppenübergreifende Kriterien sind z.B. Anzeichen für Diskontinuität in der Besiedlung einer Fundstelle oder einer Kleinlandschaft. So weisen fundleere, natürlich abgelagerte Schichten oder feinchronologische »Lücken« in einer stratigraphischen Abfolge sowie das kurzzeitige Fehlen von »Siedlungsanzeigern« in Pollenprofilen nach einer quellenkritischen Prüfung darauf hin, dass ein Platz oder eine Region verlassen und später wieder aufgesiedelt worden ist⁶³. Bei einer durchgängig vorhandenen Besiedlung können gleichzeitige Veränderungen in verschiedenen Bereichen der materiellen Kultur⁶⁴ oder Artefakte, die außerhalb ihres Hauptverbreitungsgebietes in den Boden gelangten, Hinweise auf Zuwanderungen geben⁶⁵. Fremde Bevölkerungsanteile sind wohl am ehesten in den Elementen der materiellen Kultur zu erkennen, die kaum funktional geprägt sind (Clarke 1975). S. Burmeister unterscheidet hier zwischen einem »Innen-« und einem »Außenbereich« der Sachkultur. Der Außenbereich stellt die Kontaktzone zwischen den Einwanderern und der sie aufnehmenden Kultur dar. Da er stark funktional geprägt und schnellen Anpassungen unterworfen ist, gibt er kaum Hinweise auf Wanderungen. Demgegenüber steht der »Innenbereich« – die Privatsphäre. Oft handelt es sich um Details, die für Außenstehende keine Funktion und auch keine soziale Signifikanz haben und somit

⁶³ Vgl. Adams 1968, 197; 207-209; Shennan 2000, 814; Gebühr 1997, 13; Jacomet/Kreuz 1999, 177-181.

⁶⁴ Adams 1968, 197; Myhre/Myhre 1972, 46-47; Kristiansen 1989, 219; Ruiz Zapatero 1997; Frankel 2000.

⁶⁵ Krüger 1977, 226; Myhre/Myhre 1972, 48; Wels-Weyrauch 1989; Burmeister 1996, 13; Burmeister 1997, 193.

nicht als Prestige- oder Modeobjekt übernommen werden. Die eher unscheinbaren Elemente des Innenbereichs wie die Inneneinrichtung von Häusern, aber auch Elemente, die bei alltäglichen Verrichtungen des Haushalts oder der »Freizeit« zu finden sind, scheinen größere Beständigkeit zu haben und sind damit zuverlässigere Hinweise auf Wanderungen⁶⁶.

Auch verschiedene Teile der materiellen Kultur wurden in der jüngeren Diskussion auf ihre Aussagefähigkeit bezüglich Wanderungen untersucht. Aus dem Bereich der Grab- und Bestattungssitten können eine Untersuchung der Grabausstattungen incl. Anzahl, Art und Position von Beigaben⁶⁷ sowie alterspezifische Charakteristika, insbesondere die Ausstattung von Kindergräbern, Hinweise auf fremde Individuen geben⁶⁸. Auch Bestandteile von Tracht und Schmuck können regionale, ethnische und nationale Unterschiede aufweisen, jedoch kaum sichere Anhaltspunkte für den Nachweis fremder Individuen bieten⁶⁹. Aus dem Bereich der Tonware kann handgemachte Keramik, die – ethnographischen Analogien folgend – zumeist von Frauen hergestellt wurde, und nur sehr langsam auf Veränderungen reagiert, zur Populationsdifferenzierung herangezogen werden. Besonders vielversprechend scheint hier die Analyse formaler Kriterien der Herstellungstechnik, die zwischen Familienmitgliedern tradiert sein können (Adams 1968, 199-202; Burmeister 2000a, 553). Der Aussagewert von architektonischen Elementen in Bezug auf Zuwanderungen ist umstritten, wie z.B. Untersuchungen an Häusern von europäischen Siedlern in Nordamerika zeigen (Burmeister 1996, 14-15; Anthony 2000, 555).

Schwierigkeiten des archäologischen Nachweises von Wanderungen

Ein Grundproblem der Erfassung von Wanderungen aufgrund materieller Hinterlassenschaften ist, dass keine untrennbare Verbindung zwischen menschlichem Individuum und materieller Kultur besteht. Für Veränderungen wird es neben Wanderungen immer auch alternative Erklärungsmöglichkeiten geben, die nur sehr schwierig auszuschließen sind (Myhre/Myhre 1972, 48-49). Ein Vorgehen, mit dem man allein aus den archäologischen Quellen mit zufriedenstellender Sicherheit auf Wanderungen oder sogar auf Herkunftsgebiete schließen könnte, gibt es nicht (Burmeister 2000a, 553).

Die Schwierigkeiten liegen auf zwei Ebenen. Zum einen kann es sein, dass der fremde kulturelle Habitus im Zuwanderungsgebiet sich nicht in den Bodenfunden niederschlägt, und zum anderen können Fremdelemente auch aus anderen Gründen als durch Wanderungen in den Boden gelangen. Wenn Fremdelemente der materiellen Kultur nicht in den Boden gelangen, können Zuwanderer in den archäologischen Hinterlassenschaften nicht erkannt werden. Dies kann folgende Ursachen haben:

Grenzen materieller Kultur werden nicht überschritten: Grundvoraussetzung für die Erkennung von Zuwanderern aufgrund der materieller Kultur ist, dass sich Herkunfts- und Zielgebiet in den für die Aussagen herangezogenen Elementen sichtbar unterscheiden. Werden bestimmte Verbreitungsgrenzen nicht überschritten bzw. findet die Wanderung im selben Kulturraum statt, so ist sie anhand von materiellen Hinterlassenschaften nicht erkennbar.

Integrationswille – Anpassung an die soziale Umwelt: Wenn es Unterschiede in der materiellen Kultur zwischen Ausgangs- und Zielgebiet gibt, so werden Zuwanderer in der neuen Heimat als Fremde erkennbar sein. Ob dies auch z.B. in der Grabausstattung noch der Fall ist, hängt von ihrem Integrationswillen ab. Ist eine Integration nicht angestrebt, so bekommen gruppenkennzeichnende Elemente bzw. »ethnische Marker« eine große Bedeutung, an denen man möglichst festhält. Diese Elemente können auch im archäologischen Befund erkennbar sein. Solche Spezifika brauchen aber letztendlich nicht auf die Herkunft ihrer Träger zu verweisen, sondern können auch Spiegel der aktuellen Gruppenzugehörigkeit sein. So ist z.B. denkbar, dass bei den Zuwanderern gebräuchliche Elemente der materiellen Kultur von den Einheimischen übernommen werden (Burmeister 1996, 16). Im Gegensatz dazu ist es natürlich auch vorstellbar, dass Zuwanderer die materielle Kultur der Einheimischen übernehmen,

⁶⁶ Burmeister 1996; Burmeister 2000a; Burmeister 2000b.

⁶⁷ Vgl. Burmeister 1996; Burmeister 2000a; Burmeister 2000b.

⁶⁸ Vgl. Burmeister 1996, 17; Gebühr 1997; Burmeister 2000a, 542.

⁶⁹ Clarke 1975, 49-50; Jockenhövel 1991; Hägg 1996; Burmeister 1997.

sei es, dass sie Gegenstände von den Einheimischen bekommen (Schlette 1977, 40) oder selbst unter Einfluss der einheimischen Bevölkerung zur Produktion von im Zuwanderungsgebiet typischen Artefakten übergehen (Burmeister 1996, 14; Burmeister 2000b, 559). Während Angehörige der ersten Zuwanderergeneration, die kurz nach der Ankunft in der neuen Heimat versterben, möglicherweise noch fremde Elemente in der Grabausstattung aufweisen, ist anzunehmen, dass dies um so weniger der Fall ist, je mehr Zeit nach der Zuwanderung verstreicht (Anthony 2000, 555).

Anpassung an die physische Umwelt: Wenn sich die Umweltbedingungen zwischen Herkunfts- und Zielgebiet signifikant unterscheiden, so wird sich die materielle Kultur der Zuwanderer an die neuen Bedingungen anpassen. Viele Elemente der materiellen Kultur, die sich im Herkunftsgebiet als nützlich erwiesen haben, sind im Zielgebiet möglicherweise unpraktisch oder gar unbrauchbar. Ist dies der Fall, so werden sie in modifizierter Form oder überhaupt nicht mehr in den archäologischen Hinterlassenschaften erscheinen.

Im Gegensatz zu den aufgeführten Sachverhalten, die dafür sorgen, dass Fremde in einer Region nicht erkannt werden, gibt es auch verschiedene Gründe, Einheimische für Zuwanderer aus anderen Regionen zu halten. Dies ist dann der Fall, wenn sie in den Besitz fremder Artefakte kommen und im archäologischen Befund mit diesen assoziiert werden. Dieses in Besitz von fremden Artefakten kommen kann auf verschiedene Art und Weise geschehen. Eine häufig in Anspruch genommene Erklärung ist, dass Fremdelemente als Handels- oder Tauschgüter in ein Gebiet gelangen, ohne dass der Hersteller sich dort dauerhaft niedergelassen haben muss. Hersteller und Besitzer sind dann unterschiedliche Personen mit unterschiedlichem »Wohnsitz«⁷⁰. Eine weitere Erklärung für Fremdgüter sind der sog. Ideenaustausch oder die Diffusion. Natürlich sind dazu Kontakte zwischen verschiedenen Gruppen nötig, die nur mit menschlicher Mobilität erklärbar sind (Neustupný 1981, 117; Burmeister 2000a, 553). Dies muss aber nicht unbedingt mit der dauerhaften Niederlassung von Menschen in einem anderen Gebiet verbunden gewesen sein. Weiterhin können Artefakte auch als Raub- oder Beutegut in Gebiete kommen, in denen sie als fremd auffallen (Brather 1996, 196).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Wanderungen durchaus Spuren in den archäologischen Überlieferungen hinterlassen können. Sie jedoch eindeutig als solche zu identifizieren, ist oft schwierig oder gar unmöglich. Hier können gerade naturwissenschaftliche Analysen des menschlichen Skelettmaterials selbst weitere Kriterien bieten.

Der Beitrag der Strontiumisotopenanalyse zur Erfassung von Mobilität in sesshaften Gemeinschaften

Die Auseinandersetzung mit Mobilität in sesshaften Gemeinschaften stellt bisher das wesentlichste Anwendungsgebiet von Strontiumisotopenanalysen dar und wurde in zahlreichen Studien zu spezifischen Fundplätzen bzw. Fragestellungen behandelt. In diesen ging man aufgrund des archäologischen Kontextes von einer sesshaften Lebensweise der untersuchten Individuen aus und beprobte jeweils den Schmelz eines Zahnes und das Knochengewebe – meist aus der Kompakta des Femurs oder von den Rippen – als Repräsentant für die Kindheit und für die letzten Lebensjahre vor dem Tod.

Um Wanderungen in sesshaften Gemeinschaften evaluieren zu können, sollte man streng genommen zunächst feststellen, ob die Individuen wirklich sesshaft gelebt haben. Da die menschlichen Dauerzähne eine Zeitspanne von vor der Geburt bis ca. zum zwölften bzw. 14. Lebensjahr dokumentieren, ist dies entweder durch eine Untersuchung mehrerer Zähne eines Gebisses oder mehrerer Proben eines Zahnes möglich. In Abhängigkeit davon, wie sehr die Sesshaftigkeit in Frage steht, sowie den Untersuchungskapazitäten empfiehlt es sich in der Praxis sicherlich, von mehreren Zähnen mehrere Proben zu entnehmen. Abb. 20 zeigt diesbezügliche, hypothetische Ergebnisse von durch das Vorhandensein des M3 als erwachsen gekennzeichneten Individuen⁷¹. Im Erwachsenenalter ist der erste Dauerzahn meist sehr

⁷⁰ Hoika 1996, 11; Schlette 1977, 43; Brather 1996, 196.

⁷¹ Konkrete Messdaten dieser Art wurden kürzlich in Schweissing/Grupe 2003a, Fig. 4 vorgelegt.

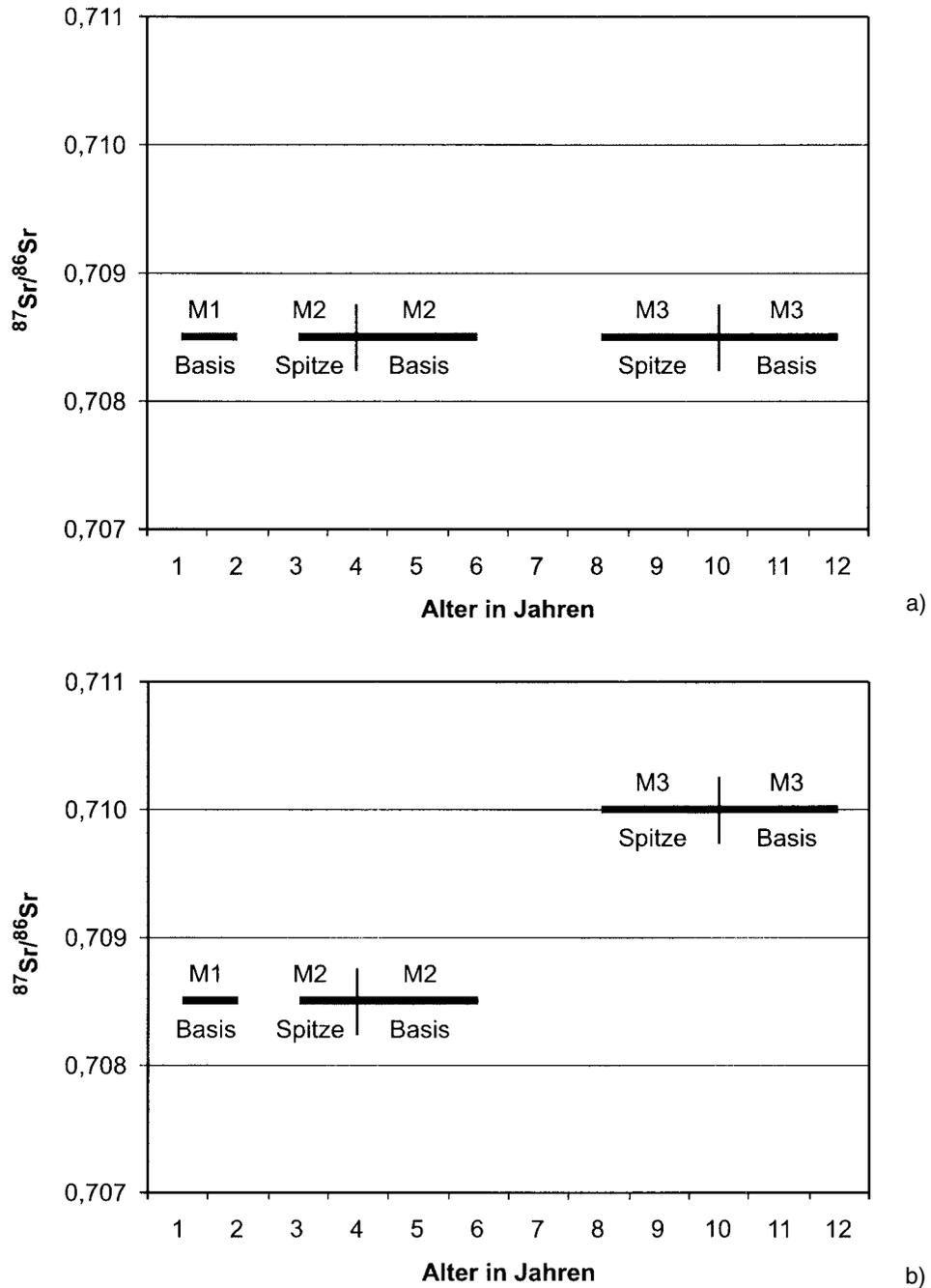


Abb. 20 Potentielle Strontiumisotopenverhältnisse verschiedener Bereiche des Schmelzes der Dauermolaren eines sesshaften, erwachsenen Individuums. Ähnliche Werte in allen Proben (Diagr. a) würden für eine Ortskonstanz während der Kindheit sprechen. Ergebnisse wie in Diagr. b weisen auf einen Ortswechsel zwischen dem sechsten und achten Lebensjahr hin. Die Einheitlichkeit der Strontiumisotopenverhältnisse davor und danach spricht aber ebenfalls auf eine sesshafte Lebensweise.

stark abradert, so dass die Spitze oft nicht mehr beprobt werden kann. Zahnschmelzproben des M2 aus dem Bereich der Spitze würden das dritte und vierte, Proben aus dem Bereich der Basis das vierte bis sechste Lebensjahr widerspiegeln. Aus dem dritten Dauermolaren sind Informationen über den Aufenthaltsort während des achten bis zehnten (Spitze) bzw. des zehnten bis zwölften Lebensjahrs (Basis)

zu gewinnen. Weisen alle Proben ähnliche Werte auf, so liegt es nahe, dass das untersuchte Individuum den Zeitraum seiner Kindheit an einem Ort verbracht hat, also sesshaft war⁷² (Abb. 20a)⁷³.

Auch die in Abb. 20b dargestellten Messwerte implizieren eine sesshafte Lebensweise. Obwohl zwischen dem sechsten und dem achten Lebensjahr ein Ortswechsel stattgefunden hat, weist der früher bzw. später gebildete Zahnschmelz jeweils konstante Werte auf, was für längeres Verbleiben an den jeweiligen Wohnorten sprechen würde⁷⁴.

Ist aufgrund archäologischer bzw. naturwissenschaftlicher Kriterien von Sesshaftigkeit auszugehen, so gibt es verschiedene Möglichkeiten, unregelmäßige Wechsel des Aufenthaltsortes zu erkennen. Da sie im methodischen Teil dieser Arbeit schon eingehend erörtert worden sind, sei hier nur zusammenfassend auf sie verwiesen:

1. Unterschiede im Strontiumisotopenverhältnis in Zahnschmelz, der zu verschiedenen Zeiten gebildet wird (vgl. Abb. 20b)
2. Differenz des Strontiumisotopenverhältnisses zwischen Knochen und Zahnschmelz desselben Individuums $>0,001$ (vgl. S. 616f.)
3. Strontiumisotopenverhältnis des Zahnschmelzes weicht deutlich vom lokal biologisch verfügbaren Strontium ab, das auf verschiedene Weise bestimmt werden kann (vgl. S. 620ff.).

Wenn die Zahnschmelzwerte konstant sind, weisen die beiden letzten Kriterien auf eine Umsiedlung nach dem Abschluss der Schmelzbildung, also im Erwachsenenalter, hin.

Voraussetzung für die Entstehung der aufgeführten Kriterien durch einen Ortswechsel ist, dass sich das biologisch verfügbare Strontium des Herkunftsortes von dem am Zielort signifikant unterscheidet, d.h. mit der Wanderung die Grenze einer »Strontiumisotopenprovinz« überschritten wird.

Um die aufgeführten Kriterien als Hinweis auf eine Wanderung des betreffenden Individuums zu deuten, müssen zum einen der Einfluss von Kontamination während der Bodenlagerung und zum anderen ein umfangreicher Import von ortsfremden Nahrungsmitteln auszuschließen sein.

Nachweismöglichkeiten verschiedener Formen von Wanderungen in sesshaften Gemeinschaften

Sowohl in der Soziologie als auch in der Ur- und Frühgeschichtswissenschaft gibt es verschiedene Klassifikationsversuche von Wanderungen. Einige dieser Kategorisierungen sollen im folgenden vorgestellt und erörtert werden, ob und unter welchen Voraussetzungen sie mit der Strontiumisotopenanalyse erfasst werden können. Oft können Strontiumisotopenanalysen allein nicht über diese oder jene Wanderungsform entscheiden. Statt dessen sind außerdem weitere archäologische, naturwissenschaftliche und physisch anthropologische Daten heranzuziehen und kritisch auszuwerten.

Mobile Einheiten: Häufig werden Wanderungen nach mobilen Einheiten, d.h. der Anzahl der Individuen, die gemeinsam unterwegs sind, differenziert. E. Neustupný stellt verschiedene mobile Einheiten zusammen (Neustupný 1981, 115-116; Neustupný 1983, 12). Er unterscheidet zwischen Einzelindividuen, die z.B. ihrem Partner folgend ihren Wohnort wechseln oder aufgrund ihrer besonderen Fähigkeiten oder Aufgaben häufige Wechsel des Aufenthaltsortes vollziehen (z.B. Wanderhandwerker, Künstler, Händler, Kundschafter, Missionare usw.), kleinen Gruppen, die entweder familiär miteinander verbunden sein können oder als Händler, Rohmaterialprospektoren oder Krieger verwandtschaftlich unabhängig sind, Gemeinden, die aus zwei bis drei Familien bestehen, größeren Gruppen, die Dorfgemeinschaften aber auch Teile von Stämmen oder gar ganze Stämme darstellen können, und ganzen Populationen, die bei Landnahmeprozessen, Invasionen und »Völkerwanderungen« gemeinsam unterwegs sind.

⁷² Je homogener die geologischen Bedingungen im Umland des Fundplatzes sind, desto unsicherer ist diese Aussage. In großen Gebieten mit einheitlicher Isotopie des biologisch verfügbaren Strontiums ist es möglich, dass regelmäßige Ortswechsel nicht erkannt werden.

⁷³ Vgl. Schweissing/Grupe 2003a, Fig. 4a, Individuum N20.

⁷⁴ Vgl. Schweissing/Grupe 2003a, Fig. 4b, Individuum N36. Für potentielle Untersuchungsergebnisse eines nicht sesshaften Individuums vgl. Abb. 22.

Ebenfalls im Sinne von mobilen Einheiten unterscheidet K. Kristiansen zwischen »*full scale*« und »*select movement*« (Kristiansen 1989, 219). Unter *full scale movement* versteht er Wanderungen von ganzen Siedlungsgemeinschaften und Stammesgruppen, von denen niemand im alten Siedlungsgebiet zurückbleibt, bzw. Gemeinschaften, die vollständig mitsamt ihrer Habe und ihren Tieren umziehen. Als *select movement* bezeichnet Kristiansen Bewegungen von Teilen einer Siedlungsgemeinschaft. Der Ortswechsel wird nur von einigen Mitgliedern der Gemeinschaft vollzogen, während andere am Ort zurück-, und die Siedlungen bestehen bleiben.

Strontiumisotopenanalysen gehen methodisch bedingt immer vom Einzelindividuum aus. Daher muss, was die Form der Wanderung angeht, auch von Einzelindividuen ausgehend interpretiert werden. Wenn in einer Bestattungsgemeinschaft nur ein einziges Individuum als fremd auffällt, liegt es nahe, dass – sofern die Bestattungsgemeinschaft vollständig beprobt wurde – dieses Individuum auch als Einzelindividuum zugewandert ist. Erscheinen mehrere Individuen als fremd, stellt sich die Frage, ob diese gemeinsam oder getrennt voneinander zu ihrem Bestattungsort gekommen sind. Dies lässt sich aufgrund von Strontiumisotopendaten eigentlich nicht entscheiden. Selbst, wenn ähnliche Strontiumisotopenverhältnisse des Zahnschmelzes der Zuwanderer auf eine gemeinsame Herkunftsregion hinweisen, ist zu diskutieren, inwieweit sie wirklich gemeinsam unterwegs waren. Auch wenn die betroffenen Individuen anhand der Grabbeigaben oder absoluter Datierungen archäologisch als gleichzeitig erscheinen, ist dies nicht sicher. Zum einen ist es möglich, dass sie aus verschiedenen Siedlungen in derselben Strontiumisotopenprovinz stammen, und zum anderen kann es sich auch um Zuwanderungen in kurzen zeitlichen Abständen im Sinne eines Wanderungsstromes (vgl. S. 643) handeln. Diese kurzen zeitlichen Abstände können sehr leicht jenseits der chronologischen Auflösungsmöglichkeiten von archäologischen Datierungen liegen.

Andererseits ist jedoch auch nicht gesagt, dass Individuen, die ihren Zahnschmelzwerten nach zu urteilen an unterschiedlichen Orten aufgewachsen sind, nicht gemeinsam an ihren letzten Aufenthaltsort gelangten. Dies ist möglich, wenn sich unterwegs fremde Mitglieder einer Gruppe anschlossen oder Individuen ihren Wohnort mehrmals wechselten.

Einen Hinweis auf Wanderungen im Familienverband kann die Feststellung von Wanderungen im Kindesalter geben. Erwachsene, die offensichtlich während ihrer Zahnbildungsphase einen Ortswechsel erlebt haben, oder an einem Fundort fremd erscheinende Kinder können darauf hinweisen, dass Familien, die sich vielleicht auch in größeren Gruppen organisiert haben konnten, mobile Einheiten waren. Es ist kaum denkbar, dass Kinder ohne die Begleitung von Erwachsenen weite Strecken zurücklegen. Der »Familienhypothese« ist allerdings auch entgegenzuhalten, dass Kinder verschleppt werden können, und somit getrennt von ihren Eltern an einen neuen Aufenthaltsort gelangen.

Einen Anhaltspunkt für Wanderungen von sehr großen Gruppen, z.B. von »Stämmen«, die aus mehreren Siedlungsgemeinschaften bestehen, kann die Beprobung von mehreren gleichzeitigen Gräberfeldern einer Region geben. Findet man in diesen jeweils Individuen, die wahrscheinlich demselben Herkunftsgebiet zuzuordnen sind, so könnte dies ein Hinweis auf Wanderungsbewegungen von größeren Gruppen aus dem gleichen Herkunftsgebiet sein.

Gruppen, die sich erst auf dem Weg aus Individuen verschiedener Herkunft zusammenschließen, sind mit Hilfe der Strontiumisotopenanalyse nicht als gemeinsame Ankömmlinge erkennbar.

Zusammenfassend bleibt daher festzuhalten, dass es mit Hilfe von Strontiumisotopenanalysen zwar durchaus möglich ist, Individuen mit potentiell gleichem Herkunftsgebiet zu erkennen. Aufgrund dieser Daten ist allerdings weder zu entscheiden, ob sie wirklich gemeinsam an den Fundort gelangten, noch ob dies für Individuen mit verschiedenen Herkunftsorten zutrifft. Die Größe von mobilen Einheiten ist daher allein aufgrund von Strontiumisotopendaten nicht erfassbar.

Distanz: Nach der Distanz der zurückgelegten Strecke kann zwischen Langstrecken- und Kurzstreckenwanderungen unterschieden werden. Dies scheint aber mehr intuitiv als von konkreten Distanzvorgaben geleitet zu sein. Nach D. W. Anthony sind weniger die überwundenen Strecken als vielmehr das Verbleiben im oder das Verlassen des »sozialen Netzwerkes« entscheidend. In diesem Sinne definiert er Kurzstreckenmigration oder lokale Migration als eine Wanderung innerhalb der »Heimat-

region«. Man bewegt sich zu einem bekannten Platz, der von bekannten Menschen bewohnt wird, und verbleibt im selben sozialen Netzwerk, das von Verwandtschaft, Heiratsaustausch und gemeinsamem wirtschaftlichen und geographischen Wissen und ständigem Informationsaustausch geprägt ist (Anthony 1990, 901; Anthony 1997, 26).

Eine Form der Kurzstrecken- oder lokalen Migration ist das von A. J. Ammerman und L. L. Cavalli-Sforza (1984, 63-82) z.B. für die Ausbreitung des Neolithikums in Europa oder die Besiedlung Amerikas in Anspruch genommene »*Wave-of-advance*« oder »Vorstoßwellenmodell«. Danach kommt es bei lokal sehr hohen Geburtenraten zur Auswanderung von Individuen in zufällig ausgewählte, nicht weit entfernte, weniger dicht besiedelte Gebiete.

Im archäologischen Material hinterlassen Kurzstrecken- bzw. lokale Wanderungen wahrscheinlich meist nur sehr geringe oder keine Spuren, da Verbreitungsgrenzen von materieller Kultur kaum überschritten werden (Anthony 1990, 901). Im Gegenteil: sie sind grundlegend für die Entstehung und Aufrechterhaltung von regionalen Kulturen (Anthony 1997, 26).

Langstreckenmigrationen gehen über kulturelle und ökologische Grenzen hinaus und können daher auch in archäologischen Funden und Befunden Spuren hinterlassen. Sie hängen in hohem Maße von der Möglichkeit der Informationsgewinnung über das Zielgebiet und von den Transportrouten und -techniken ab (Anthony 1990, 902).

Eine Form der Langstreckenmigration ist die »*Leapfrogging migration*« oder »Froschsprungmigration«. Das Modell der Froschsprungmigration geht davon aus, dass Kundschafter in entlegene Gebiete entsandt werden, um Informationen zu beschaffen und an die potentiellen Wanderer zu übermitteln. Die Wanderer ziehen dann in die ausgekundschafteten Gebiete, lassen sich dort nieder und senden bei Bedarf wieder Kundschafter aus, um neue Gebiete zu erschließen (Anthony 1990, 902). Archäologische Hinweise auf diese Form der Wanderung sollten Spuren von Händlern, Fallenstellern/Jägern, Söldnern, Handwerksspezialisten oder anderen Informationsübermittlern sein, die erhebliche Distanzen überwinden. Die ersten Zuwanderer siedeln sich in Zentren an, zwischen denen es noch unbesiedeltes Land gibt, das später von nachfolgenden Gruppen in Anspruch genommen wird⁷⁵.

Eine weitere Form der Langstreckenmigration sind die sog. Wanderungsströme oder »Kettenwanderungen«. Dies bedeutet, dass es über längere Zeit hinweg immer wieder zu Wanderungen zwischen zwei weit voneinander entfernten Gebieten kommt, für die mehr oder weniger auch dieselben Verbindungswege genutzt werden. Bei dieser Form der Wanderung ist davon auszugehen, dass zwischen Herkunfts- und Zielgebiet verwandtschaftliche Beziehungen bestehen, die einen fortlaufenden Austausch von Informationen über das Zielgebiet sowie über den Weg dorthin gewährleisten. Diese ermöglichen, dass immer wieder Leute nachziehen können. Archäologische Hinweise auf Wanderungsströme sollten Artefaktverteilungen sein, die sich an einem bestimmten Weg orientieren, jedoch werden solche Fundplätze immer nur kurz besiedelt gewesen und heute schwer zu erkennen sein (Anthony 1990, 903-904; Anthony 1997, 26-27).

– Strontiumisotopenanalysen: Über verwandtschaftliche und soziale Beziehungen, die zwischen Individuen im Herkunfts- und Zuwanderungsgebiet bestanden, ist mit Hilfe der Strontiumisotopenanalysen nichts auszusagen. Sie können daher zu einer auf diesen Grundlagen beruhenden Unterscheidung zwischen Kurz- und Langstreckenwanderungen nichts beitragen.

Über die zurückgelegten Distanzen können dagegen durchaus Aussagen getroffen werden, was jedoch von den geologischen Bedingungen und dem Forschungsstand im Bezug auf die Kenntnis des lokalen biologisch verfügbaren Strontiums sowohl am Fundort selbst als auch im näheren und fernerem Umland abhängt. Kommen aufgrund geringer Unterschiede im biologisch verfügbaren Strontium mehrere Herkunftsgebiete in Frage, so kann zumindest über die mindestens überwundene Distanz eine Aussage getroffen werden.

Das Erkennen von Lang- und Kurzstreckenwanderungen ist von der Variabilität im biologisch verfügbaren Strontium abhängig. In geologisch homogenen Gebieten ist die Überwindung von Distanzen von

⁷⁵ Vgl. Anthony 1990, 902-903; Burmeister 1998, 27; Burmeister 2000a, 544.

mehreren hundert Kilometern möglicherweise nicht erkennbar. Dies wäre z.B. in der Donauniederung der Fall, wo für Knochen aus Bayern und der Gegend von Budapest in Ungarn sehr ähnliche Strontiumisotopenverhältnisse festgestellt wurden (Price et al. 2004).

Andererseits können in Gebieten hoher geologischer Variabilität bereits Umsiedlungen über eine Distanz von wenigen Kilometern sichtbar werden. Dies wäre z.B. bei einem Ortswechsel vom Donautal auf die Höhen des von Gneisen und Graniten dominierten Bayerischen Waldes nordöstlich des Flusses denkbar.

Im allgemeinen werden jedoch auch mit Hilfe von Strontiumisotopenanalysen Langstreckenwanderungen – im Sinne der Überwindung von großen Distanzen – mit höherer Wahrscheinlichkeit als Kurzstreckenwanderungen sichtbar sein, da bei ersteren eine größere Chance besteht, die Grenze einer Strontiumisotopenprovinz zu überschreiten. Eine Auseinandersetzung mit der Art einer möglichen Langstreckenwanderung im Sinne von z.B. einer »Froschsprungmigration« oder eines Wanderungsstromes wird auf die Problematik der kaum feststellbaren mobilen Einheiten und der mangelnden feinchronologischen Differenzierung stoßen.

Motivation: Bei einer Kategorisierung von Wanderungen nach der Motivation können sowohl Einzel- als auch Gruppeninteressen entscheidend sein, wobei erstere entweder als »persönlich« oder als »beruflich« einzustufen sind. Eine sicherlich bedeutende persönliche Motivation für das Verlassen des Heimatortes ist eine Partnerschaft. Es können aber auch Abenteuerlust, Glückssuche, Bewährungsproben und Prestigegewinn zum Verlassen des Wohnortes motivieren.

Eher aus »beruflichen« Gründen können Menschen mit besonderen Fähigkeiten oder Aufgaben unterwegs sein (Kristiansen 1989, 220). Darunter fallen z.B. die oft in der archäologischen Literatur angesprochenen »Wanderhandwerker« wie Schmiede, Töpfer, Künstler, aber auch Händler und Missionare. Anthony bezeichnet diese Form der Wanderung als »Karrierewanderung«, wobei sich der Zielort nach den Bedürfnissen der »einstellenden Institution« richtet (Anthony 1997, 27).

Nicht nur Interessen von Einzelindividuen, sondern auch solche von menschlichen Gemeinschaften können Motive für Wanderungen sein. Gruppeninteressen sind z.B. die Kolonisation eines Gebietes oder die Flucht vor Naturkatastrophen und menschlicher Bedrohung.

Motive für Wanderungen können auch in die Kategorien friedlich und kriegerisch unterteilt werden. Friedlich motivierte Wanderungen sind sicherlich Heiratsaustausch, Karrierewanderungen, viele Formen des Reisens oder des Handels, während Kriegs- und Beutezüge, Invasionen und Eroberungen (Kristiansen 1989, 220) als kriegerische Formen von Wanderungen einzustufen sind.

– Strontiumisotopenanalysen: Aus den Strontiumisotopendaten selbst lassen sich Motivationen für Wanderungen nicht ableiten. In Kombination mit weiteren archäologischen oder physisch-anthropologischen Daten können sich aber wichtige Aspekte ergeben. Zeigen z.B. physisch-anthropologische Geschlechtsbestimmungen, dass ein Geschlecht unter den Zuwanderern deutlich überwiegt, so ist es wahrscheinlich, dass Ortswechsel zum Zweck der Partnerfindung große Bedeutung hatten.

Dauer der Einzelaufenthalte: Eine weitere Klassifikationsmöglichkeit von Wanderungen ist die Dauer der Aufenthalte in einem Gebiet. Man kann unter diesem Gesichtspunkt zwischen dauerhaften und zeitlich begrenzten Aufenthalten unterscheiden. Dauerhafte Aufenthalte zeichnen sich dadurch aus, dass die Zuwanderer sich in ihrem Zielgebiet niederlassen und dort für längere Zeit oder teilweise auch bis zu ihrem Tod verweilen. Einzelindividuen werden Teil der aufnehmenden Gemeinschaft; Gruppen legen neue Siedlungen an. Beispiele für dauerhafte Aufenthalte sind Xenogamie oder Wanderungen im Zuge der Kolonisation eines neuen Siedlungsgebietes.

Demgegenüber stehen von vornherein zeitlich begrenzte Aufenthalte, die man auch als »Reisen« bezeichnen könnte. Neustupný definiert Reisen als eine vorübergehende Verschiebung von Personen an eine andere Stelle ohne Absicht einer dauernden Niederlassung (Neustupný 1981, 115). Gründe dafür können z.B. Prospektion und Abbau von Rohmaterialien, Handel und Tausch, Wanderhandwerk, Feste, Rituale, Besuche, Versammlungen oder Kriegszüge sein (Neustupný 1981, 112; Neustupný 1983, 12).

– Strontiumisotopenanalysen: Aussagen über die Dauer von Einzelaufenthalten sind von der Beprobungsweise abhängig. Mit Hilfe einer hohen Probandendichte bei der Untersuchung mehrerer Zähne eines

Gebisses – idealerweise in Kombination mit saisonal schwankenden Sauerstoffisotopendaten – wären Aussagen über die Aufenthaltsdauer an einem Ort während der Kindheit und die Zeitpunkte von Ortswechseln möglich.

Langfristige Ortswechsel im Erwachsenenalter lassen sich an einer Alteration von Knochenwerten im Vergleich zum Zahnschmelz desselben Individuums feststellen. Der Vergleich einer Zahnprobe mit dem über Faunenreste definierten biologisch verfügbaren Strontium lässt nur erkennen, ob es sich beim untersuchten Individuum um einen Zuwanderer handelt oder nicht. Aussagen über die Dauer des Aufenthaltes sind auf diese Weise nicht möglich.

Sehr kurze Aufenthalte in anderen Regionen, wie sie z.B. für das Reisen typisch sind, wird man mit Hilfe der Strontiumisotopenanalyse nicht erkennen können, da die Aufenthalte zu kurz sind, um das jeweils biologisch verfügbare Strontium sichtbar in Knochen- oder auch Zahngewebe zu inkorporieren.

Freiwilligkeit: Besonders in der Soziologie spielen Freiwilligkeit oder Zwang bzw. Aktivität und Passivität eine große Rolle bei der Kategorisierung von Wanderungen. Aktiven oder freiwilligen Wanderungen liegen freie Entscheidungen zugrunde. Man erhofft sich vom Wohnortwechsel Vorteile bzw. eine Verbesserung der Lebensqualität. Freiwillige Wanderungen können z.B. die Kolonisation neuer Gebiete oder Wanderungen im Zuge der Partnerwahl oder Karrieremigration sein.

Passiven oder erzwungenen Wanderungen liegen keine freien Entscheidungen zugrunde. Zwangswanderungen können durch Umweltkatastrophen, Hunger oder Kriege und Vertreibung ausgelöst werden (Anthony 1997, 27). Die Umsiedler können Flüchtlinge, Vertriebene, Verschleppte oder Sklaven sein.

Die Strontiumisotopenanalyse kann keine Anhaltspunkte für die Freiwilligkeit des Ortswechsels geben.

Demografische Auswirkungen: E. Neustupný gliedert Wanderungen nach ihren demografischen Auslösern oder Auswirkungen in demografische und undemografische Wanderungen (Neustupný 1981; 1983). Demografische Wanderungen haben ihre Ursachen oder Folgen in Veränderungen von Populationen, während das für undemografische Wanderungen nicht der Fall ist (Neustupný 1981, 112).

Undemografisch sind Wanderungen von wenigen Personen bzw. kleinen Gruppen. Beispiele sind das Reisen oder Karrierewanderungen. Neustupný listet unter dieser Kategorie auch Wanderungen auf, die z.B. auf die »Erschöpfung der Naturquellen« im Siedlungsareal zurückgehen und zu einer Umsiedlung in relativ kleiner Entfernung führen, wobei das ursprüngliche Siedlungsareal vorübergehend leer bleibt (Neustupný 1981, 112). Dazu ist anzumerken, dass solche kleinräumigen Umsiedlungen zwar wenig Auswirkungen auf die regionale Demografie haben; für die einzelnen Siedlungsstellen sind sie jedoch von erheblicher demografischer Bedeutung.

Die meisten Wanderungen sind als demografische Migrationen einzustufen. Neustupný unterscheidet Auswanderungen wegen Überbevölkerung, innere Kolonisation, Expansion, Kolonisation, Invasion (Neustupný 1981, 112-114; Neustupný 1983, 12) und Infiltration (Neustupný 1983, 12; Neustupný 1982, 278-279).

– Strontiumisotopenanalysen: Darüber, ob Wanderungen demografische Ursachen haben, d.h. ob sie z.B. durch Überbevölkerung oder Ressourcenknappheit ausgelöst wurden, kann die Strontiumisotopenanalyse keine Aussage treffen.

Die demografische Bedeutung von Zuwanderungen für das Einwanderungsgebiet lässt sich dagegen aus der Zahl der Zuwanderer an einer Fundstelle erkennen. Kann ein großer Teil der untersuchten Individuen als ortsfremd eingestuft werden, so hatten Zuwanderungen sicherlich erhebliche Auswirkungen auf die damalige Gemeinschaft.

Die von E. Neustupný behandelte Form der Infiltration, das Zusammenleben von Einheimischen und Fremden an einem Ort, lässt sich mit Hilfe der Strontiumisotopenanalyse sehr gut erfassen. Sie ermöglicht es, unter den Individuen eines Fundortes zwischen Einheimischen und Zuwanderern zu unterscheiden und kann daher eine Aussage darüber treffen, ob – und zu welchem Anteil – Zuwanderer in eine bestehende Gemeinschaft integriert oder zumindest auf demselben Gräberfeld bestattet wurden.

Organisationsform: Wanderungen können auch nach ihrer Organisationsform beurteilt werden. Diesbezügliche Kriterien wären, ob sie geplant sind, unter einheitlicher Führung stattfinden oder mehr oder weniger spontan und unorganisiert sind, ob die Mitglieder der wandernden Gemeinschaft aus derselben

Gruppe stammen, oder sich Menschen aus unterschiedlichen Gruppen und Herkunftsgebieten angeschlossen haben, ob es sich um eine einmalige Wanderung handelt oder im Sinne eines Wanderungsstromes immer wieder neue Auswanderer die Heimat verlassen und zu einen neuen Wohnort ziehen.

– Strontiumisotopenanalysen: Da bereits kaum eine Möglichkeit besteht, Aussagen über die Größe der gemeinsam wandernden Gruppen zu treffen, ist es mit Hilfe der Strontiumisotopenanalyse noch weniger möglich, Organisationsformen von Wanderungen zu erfassen.

Richtung: Weiterhin kann man Wanderungen nach der Richtung, in die sie stattfinden, unterteilen. Solche Kategorien wären Hinwanderung und Rückwanderung (Burmeister 1998, 27; Anthony 1997, 25), Immigration und Emigration und zirkuläre Migration bzw. Rundwanderungen (Anthony 1997, 26). Unter Rundwanderungen versteht man das regelmäßige Verlassen des Heimatgebietes mit einem bestimmten Ziel und dem Vorhaben, zurückzukehren. Beispiele für Rundwanderungen sind das Reisen, das mittelalterliche Wanderpfalzkönigtum, Kaufleute, die von Markt zu Markt ziehen, oder Wanderhandwerker.

– Strontiumisotopenanalysen: Rückwanderungen kurz vor dem Tod wären durch Strontiumisotopenanalysen durch Zahnschmelz mit einheimischem und Knochen mit fremdem Strontiumisotopensignal erkennbar. Ein fremdes Strontiumisotopensignal von Knochen ist nur dann zu erwarten, wenn der Aufenthalt an einem anderen Wohnort lang genug war, um das Strontiumisotopenverhältnis der Knochen sichtbar zu verändern, und die Rückkehr so kurz vor dem Tod erfolgte, dass eine Veränderung der Strontiumisotopie in Richtung des einheimischen Signals noch nicht erfolgt ist.

Rund- oder zirkuläre Wanderungen sind ebenso wie das Reisen aufgrund der kurzen Aufenthalte mit Hilfe der Strontiumisotopenanalyse kaum zu erfassen bzw. als solche zu erkennen.

Bisherige Untersuchungen

Im Mittelpunkt der bisherigen Strontiumisotopenstudien standen zunächst überhaupt das Erkennen von Zuwanderern bzw. in Ansätzen die Zuweisung von Zuwanderern zu bestimmten Herkunftsgebieten. In Bezug auf ihre Fragestellungen lassen sich neben eher methodisch orientierten drei Gruppen von Studien unterscheiden: solche, die prüfen, ob es Zuwanderer von einem bestimmten Ort gegeben hat, wie es aufgrund anderer Anhaltspunkte vermutet wird, solche, die allgemein die Bevölkerung eines Fundortes in Bezug auf das Vorhandensein von Zuwanderern betrachten, und solche, die sich mit archäologischen Phänomenen beschäftigen, die mit Mobilität in Verbindung gebracht wurden. Während sich die Untersuchungen zu den ersten beiden Fragestellungen auf einen bzw. wenige Fundorte beschränken, ist für letztere eine vergleichende Analyse mehrerer Fundstellen nötig.

Zuwanderung von bestimmten Orten: Im Falle einer entsprechend differenzierten materiellen Kultur und eines guten Forschungsstandes ist es möglich, Beziehungen zwischen zwei Gebieten oder sogar bestimmten Fundorten zu postulieren. Strontiumisotopenanalysen an menschlichen Knochen und Zähnen bieten hier eine Möglichkeit zur Überprüfung, welchen Einfluss dauerhafte Wohnortwechsel auf dieses Bild der Verbreitung der materiellen Kultur haben. Informationen über ein potentiell Herkunftsgebiet können auch aus schriftlichen Überlieferungen gewonnen werden. In diesem Falle bieten Strontiumisotopenanalysen eine Möglichkeit der Identifikation von Skelettresten mit schriftlich überlieferten Personen.

Untersuchungen zu der genannten Problematik müssen zunächst Individuen des potentiellen Zielortes der Wanderung umfassen, um festzustellen, welcher Anteil der Bevölkerung überhaupt von Zuwanderern gestellt wurde. Zur Überprüfung des Postulats der Zuwanderung von einem bestimmten Ort oder einer Region ist es weiterhin nötig, das dortige biologisch verfügbare Strontium zu ermitteln und mit den Strontiumisotopenverhältnissen für die als Zuwanderer klassifizierten Individuen zu vergleichen. Eine gute Vergleichbarkeit der Strontiumisotopie in Skelettresten der Zuwanderer und des biologisch verfügbaren Strontiums am postulierten Herkunftsort sagt allerdings zunächst nur, dass eine Zuwanderung von dort möglich ist. Um jedoch andere Ursprungsorte in einem bestimmten Umkreis um die Fundstelle auszuschließen, bedarf es Untersuchungen zum biologisch verfügbaren Strontium, die über den zunächst als potentiellen Herkunftsort herausgestellten Fundplatz hinausgehen.

Anhaltspunkte zu bestimmten Herkunftsgebieten von Zuwanderern hatte man z.B. bei den Untersuchungen an Skelettresten aus einem Massengrab bei Fort Knokke bei Kapstadt in Südafrika, das man mit Sklaven in Verbindung brachte, die von Makua, Maravi und Yao in Südostafrika nach Brasilien gebracht werden sollten, und deren Schiff im Jahre 1818 vor Fort Knokke sank (Cox/Sealy 1997).

Eine weitere derzeit noch nicht abgeschlossene Fallstudie beschäftigt sich mit einer möglichen von Tiwanaku ausgehenden Kolonisation⁷⁶. Dieses bedeutende städtische Zentrum am Titicacasee in Bolivien war zwischen 500 und 1100 n. Chr. besiedelt. An vielen gleichzeitigen Fundorten in Bolivien, Südperu und Nordchile sind von dort ausgehende Einflüsse auf die Architektur und bewegliche Artefakte feststellbar. Strontium- und Bleiisotopenuntersuchungen wurden bislang an Bestattungen aus Tiwanaku selbst und Chen Chen in Peru, einer 250km entfernt liegenden möglichen Kolonie, sowie zum biologisch verfügbaren Strontium beider Fundorte durchgeführt. Zwei der sechs aus Chen Chen beprobten Individuen konnten als Zuwanderer erkannt werden. Ihre Zahnschmelzwerte fallen in die Spannweite des biologisch verfügbaren Strontiums von Tiwanaku, was die Hypothese einer möglichen Herkunft von dort bestärkt. Auch unter den in Tiwanaku selbst bestatteten Individuen konnten Zuwanderer festgestellt werden, die alle aus einem Bereich stammen, der als Wohn- und Kultareal der Elite interpretiert wird. Osteologische Analysen konnten Schnittspuren an den Knochen von einem der drei Individuen feststellen, die auf eine Entfleischung der Leiche hinweisen. Aus dem archäologischen Kontext wurden auch die beiden anderen Bestattungen als Menschenopfer interpretiert (Knudson et al. 2001; Knudson et al. 2002).

Mit bislang 81 Proben ist eine Studie über die Populationsdynamik der Maya-Stadt Teotihuacan in Mexiko eine der umfangreichsten. Teotihuacan war mit mehr als 100000 Einwohnern in seiner klassischen Periode (um Chr. Geb. bis 650 n. Chr.) eines der komplexesten und am dichtesten besiedelten städtischen Zentren in der Neuen Welt vor der spanischen Kolonisation. In der Stadt sind verschiedene Bereiche zu unterscheiden: Kultareale, administrative Bereiche, »Paläste«, Handelsareale, Straßen, Tunnel und Wohnbezirke. In den Jahrhunderten nach Christi Geburt ist ein sehr starkes Bevölkerungswachstum in der Stadt zu verzeichnen, das ohne Zuwanderungen von außerhalb kaum denkbar wäre. Außerdem weisen architektonische Elemente und Artefakte in den Wohnkomplexen und Gräbern – vor allem die Keramik – auf Einwanderer aus verschiedenen Gebieten hin. Eines davon ist der über 300km entfernte Fundplatz Monte Albán im Tal von Oaxaca (Price et al. 2000).

Strontiumisotopenanalysen an menschlichen Knochen und Zähnen aus unterschiedlichen Teilen bzw. Wohnkomplexen von Teotihuacan, deren materielle Kultur sich in unterschiedlicher Weise durch Fremdeinflüsse auszeichnet, sollten Aufschlüsse über die jeweiligen Anteile von Zuwanderern an der Bevölkerung erbringen und die Hypothese von Verbindungen zu Monte Albán verifizieren. Ein Überblick über die materielle Kultur in verschiedenen Arealen des Fundplatzes und Ergebnisse der Strontiumisotopenanalysen ist Tab. 7 zu entnehmen.

Insgesamt waren sehr variable Strontiumisotopenverhältnisse der Zähne mit teilweise deutlichen Unterschieden zum in Teotihuacan biologisch verfügbaren Strontium festzustellen. Dies weist darauf hin, dass Zuwanderungen aus verschiedenen Gebieten für das Wachstum der Siedlung eine erhebliche Rolle gespielt haben mögen. Neben den Anhaltspunkten aus der materiellen Kultur sprechen auch die Strontiumisotopendaten für Monte Albán als möglichen Herkunftsort eines Teils der Zuwanderer (Price et al. 2002).

Charakterisierung der Bevölkerung eines Fundortes: Bei einer zweiten Gruppe von Untersuchungen geht es um die Charakterisierung einer an einem bestimmten Ort bestatteten Bevölkerung in Bezug auf die Bedeutung von Zuwanderungen. Was die Herkunft der »Fremden« anbelangt, beschränkt man sich in diesen Studien nicht auf die Prüfung des Postulats der Herkunft von einem bestimmten Ort, sondern untersucht das biologisch verfügbare Strontium an mehreren Stellen im näheren und weiteren Umfeld

⁷⁶ Die Unterscheidung zwischen Einheimischen und Zuwanderern beruht in den meisten der folgenden Beispiele in irgendeiner Weise auf Daten für Knochenmaterial. Im

Bewusstsein der möglicherweise damit verbundenen Probleme möchte ich jeweils den Interpretationen der einzelnen Autoren folgen.

Siedlungsbereich	Materielle Kultur	Strontiumisotopenanalyse
Oztoyahualco (300-550 n. Chr.)	– lokale Einwohner (nach Keramik, Siedlungs- und Bestattungsüberresten)	– Zähne (2): jeweils Hinweis auf Zuwanderer – Knochen (6): meist nahe dem lokalen Mittelwert ⇒ Langzeiteinwohner Teotihuacans – 2 Individuen etwas höher als Mittelwert ⇒ Zeit in Teotihuacan reichte nicht aus, um Sr-Isotopenverhältnis vollständig an lokale Werte anzupassen ➔ Zuwanderer sind anhand der materiellen Kultur nicht erkennbar
Cueva de las Varillas, Cueva del Pirul (Tunnelbestattungen) (6.-10 Jh. n. Chr.)	– spätere Einwohner der Stadt, die nach Besiedlungsrückgang weiterhin dort gelebt haben oder von außen gekommen sein können – Fremdeinflüsse auf materielle Kultur nicht erwähnt	– Zähne (5 bzw. 0): sehr unterschiedliche Werte ⇒ lokale Geburt sowie Herkunft aus verschiedenen Regionen – Knochen (8 bzw. 13): nahe dem lokalen Mittelwert ⇒ Langzeiteinwohner Teotihuacans
Barrio de los Comerciantes (nach 300 n. Chr.)	– runde Lehmziegelarchitektur, 10% fremde Keramik und andere Artefakte, Gräber, Nahrungszubereitung ⇒ Hinweise auf Einwanderer von der Golfküste	– Zähne (4): unterschiedliche, vom lokalen Mittelwert nach oben und unten abweichende Werte ⇒ Herkunft aus verschiedenen Regionen – Knochen (4): deutliche Angleichung an lokalen Mittelwert
Oaxaca Barrio (300-650 n. Chr.)	– Fremdeinflüsse in Grabbau, Urnen, Keramik, Kleinkunst ⇒ Hinweise auf Einwanderer aus dem Tal von Oaxaca	– Zähne (10): 3 Gruppen 1. nahe dem lokalen Wert 2. etwas höher als lokaler Wert 3. viel höher als lokaler Wert; ähnlich Monte Albán ⇒ Einheimische und Einwanderer aus verschiedenen Regionen – Knochen (10): etwas variabler als in anderen Siedlungsbereichen ⇒ mehr oder weniger dauerhafte Einwohner von Teotihuacan ➔ die beiden Individuen in Gruppe 3 könnten aus dem postulierten Herkunftsgebiet, dem Tal von Oaxaca, stammen

Tab. 7 Teotihuacan. Materielle Kultur verschiedener Siedlungsbereiche und Ergebnisse der Strontiumisotopenanalyse im Vergleich. In der Spalte »Strontiumisotopenanalyse« geben die Zahlen in Klammern Auskunft über die Anzahl der untersuchten Proben (Angaben nach: Price et al. 2000).

der Fundstelle, um wahrscheinliche Ursprungsregionen der Zuwanderer herauszustellen. Dies geschah bereits für einige Fundorte in Nordamerika und Mittel- und Westeuropa. In anderen, bislang noch nicht abgeschlossenen Studien liegen derzeit nur Daten für die jeweilige Population vor, während Untersuchungen zum biologisch verfügbaren Strontium im Umkreis der Fundstellen und damit Aussagen über die Herkunftsregionen der Zuwanderer noch ausstehen.

Das Grasshopper Pueblo, südlich des Colorado-Plateaus und nördlich der Sonoran-Wüste in Arizona gelegen, datiert ins 14. nachchristliche Jahrhundert und besteht aus ca. 500 in Trockenmauertechnik errichteten Räumen, die sich zu drei größeren zentralen Raumblocken und zehn weiteren, kleineren, etwas abseits gelegenen, zusammenschließen. Weiterhin gibt es mehrere kleinere, singuläre Wohneinheiten, einen großen und zwei kleinere freie Plätze sowie ein großes Kiva (Price et al. 1994a; Ezzo et al. 1997; Ezzo/Price 2002). Sowohl für den Südwesten der heutigen USA allgemein als auch für Grasshopper Pueblo im Speziellen wurde Mobilität sowohl aufgrund archäologischer als auch anthropologischer Untersuchungen eine große Bedeutung beigemessen. Bis in die Zeit um 1280 n. Chr. zeichnete sich die Gegend durch kleinere, verstreut in der Landschaft gelegene puebloartige Siedlungsplätze aus, die zu Beginn des 14. Jhs. zu Gunsten einer Ansiedlung in größeren Pueblos wie z.B. Grasshopper Pueblo mit

600-700 Einwohnern in seiner Blütezeit aufgegeben worden sind (Ezzo et al. 1997, 449-450 mit weiterer Literatur). Von insgesamt 70 erwachsenen Individuen, die entweder unter den Fußböden der Räume oder der Plätze bestattet worden waren, konnten aus dem Zahnschmelz (69 Proben) oder/und aus Knochenmaterial der Femurkompakta (16 Proben) Strontiumisotopen untersucht werden. 33 der Individuen wurden als Einheimische und 37 als Zuwanderer klassifiziert (vgl. Abb. 17⁷⁷). Zur Definition des vor Ort biologisch verfügbaren Strontiums wurden Knochen und Zähne von Feldmäusen herangezogen. Um Aussagen über die Herkunftsgebiete der Zuwanderer zu treffen, analysierte man außerdem rezente Mäuse von vier Stellen in der näheren Umgebung des Fundplatzes und von sechs Plätzen, die bis zu 100km von Grasshopper Pueblo entfernt liegen. Außerdem wurden drei menschliche Individuen aus dem ca. 20km westlich gelegenen Walnut Creek in die Studie einbezogen.

Die Auswertung der Daten berücksichtigt zunächst eine regionale Einordnung der Zuwanderer. Diese wurde aufgrund der Strontiumisotopendaten der rezenten Mäuse aus den verschiedenen Regionen getroffen. Waren aufgrund von Überlappungen des jeweiligen biologisch verfügbaren Strontiums keine eindeutigen Entscheidungen zu treffen, wurden zusätzliche Kriterien, wie die räumliche Lage der Bestattung, Grabbeigaben und Daten zur Ernährung, einbezogen (Ezzo/Price 2002, 505).

Die Daten wurden im Hinblick auf eine räumliche Verteilung der Zuwanderer innerhalb des Fundplatzes, das Geschlecht (Einheiraten von Frauen), der feinchronologischen Stellung innerhalb der Besiedlungszeit (Gründungs- oder Verfallsphase) und der Beigabenausstattung ausgewertet. Am Ende steht ein komplexes Modell zur Siedlungs- und Bevölkerungsdynamik des Fundplatzes (Ezzo/Price 2002, 513-517).

Ein weiteres Beispiel für sehr detaillierte Untersuchungen zur Bestimmung der Herkunft und des Aktionsradius zu Lebzeiten sind die naturwissenschaftlichen Studien an der 1991 in einem Gletscher zwischen dem Ötztal in Nordtirol und dem Vinschgau in Südtirol gefundenen Eismumie »Ötzi«, die wegen ihres außergewöhnlichen Erhaltungszustandes und Fundortes großes Interesse sowohl in der archäologischen Forschung als auch in der Öffentlichkeit erweckte (Höpfel et al. 1992; Egg/Spindler 1992; Groenman-van Waateringe 1992; Spindler et al. 1995; Spindler et al. 1996)⁷⁸.

Die Lokalität des Fundortes und der potentiellen Herkunfts- bzw. Aktionsgebiete in den Alpen ist ideal für naturwissenschaftliche Analysen, da hier sowohl in von den geologischen Gegebenheiten, wie sie in Strontium-, Blei- und Neodymisotopen und verschiedenen Spurenelementen reflektiert werden, als auch in Höhenlagen bzw. Entfernungen vom Meer, die sich in Sauerstoffisotopen widerspiegeln, eine hohe Variabilität vorliegt. Deshalb wurden Proben von Knochen, Zähnen und Nahrungsresten aus dem Gedärm der Eismumie nicht nur auf ihre Strontiumisotopie, sondern auch auf verschiedene andere radiogene und stabile Isotopenverhältnisse sowie Spurenelemente untersucht. Zusätzlich wurden Referenzdaten an Wasserproben, Lösungen von Gesteinen und Proben von Schädeln mittelalterlicher Bestattungen verschiedener Lokalitäten im Alpenraum erhoben (Hoogewerff et al. 2001; Müller et al. 2002; Müller et al. 2003). In der aktuellsten Analyse, die teilweise im Gegensatz zu zuvor publizierten Annahmen (Hoogewerff et al. 2001) steht, kommen W. Müller et al. (2003) zu dem Schluss, dass »Ötzi« sein gesamtes Leben innerhalb von 60km im Umkreis seines Fundortes verbrachte. Die Sauerstoffisotopenverhältnisse im Schmelz zweier Zähne schließen eine Kindheit nördlich der alpinen Wasserscheide aus. Strontium- und Bleiisotope zeigen, dass er nicht in einer Region mit Kalksteinen, Basalten und Permischen Vulkaniten aufgewachsen ist. Statt dessen stimmt der Zahnschmelz mit Werten für Gneise und Phyllite überein, wie sie im Schnalstal, Vinschgau, Ultental, dem mittleren Eisacktal und dem unteren Pustertal vorkommen. Diese potentiellen Lokalitäten stehen nicht im Widerspruch zu den Sauerstoffisotopendaten. Argon-Argon-Datierungen von winzigen Glimmerstücken, die im Gedärm des Eismannes gefunden wurden und sicherlich mit der Nahrung oder dem Wasser in den letzten Tagen vor dem Tod aufgenommen wurden, sprechen ebenfalls für einen Aufenthalt in einem Gebiet mit Gneis

⁷⁷ Diese Zahlen ergeben sich aus einem Vergleich mit dem anhand von Mäusezähnen ermittelten biologisch verfügbaren Strontium am Fundort.

⁷⁸ Datierung: 3350-3100 BC (Hoogewerff et al. 2001, 984).

im Untergrund. Besonders ein Datum von 95 Millionen Jahren spricht für ein Gneisvorkommen in einem kleinen Gebiet 10 bis 20km SW-NW von Merano im unteren Vinschgau.

Zieht man zusätzlich bereits bekannte archäologische Hinterlassenschaften als Argumente heran, so liegt es nahe, das Eisacktal und insbesondere Feldthurns als Ort des Aufenthalts während der Kindheit anzunehmen. Weiterhin kommen das Pustertal, der unterste Vinschgau (Etschtal) bei Merano und das Ultental in Frage, obwohl von dort teilweise bislang keine gleichzeitigen archäologischen Fundstellen bekannt geworden sind. Besonders die etwas niedrigeren Sauerstoffisotopenverhältnisse der Knochen sprechen für einen Ortswechsel in eine etwas höher oder weiter nordwestlich gelegene Region im Erwachsenenalter.

Eine weitere Interpretationsmöglichkeit der geringen Unterschiede in den Sauerstoff- und Strontium- sowie Bleiisotopenverhältnissen zwischen den beiden Knochenproben und der Darmwand ist regelhafte Mobilität im Zusammenhang mit Transhumanz, die Wanderungen zwischen relativ niedrig gelegenen Siedlungen im Süden und Sommergebirgsweiden oberhalb der Baumgrenze im Norden umfasst haben könnte.

Ähnlich angelegt wie die Studie zur Mobilität in Grasshopper Pueblo sind die Untersuchungen an Bestattungen der spätrömischen Nekropole des Kastells von Neuburg an der Donau in Bayern⁷⁹. Im Unterschied zu Grasshopper Pueblo und den Untersuchungen zum Eismann wurden im Rahmen der Studie keine Referenzdaten zur Bestimmung der Herkunft der erkannten Zuwanderer erhoben, sondern auf Gesteinsdaten geochemischer Untersuchungen zurückgegriffen (Schweissing/Grupe 2003a). Ziel der Studie war es, Aufschlüsse über die Rolle von Zuwanderungen im spätrömischen Limesgebiet zu bekommen; in einer Zeit, in der schriftliche und archäologische Quellen Angriffe germanischer Stämme auf den Limes und die Rekrutierung germanischer Söldner ins römische Herr belegen und viele Fragen bezüglich der Herausbildung des Stammes der Bajuwaren offen lassen, der, nachdem die Römer die Provinz Rätien im Jahre 488 n. Chr. verlassen hatten, um 551 n. Chr. erstmals in den Schriftquellen erwähnt wird. Beprobte Zahnschmelz und Femurkompakta von 70 Bestattungen des zum Kastell gehörigen Gräberfeldes. Von sieben Individuen wurden Proben mehrerer Zähne untersucht. Je nach Abgrenzungskriterium konnten zwischen einem Drittel und knapp der Hälfte der untersuchten Individuen als Zuwanderer erkannt werden. Eventuell bestehende archäologische Hinweise auf Fremde konnten in jedem Fall auch isotopisch bestätigt werden (Schweissing/Grupe 2003a, 1377). Auch in Bezug auf Alter und Geschlecht der Zuwanderer waren deutliche Tendenzen sichtbar. Fremde Frauen (55,6%) waren häufiger als fremde Männer (36,6%). Mit einer Ausnahme konnten keine subadulten Zuwanderer erkannt werden. Unter den Erwachsenen war die Zuwandererquote für Frauen zwischen 20 und 40 Jahren am höchsten (83,3%) und für Männer des gleichen Alters am niedrigsten (35,3%). Bis auf eine Ausnahme weist der Zahnschmelz aller Zuwanderer auf eine Herkunft aus einer Region mit Granit im Untergrund hin, wie er am nächsten nordöstlich des Fundortes im Bayerischen Wald und in Böhmen vorkommt. Die in dieser Studie erstmals vorliegenden seriellen Analysen mehrerer Zähne eines Gebisses weisen teilweise auf Wanderungen im Kindesalter hin, was mit Familien als mobile Einheiten und mit der Annahme eine Erklärung findet, dass die Väter ins römische Herr rekrutiert wurden und mit ihren Familien umsiedelten (Schweissing/Grupe 2003a).

Ähnlich aufschlussreiche Ergebnisse erbrachte eine Studie zum frühen Neolithikum Südenglands. Am Beispiel von drei juvenilen Individuen und einer erwachsenen Frau aus Monkton-up-Wimbourne (Dorset, England) konnten Hinweise auf eine sehr mobile Lebensweise erbracht werden, die A. Whittles (1999, 63-65) Annahmen aufgrund archäologischer Kriterien unterstützen (Montgomery et al. 2000; Budd et al. 2003).

Ebenfalls der Mobilität im Neolithikum widmet sich die Untersuchung von Knochen aller 67 Individuen, die in der Grabenbefestigung der Siedlung bei Aspern/Schletz in Niederösterreich zu Tage traten. Die Knochen wiesen vielfältige traumatische Veränderungen und Tierverschleiß auf, woraus geschlossen

⁷⁹ Keller 1979; Schweissing 2000; Bürgers et al. 2000; Schweissing/Grupe 2003a.

wurde, dass es sich wohl um eine Dorfbevölkerung handelt, die geschlossen ausgerottet worden ist (Latkoczy et al. 1998; Latkoczy et al. 1999). Im Mittelpunkt der Studie stehen allerdings weniger die auf die archäologische Fragestellung bezogene Auswertung der Daten als vielmehr technische Gesichtspunkte, wie die Probenaufbereitung, spezifische Einstellungen des Messgerätes sowie notwendige rechnerische Korrekturen der Messergebnisse. Von der Arbeitsgruppe an der Abteilung Archäologische Biologie und Anthropologie des Naturhistorischen Museums Wien werden außerdem weitere chemische und histologische Untersuchungen zur Knochenerhaltung an menschlichen Bestattungen von Franzhausen und Gars/Thunau in Niederösterreich durchgeführt (Teschler-Nicola et al. 2000). Strontiumisotopendaten, die aus diesen Studien hervorgingen, sind mir bisher nicht bekannt⁸⁰.

Mobilität im Zusammenhang mit bestimmten archäologischen Phänomenen: Allein aus dem archäologischen Material hat man wiederholt darauf geschlossen, dass Mobilität in bestimmten zeitlichen und kulturellen Zusammenhängen eine große Rolle spielte. So wurden zum einen Wanderungen für das Erscheinen archäologischer Kulturen bzw. das Auftreten neuer Wirtschaftsweisen verantwortlich gemacht. Die Zeiten der Mobilität werden hier als recht kurz angesehen, da es im potentiellen Einwanderungsgebiet gut gesicherte Hinweise auf eine sesshafte Lebensweise in Form von Siedlungen gibt.

Andererseits gibt es archäologische Phänomene, die generell mit einer recht mobilen Lebensweise in Verbindung gebracht werden. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass kaum Siedlungsstellen bekannt sind, und man andere Teile der archäologischen Hinterlassenschaften mit einer recht mobilen Lebensweise assoziiert.

Um festzustellen, welche Rolle Mobilität bzw. Zuwanderungen für die Erklärung des jeweiligen archäologischen Phänomens spielen, ist es nötig, Material von mehreren Fundstellen zu beproben und zu vergleichen. Für eine zuverlässige Auswertung der Daten sind Untersuchungen zum biologisch verfügbaren Strontium sowohl für die Identifikation von Zuwanderern an den Fundstellen selbst als auch für deren regionale Zuweisung im näheren und weiteren Umland unumgänglich.

Bei Studien zur Mobilität im Zusammenhang mit einem bestimmten kulturellen Phänomen geht es nicht um die Bestätigung oder Widerlegung einer Hypothese zur Interaktion zwischen zwei spezifischen Fundorten oder Kleinregionen. Statt dessen können von archäologischer Seite als Herkunftsgebiete allenfalls größere Regionen benannt werden. Deshalb ist für diese Studien eine detaillierte Kenntnis des biologisch verfügbaren Strontiums verschiedener Regionen ausgesprochen wichtig.

Ein Beispiel für ein generell mit Mobilität in Verbindung gebrachtes Phänomen ist die Glockenbecherkultur, deren archäologische Hinterlassenschaften von Gräbern dominiert sind, die z.T. mit Glockenbechern, Bernstein- und Gagatschmuck, frühen Bronze- und Goldobjekten oder Ausrüstungen zum Bogenschießen oder Reiten ausgestattet sind⁸¹. Die Gräber sind unregelmäßig von Skandinavien bis in den Mittelmeerraum und von Irland bis nach Osteuropa verbreitet. Physisch-anthropologische Studien stellten heraus, dass sich viele Glockenbecher-Individuen durch eine brachiocrane Schädelform auszeichnen (Gerhardt 1953; Gerhardt 1976). Aufgrund des weitgehenden Fehlens von Siedlungen und den Hinweisen auf Bogenschießen und Reiterei wurde für die Glockenbecherleute vielfach eine sehr mobile Lebensweise als Händler, Schmiede oder Krieger angenommen (Childe 1950, 130-132; Childe 1957, 222-228). Im Gegensatz dazu steht die Hypothese, dass es sich um Repräsentanten einer spezifischen sozialen Schicht handelt, deren Status sich in den charakteristischen Artefakten widerspiegelt (Engelhardt 1991).

Um dieser Problematik naturwissenschaftlich zu begegnen, wurde zunächst mit Strontiumisotopenanalysen an bayerischem Skelettmaterial begonnen⁸² und dann weitere Proben aus Österreich, der Tschechischen Republik und Ungarn hinzugezogen (Price et al. 2004). Aus Bayern liegen Zahnschmelz- und

⁸⁰ Zu den Studien der Abteilung Archäologische Biologie und Anthropologie des Naturhistorischen Museums Wien vgl. auch: <http://www.nhm-wien.ac.at/NHM/Anthro/tfor.html#stable> (08.12.03).

⁸¹ Sangmeister 1972; Strahm 1995; Lanting/van der Waals 1974; Benz/van Willigen 1998.

⁸² Price et al. 1994b; Grupe 1995; Grupe et al. 1997; Grupe 1998; Price et al. 1998; Horn/Müller-Sohnius 1999; Grupe et al. 1999; Grupe et al. 2001.

Knochenproben von 65 Individuen von insgesamt elf Fundplätzen vor, die bis auf Pommelsbronn im Bereich der Fränkischen Alb im Alpenvorland liegen; ergänzend wurden Zähne und Knochen verschiedener Fundstellen in Niederösterreich, nördlich von Prag in der Tschechischen Republik und in der Donauniederung bei Budapest in Ungarn beprobt. Mit insgesamt 82 untersuchten Individuen steht der Glockenbecherstudie eine der bislang umfangreichsten Probenserien zur Verfügung⁸³.

Besonders die Zahnschmelzwerte zeichnen sich durch eine sehr hohe Variabilität aus. Je nach Abgrenzungskriterium konnten zwischen 17,5 und 61,7% der Individuen als Zuwanderer identifiziert werden⁸⁴. Danach spielte Mobilität in der Glockenbecherkultur eine sehr große Rolle, was besonders deutlich wird, wenn man berücksichtigt, dass mit Hilfe der Strontiumisotopenanalyse immer nur die erste Einwanderergeneration erkannt werden kann, und die meisten untersuchten Fundorte auf tertiären und quartären Sedimenten liegen, für die – nach den Knochenwerten zu urteilen – mit einer ähnlichen Isotopie des biologisch verfügbaren Strontiums zu rechnen ist. Kann dies in Zukunft durch ergänzende Untersuchungen von Faunenresten bestätigt werden, so wären Ortswechsel zwischen den meisten der untersuchten Orte gar nicht nachzuweisen, und Zuwanderer müssten von gänzlich anderen geologischen Einheiten stammen. Daraus ließe sich schließen, dass wahrscheinlich kaum eines der untersuchten Individuen sein ganzes Leben am selben Ort verbracht hat.

Die Auswertung der Zuwandererraten im Hinblick auf das Alter und Geschlecht der Individuen, die Größe der Gräberfelder und die chronologischen Stellung innerhalb der Glockenbecherkultur ergaben keine signifikanten Tendenzen. Die Zahnschmelzwerte, die den Aufenthaltsort der Kindheit widerspiegeln, sind meist ausgesprochen heterogen. Dass die Zuwanderer zu den jeweiligen Orten vorrangig aus einem bestimmten Gebiet kamen, konnte nicht festgestellt werden (Price et al. 2004). Da es bisher noch sehr stark an Grundlageninformationen zum biologisch verfügbaren Strontium der verschiedenen geologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet mangelt, sind konkrete Aussagen zu den Herkunftsorten beim derzeitigen Forschungsstand nicht zu treffen.

Ein Beispiel für Strontiumisotopenanalysen zur Klärung der Frage nach der Zuwanderung einer »kulturtragenden« Bevölkerungsgruppe sind die Strontiumisotopenanalysen an linearbandkeramischen Bestattungen⁸⁵. Ob der Beginn von Ackerbau und Viehzucht mit einer Einwanderung von Menschen verbunden ist, oder ob einheimische, mesolithische Bevölkerungsteile die neue Wirtschaftsweise übernahmen, wird bis in die jüngste Forschungsgeschichte hinein diskutiert⁸⁶. Die bislang vorliegenden Strontiumisotopendaten für Bestattungen aus Flomborn, Mannheim-Schwetzingen, Dillingen, Vaihingen/Enz und Stuttgart-Mühlhausen erbrachten erste naturwissenschaftliche Anhaltspunkte für diese Problematik und vor allem auch Informationen über die Bedeutung von Mobilität in den mittleren und späteren Abschnitten der Linearbandkeramik⁸⁷.

⁸³ Eine Beschreibung der geologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet mit ihren – soweit bekannten – Strontiumisotopenverhältnissen sowie eine Charakteristik der geologischen Verhältnisse im Bereich der einzelnen Fundstellen bietet Price et al. 2004.

⁸⁴ Die 17,5% Zuwanderer beziehen sich nur auf das bayerische Material. Bei Grupe et al. 1997, 520 wurden solche Individuen als Zuwanderer angesprochen, deren Zahnschmelzwert über oder unter dem Mittelwert aus allen Knochenproben aller Fundorte ± 2 Standardabweichungen liegt. Dies ist ein sehr konservatives Kriterium, da Variationen zwischen den Fundorten nicht berücksichtigt werden. Definiert man das biologisch verfügbare Strontium auf die gleiche Weise für jeden Fundort separat, so ergibt sich – die außerbayerischen Fundorte einbezogen – eine Zuwandererquote von 61,7% (Price et al. 2004). Ein weiteres Kriterium zur Erkennung von Zuwanderern ist der Unterschied zwischen Knochen und Zahnschmelz

desselben Individuums von 0,001. Dieses Kriterium erfüllen 23,9% der Knochen-Zahn-Paare (Price et al. 2004). Faunenanalysen zur Definition des biologisch verfügbaren Strontiums der einzelnen Fundorte liegen bisher noch nicht vor.

⁸⁵ Außerdem kann die Untersuchung von künstlich deformierten Schädeln des frühen Mittelalters dieser Gruppe von Fragestellungen zugeordnet werden. Bislang liegen Strontiumisotopendaten für sechs Individuen aus Bayern und sechs aus Viminantium (Belgrad, Serbien) vor. Jeweils ein Individuum konnte als ortsfremd identifiziert und eine Herkunft der bayerischen Individuen aus Südosteuropa bislang jedoch nicht belegt werden (Schweissing 1998; Schweissing/Grupe 2000).

⁸⁶ Zusammenfassend: Lüning 1988; Kind 1998; Price 2001.

⁸⁷ Price et al. 2001; Price/Bentley 2002; Bentley et al. 2003a; Bentley et al. 2003b; Price et al. 2003.

Strontiumisotopenanalyse	Archäologische Analyse
Untersuchung von Knochen und Zähnen = direkte Überreste des Menschen	Untersuchung von materieller Kultur = indirekte Überreste des Menschen
Basiert auf Individuen	Basiert auf Gruppen (nur in Einzelfällen auf Individuen, z.B. Wanderhandwerker, fremde Frauen)
Nur erste Generation sichtbar	Solange sichtbar, wie materielle Kultur tradiert wird (meist über mehrere Generationen; je mehr Generationen, desto deutlicher)
Erkennung abhängig von geologischer Variabilität	Erkennung abhängig von regionaler Variabilität der materiellen Kultur

Tab. 8 Strontiumisotopen- und archäologische Analysen zum Nachweis von Wanderungen im Vergleich.

Die Analysen legen nahe, dass Mobilität über die gesamte Linearbandkeramik hinweg eine bedeutende Rolle spielte. Obwohl bislang nur für Vaihingen/Enz (Baden-Württemberg) Faunenreste zur Bestimmung des lokal biologisch verfügbaren Strontiums analysiert wurden, weisen die Knochendaten für alle Siedlungen auf eine sehr ähnliche lokale Strontiumisotopie hin. Dennoch gibt es an jeder Fundstelle Beispiele für »fremde« Strontiumisotopenverhältnisse des Zahnschmelzes von $>0,71$, die nicht mit einer Zuwanderung von einer anderen auf Löss gelegenen bandkeramischen Fundstelle zu erklären sind. Statt dessen deuten diese Daten auf Lokalitäten mit Grundgebirge wie Granit oder Gneis im Untergrund, wie sie in den Mittelgebirgen (Schwarzwald, Vogesen, Odenwald, Bayerischer Wald) vorkommen, wo jedoch bislang keine bandkeramischen Siedlungen archäologisch belegt sind. Bentley et al. (2002; 2003a; 2003b) ziehen deshalb in Betracht, dass sich darin die Eingliederung einer mesolithischen Restbevölkerung aus den Mittelgebirgslandschaften in die bandkeramischen Siedlungen im Flachland widerspiegeln. Weiterhin konnten Zusammenhänge zwischen fremden Strontiumisotopenverhältnissen und dem Geschlecht sowie der Beigabe von Schuhleistenkeilen und der Ausrichtungen der Bestattungen beobachtet werden.

Archäologische und naturwissenschaftliche Aussagemöglichkeiten: Ein Vergleich

Im vorausgehenden Kapitel wurden die Möglichkeiten erörtert, Mobilität in sesshaften Gesellschaften sowohl anhand archäologischer Kriterien als auch von Strontiumisotopenanalysen zu erkennen. Für letztere wurde außerdem diskutiert, inwieweit sie Aussagen zu verschiedenen Wanderungsformen treffen können, sowie ein Überblick über bisher erfolgte Studien gegeben, die das breite Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten verdeutlichen. Um diese Ausführungen zusammenzufassen, sollen nun anhand einiger Punkte die jeweiligen Grundlagen und Aussagemöglichkeiten von Strontiumisotopen- und archäologischen Analysen verglichen werden (Tab. 8).

Ein grundlegender Unterschied zwischen naturwissenschaftlichen und archäologischen Untersuchungen besteht darin, dass den Naturwissenschaften mit Knochen und Zähnen direkte Überreste der Menschen zur Verfügung stehen. Die Aussagen zur Mobilität basieren daher zunächst auf den untersuchten Einzelindividuen. Mit der materiellen Kultur stehen der archäologischen Analyse indirekte Überreste des Menschen zur Verfügung. Die Funde und Befunde sind in der Regel nicht untrennbar mit ihren jeweiligen Herstellern oder Besitzern verbunden. Es muss daher zunächst geprüft werden, ob sie für eine Gruppe oder für Einzelindividuen repräsentativ sind.

Das grundsätzliche Problem auf archäologischen Kriterien basierender Aussagen über Wanderungen liegt daher darin, dass Artefakte auch unabhängig von Umsiedlungen ihrer Hersteller oder Besitzer, z. B. aufgrund von Handel, Raub, Ideenübernahme etc., verbreitet werden können, und es damit meist neben

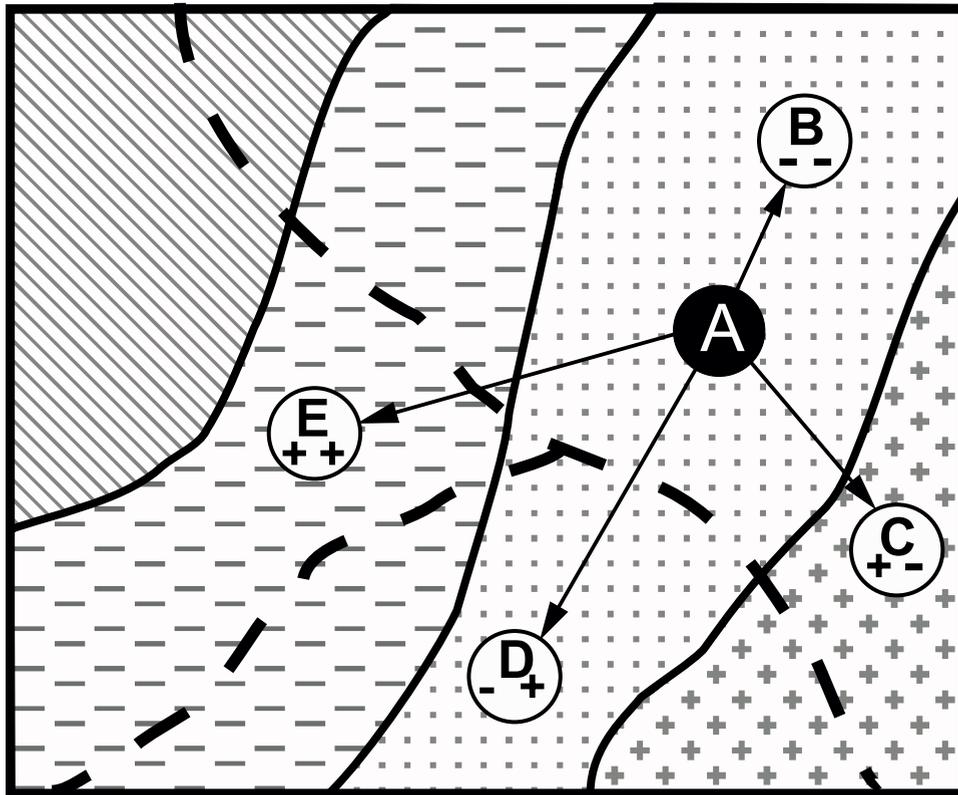


Abb. 21 Möglichkeiten der Feststellung von Ortswechslern aufgrund archäologischer und naturwissenschaftlicher Kriterien. Die vier mit verschiedenen Signaturen ausgefüllten Gebiete stehen für Strontiumisotopenprovinzen. Die gestrichelten schwarzen Linien trennen drei Gebiete mit unterschiedlichem kulturellem Habitus. A steht für einen potentiellen Ausgangsort von Wanderungen. Die Kreise B bis E sind Zielorte. Das erste Symbol kennzeichnet die Möglichkeit der Feststellung eines Ortswechsels aufgrund von Strontiumisotopenanalysen, das zweite aufgrund archäologischer Kriterien: + = (potentiell) erkennbar; - = nicht erkennbar.

Wanderungen alternative Erklärungen für Kulturwandel oder Artefakte außerhalb ihres Hauptverbreitungsgebietes gibt. Von nicht mehr ablegbaren Schmuckstücken abgesehen, die Aussagen über Mobilität von Einzelindividuen erlauben können (Jockenhövel 1991), werden archäologische Aussagen zu Wanderungen meist auf Gruppenebene getroffen. Je mehr Leute unterwegs sind und an ihrem kulturellen Habitus festhalten, desto größer ist die Chance der Manifestation und des Auffindens in den archäologischen Hinterlassenschaften.

Mit Hilfe von Strontiumisotopenanalysen sind immer nur die Einwanderer der ersten Generation sichtbar. Schon ihre unmittelbaren Nachkommen erscheinen im Zielgebiet, aus dem sie während des Zahnbildungszeitraums ihre Nahrung beziehen, als Einheimische. Anhand ihres kulturellen Habitus können Zuwanderer dagegen über mehrere Generationen erkennbar sein. Je länger fremde kulturelle Elemente tradiert werden, desto besser sind diese Hinweise auf Wanderungen in den archäologischen Hinterlassenschaften erkennbar.

Als ein letzter Punkt sei noch darauf verwiesen, dass die naturwissenschaftlichen und archäologischen Möglichkeiten, Wanderungen zu erkennen, auf sehr unterschiedlichen Grundlagen beruhen, und Ortswechsel sich daher nicht immer auf beiden Wegen manifestieren können. Ob ein Ortswechsel mit Hilfe von Strontiumisotopenuntersuchungen erkennbar ist, hängt davon ab, ob das betreffende Individuum die Grenzen der Strontiumisotopenprovinz des Herkunftsortes überschreitet. In Veränderungen der

materiellen Kultur werden sich Umsiedlungen ebenfalls nicht niederschlagen, wenn sich der kulturelle Habitus zwischen Ausgangs- und Zielort der Wanderung nicht unterscheidet. Bei einer Beurteilung von Wanderungen und ihren Auswirkungen auf die materielle Kultur muss beachtet werden, dass Strontiumisotopenprovinzen und Verbreitungsgebiete materieller Kultur nicht deckungsgleich sein müssen. Dies soll anhand von Abb. 21 erläutert werden.

Ein Ortswechsel von A nach B wäre weder anhand der materiellen Kultur noch von Strontiumisotopenverhältnissen erkennbar, da sich beide Orte in diesen Kriterien nicht unterscheiden. Eine Umsiedlung von A nach C wäre in den Strontiumisotopenverhältnissen sichtbar, da der Zielort C jenseits der Grenze zur nächsten Strontiumisotopenprovinz liegt. Ein Zuwanderer an den Ort D könnte z.B. anhand seiner Grabausstattung als Fremder auffallen. Obwohl die Distanz zwischen A und D größer als zwischen A und C ist, wäre ein von A kommendes Individuum am Zielort D nicht mit Hilfe von Strontiumisotopenanalysen als Zuwanderer zu erkennen. Bei einem Ortswechsel von A nach E wird die Grenze einer Strontiumisotopenprovinz überschritten. Ebenso gibt es Unterschiede zwischen beiden Orten in der materiellen Kultur. Sind letztere im Zusammenhang mit dem untersuchten Individuum sichtbar, so kann das potentielle Herkunftsgebiet innerhalb der Strontiumisotopenprovinz weiter eingegrenzt werden. Außerdem sind Aussagen über Auswirkungen von Wanderungen auf die materielle Kultur möglich. Damit besteht anhand von Strontiumisotopenanalysen eine Möglichkeit zu prüfen, inwieweit Wanderungen sich in der materiellen Kultur manifestieren.

Regelhafte Mobilität in nicht oder teilweise nicht sesshaften Gemeinschaften

In nicht oder teilweise nicht sesshaften Gemeinschaften ist räumliche Mobilität regelhafter Bestandteil des Lebens und keineswegs ein außergewöhnliches Ereignis. Das Leben wird teilweise oder vollständig ohne festen Wohnsitz verbracht. Die Aufenthaltszeit an bestimmten Orten ist begrenzt, und man weiß meist schon bei der Ankunft an einem Ort, wie lange man sich dort aufhalten wird.

In den meisten Fällen wird regelhafte Mobilität des Menschen durch regelhafte Mobilität von Tieren bestimmt, sei es, dass er ihnen als Jäger und Sammler auf natürlichen saisonalen Gebietswechseln folgt oder er seine Haustiere regelmäßig auf räumlich getrennt liegende Weiden treibt, wie das bei den verschiedenen Formen des Pastoralismus der Fall ist. Andere Formen von regelhafter Mobilität kann man sich auch unabhängig von Tierherden vorstellen. Darunter zählen z.B. die Auszüge von Wanderhandwerkern oder Händlern.

Mobilität in Jäger- und Sammlergesellschaften

Der Mensch verbrachte den größten Teil seiner Geschichte als Jäger und Sammler. Deshalb spielt die Erforschung dieser Lebens- und Wirtschaftsweise in der Archäologie aller besiedelten Erdteile eine bedeutende Rolle. Da man regelmäßige Formen von Mobilität in der *New Archaeology* als Prozesse und nicht als Ereignisse auffasste, widmete ihr auch die anglophone Forschung Aufmerksamkeit, als sie sich kaum mit Mobilität in sesshaften Gesellschaften beschäftigte. Wie die Wanderungen allerdings genau organisiert waren, wurde auch hier kaum thematisiert (Anthony 1997, 21; Champion 1990, 215). Bevor auf die Möglichkeiten der Strontiumisotopenforschung im Zusammenhang mit regelhafter Mobilität eingegangen wird, sollen zunächst einige auf archäologischen bzw. archäozoologischen Kriterien basierende Überlegungen zur Mobilität in Jäger- und Sammlergesellschaften vorgestellt werden.

Für eine aneignende Wirtschaftsweise spricht, dass die Faunen- und Florenreste ausschließlich von erlegten Wildtieren und gesammelten Pflanzen stammen, und es keine Hinweise auf die Haltung von Haustieren oder den gezielten Anbau von kultivierten Pflanzen gibt. In Jäger- und Sammlergesellschaften ist Mobilität Grundlage der Existenzsicherung. Da die Nahrung nicht durch die Gruppen selbst an einer bestimmten Stelle produziert wird, müssen sie sich wegbewegen, um neue Nahrungsquellen zu erschließen, wenn die natürlich vorhandenen Ressourcen am Aufenthaltsort erschöpft sind.

In den archäologischen Hinterlassenschaften gibt es verschiedene Hinweise darauf, dass Menschen als Jäger und Sammler in einer relativ mobilen Lebensweise lebten, und teilweise sogar eine Einschätzung der Mobilitätsradien erlauben. Wichtige Hinweise können aus der Untersuchung von Behausungsresten gewonnen werden. Überreste von nur kurzzeitig bewohnten Lagern unterscheiden sich deutlich von denen fester, dauerhaft bewohnter Siedlungen. Während sich letztere durch mehrere Jahre überdauernde Bauten aus Holz, Lehm oder Stein auszeichnen, sind Behausungsreste der Jäger- und Sammlerlager meist sehr spärlich und lassen allenfalls auf zelt- oder hüttenartige Strukturen schließen⁸⁸.

Davon ausgehend, dass die dem außerhalb der Tropen lebenden Menschen als Nahrung dienenden Tiere und Pflanzen einem saisonalen Rhythmus unterliegen und nicht das ganze Jahr überall gleichermaßen verfügbar sind, ist auch für den Menschen, der diese Ressourcen nutzt, eine saisonale Mobilität anzunehmen (Hahn 1983b, 387). In diesem Zusammenhang nimmt die Bestimmung der Jahreszeit, in der die Lagerplätze aufgesucht wurden, eine wichtige Position ein. Zunächst bedarf es einer Einschätzung, ob ein Überleben in einer Region überhaupt das ganze Jahr über möglich, oder ob der Mensch nicht schon allein aus klimatischen Gründen gezwungen war, diese zeitweise zu verlassen. So betont z. B. J. Hahn für die in die letzte Kaltzeit datierenden Fundstellen des Aurignacien und Gravettien auf der Schwäbischen Alb, dass das oberhalb der Baumgrenze liegende Gebiet im Winter selbst in geschützten Tälern nicht ausreichend Nahrung für Großwild bot. Es sei daher zu überlegen, ob es nicht unumgänglich war, im Winter – den Tieren folgend – ins Flachland zu ziehen (Hahn 1983a, 326).

Hinweise auf eine jahreszeitliche Zuordnung der Fundstellen lassen sich vor allem aus Faunen- und Florenresten gewinnen. So können z. B. bei der Untersuchung von Rentieren der Eruptionstatus der Zähne, nicht abgeworfenes Geweih oder Anzeichen für ungeborene Jungtiere Hinweise auf die Jahreszeit geben, in der die Tiere getötet wurden. Obwohl in diesem Bereich noch Grundlagenforschung nötig ist, scheint gerade die Untersuchung von Zuwachslinien des Zahnzements, der die Zahnwurzeln umgibt und einem ständigen Dickenwachstum unterliegt, vielversprechend⁸⁹. So konnte z. B. für archäologische Fundplätze, an denen Rentierzähne offensichtlich als Schlachtabfälle zurückbleiben, die Jahreszeit, zu der die Plätze aufgesucht wurden, bestimmt werden⁹⁰. Auch aus anderen tierischen Überresten, wie z. B. Eiern oder botanischen Makroresten wie Haselnusschalen, können jahreszeitliche Hinweise gewonnen werden⁹¹.

Bereits die Aussage, dass an einem Fundplatz nur Hinweise auf eine Begehung zu einer bestimmten Jahreszeit und nicht auf ganzjährige Besiedlung zu finden sind, impliziert kurzzeitige Aufenthalte und damit menschliche Mobilität. Aus fundplatzübergreifenden Analysen solcher saisonalen Daten sowie osteometrischen Studien wurden z. B. Rückschlüsse auf die Lebensweise von Rentierjägern im Magdalénien Deutschlands und Frankreichs gezogen. Aus diesen Daten wurde versucht, die Wanderrouten von Rentieren nachzuvollziehen, und es wurden Hypothesen aufgestellt, inwieweit bestimmte Menschengruppen den Herden folgten und sich damit zu verschiedenen Jahreszeiten in verschiedenen Gebieten aufhielten (Gordon 1988; Weinstock 2000, 110-115).

In Bezug auf die Mobilität und das Siedlungsverhalten jungpaläolithischer Jäger wurden weiterhin die Größe von Fundplätzen und Steingeräteinventaren, die Herkunft der verwendeten Rohmaterialien sowie künstlerische Äußerungen analysiert und ethno-archäologische Untersuchungen rezenter Jäger- und Sammler zum Vergleich herangezogen⁹².

Strontiumisotopenanalysen wurden bisher außer in einer Studie zur Nahrungsgrundlage von Australopithecinen (Sillen et al. 1995; Sillen et al. 1998) im Zusammenhang mit der Erforschung der aneignenden

⁸⁸ Zusammenfassend zu Haus- und Siedlungsformen in der Ur- und Frühgeschichte: Kuckenburger 2000.

⁸⁹ Die Anlagerungen im Bereich des Zahnzements erfolgen nicht kontinuierlich. Viel mehr können – ähnlich wie bei Baumringen – dünne, dunkle, im Winter abgelagerte Bereiche von breiteren, hellen bis durchsichtigen der warmen Jahreszeit unterschieden werden. Je nach dem, welcher Bereich einer solchen Sequenz den äußeren Abschluß des

Zahnzements bildet, kann bestimmt werden, in welcher Jahreszeit das Tier zu Tode kam.

⁹⁰ Gordon 1988, 19-29; Weinstock 2000, 111 mit weiterer Literatur.

⁹¹ Z. B. Hahn 1983b, 385. Abb. 232; Jochim 1993, 138-139.

⁹² Weniger 1981; Weniger 1982; Weniger 1987; Weniger 1989; Weniger 1991; Gordon 1988; zusammenfassend: Kuckenburger 2000, 37-50.

PASTORALISMUS (= Haltung von Gras- und Laubfressern)				
MOBILITÄT				
Stallhaltung	Transhumanz	Semi-sesshafter Pastoralismus	Halbnomadismus	Vollnomadismus
Sesshaftigkeit. Keine regelhafte Mobilität. Ackerbau und Viehzucht.	Regelhafte Mobilität von Hirten. Großteil der Gemeinschaft ist sesshaft und betreibt Ackerbau.	Einzelne mobile Hirtengruppen oder -familien. Ackerbau und Sesshaftigkeit sind Subsistenzgrundlage.	Zeitweise Mobilität der ganzen Gruppe oder ganzjährige Mobilität eines Teiles der Gruppe. Viehzucht und Ackerbau.	Ganzjährige Mobilität der gesamten Gruppe. Kein Ackerbau.

Tab. 9 Formen pastoraler Wirtschaftsweise.

Wirtschaftsweise noch nicht angewendet. Trotzdem haben sie das Potential, wertvolle Zusatzinformationen sowohl zu den Mobilitätsradien von potentiellen Beutetieren als auch des Menschen selbst zu geben. Darauf wird zusammenfassend mit den im folgenden beschriebenen Mobilitätsformen von pastoralen Gesellschaften zurückzukommen sein (s. S. 660ff.). Einschränkend wirkt – besonders für das mitteleuropäische Paläolithikum – die Tatsache, dass menschliche Überreste mit beprobaren Zähnen nur selten Teil der archäologischen Hinterlassenschaften sind.

Pastoralismus

Mit dem Aufkommen der Viehzucht entstehen weitere, regelhafte Formen von Mobilität, die im wesentlichen darin bestehen, dass der Mensch Herden von Haustieren bei ihrem Wechsel zwischen verschiedenen Weidegebieten begleitet.

Formen pastoraler Wirtschaftsweise

Weidewechsel und damit Mobilität spielen in Wirtschaftsformen, die ganz oder teilweise auf der Haustierhaltung basieren und unter dem Begriff des »Pastoralismus« subsumiert werden, eine bedeutende Rolle. Die Haustierherden werden als Besitz gehalten und bilden die Lebensgrundlage ihrer Besitzer – oder zumindest einen beträchtlichen Teil davon⁹³. Pastorale Wirtschaftsweisen können nach sehr verschiedenen Kriterien klassifiziert werden (Khazanov 1984, 18). In Bezug auf Mobilität reichen die Varianten von der kompletten Sesshaftigkeit bis zur ganzjährigen Mobilität ohne festen Wohnsitz⁹⁴. Dazwischen gibt es verschiedene Varianten mit teilweise graduellen Übergängen (Tab. 9).

Nomadismus: Obwohl gelegentlich auch Jäger und Sammler als Nomaden bezeichnet wurden⁹⁵, meint Nomadismus in der Regel eine extensive, mobile Tierzucht, bei der das Vieh das ganze Jahr über frei grasend ohne Stall gehalten wird. Die Wirtschaftsweise ist durch eine periodische Mobilität gekennzeichnet, die innerhalb einzelner oder zwischen verschiedenen Weidegebieten stattfindet, und an der sich die gesamte Gesellschaft oder zumindest die Mehrzahl ihrer Mitglieder beteiligt. Ackerbau und andere wirtschaftliche Aktivitäten werden nicht betrieben oder spielen nur eine sehr untergeordnete Rolle. Die Produktion orientiert sich am Eigenbedarf und ist nicht auf Verkauf ausgerichtet⁹⁶.

⁹³ Meadow 1996, 392, 402; Levy 1992, 66; Bar-Yosef/Khazanov 1992b, 2

⁹⁴ Meadow 1996, 402; Bar-Yosef/Khazanov 1992a; Bar-Yosef/Khazanov 1992b, 2-3.

⁹⁵ Vgl. Khazanov 1984, 15 mit weiterer Literatur; Kent 1989.

⁹⁶ Dazu: Khazanov 1984, 15-16, 17 – vgl. Klengel 1972, 11; Herzog 1982, 276; Bar-Yosef/Khazanov 1992b, 2; Scholz 1994, 72.

Rezenter und historischer Nomadismus kann nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden, so nach Art des Herdenviehs (Kamele, Dromedare, Pferde, Rinder, Yaks, Schafe, Ziegen), den Wanderungen (vertikal, horizontal; fern- und nahwandernd; episodisch, periodisch bzw. saisonal; gerichtet, ungerichtet), nach den Behausungen (verschiedene Zeltformen, Jurten, Schutzschirme, Felsnischen, Höhlen, schirmförmige Bäume), nach der Organisation (Stamm, Teilstamm, Gruppe, Groß- oder Kernfamilie, Zweckverband), nach der politischen Struktur oder der Vielfalt der materiellen Kultur (Scholz 1994, 72). Nomadismus gibt es heute in Zentral- und Südasien, auf der arabischen Halbinsel sowie in der nördlichen Hälfte Afrikas (Scholz 1994, 72-73)⁹⁷.

In Bezug auf das Betreiben von Ackerbau und Mobilität kann man zwischen Voll- und Halbnomadismus unterscheiden. Die Tierhaltung ist die ausschließliche Subsistenzgrundlage des Vollnomadismus. Ackerbau wird nicht betrieben. Das Vieh wird das ganze Jahr über auf saisonal wechselnden Weiden gehalten und von seinen Besitzern einschließlich ihrer Familien, die keine festen Wohnsitze haben, begleitet⁹⁸.

Demgegenüber wird beim Halbnomadismus ganzjährig oder für einen Teil des Jahres extensive Weidewirtschaft mit periodischen Weidewechseln betrieben. Obwohl diese die wichtigste Lebensgrundlage bildet, kommen Ackerbau und andere Tätigkeiten wie Handel und Transport als Ergänzung hinzu (Khazanov 1984, 19; Scholz 1994, 72). A. W. Khazanov unterscheidet zwei Formen von Halbnomadismus. Bei der ersten betreiben alle Mitglieder der Gruppe sowohl Weidewirtschaft als auch Ackerbau. Bei der zweiten widmet sich ein Teil der Gruppe ausschließlich oder vorwiegend der Weidewirtschaft, während ein anderer ausschließlich oder vorwiegend Ackerbau betreibt (Khazanov 1984, 20).

Von überwiegend sesshaften Gesellschaften geht eine Vielzahl unterschiedlicher Wirtschaftsformen aus, die sich graduell zumeist durch die Entfernung der Weiden oder die Betreiber der Weidewirtschaft unterscheiden. Sie sind mit Begriffen wie »Halb-sesshafter Pastoralismus« (engl. *semi-sedentary pastoralism*), »Hirtentum« (engl. *Herdsman husbandry or distant-pastures husbandry*), »Transhumanz« (engl. *Transhumance*) bzw. meist in der gleichen Bedeutung »*Yaylag pastoralism*« sowie »Triftwirtschaft« belegt.

Die Subsistenzgrundlage bei halb-sesshaftem Pastoralismus bildet der Ackerbau. Während die meisten Menschen dieses Wirtschaftssystems ganzjährig in festen Siedlungen leben, gibt es einzelne Hirtengruppen oder -familien, die mit ihren Herden saisonale Ortswechsel vollziehen. Im Vergleich zum Halbnomadismus sind diese Wanderungen – sowohl nach Distanz als auch nach Dauer – kürzer. Außerdem ist diese Wirtschaftsweise nicht völlig extensiv, denn es kommt gelegentlich zur Bevorratung von Tierfutter (Khazanov 1984, 21).

Sowohl für das Hirtentum als auch für den Yaylag-Pastoralismus findet man in der Literatur den Begriff »Transhumanz«. Transhumanz bedeutet, dass die Mehrzahl einer Gruppe ganzjährig sesshaft lebt und Ackerbau betreibt, während ein kleiner Teil der Gesellschaft als spezialisierte Hirten das Vieh betreut und mobil lebt, was eine optimale Futtermittellieferung für die Tiere gewährleistet. Die Hirten sind dabei in der Regel nicht die Eigentümer des Viehs⁹⁹.

Unter dem Überbegriff der Transhumanz kann man zwischen drei Formen unterscheiden: Beim Hirtentum (engl. *Herdsman husbandry or distant-pastures husbandry*) werden die Herden ganzjährig auf Weiden gehalten, die von den Siedlungen weit entfernt liegen. Die Tiere kehren weder über Nacht noch regelmäßig zu bestimmten Jahreszeiten in die Nähe der Siedlungen zurück (Khazanov 1984, 22; Karmyčeva 1981, 93).

Davon unterscheidet sich der *Yaylag-Pastoralismus*, der oft als »eigentliche Transhumanz« bezeichnet wird, weil die Tiere regelmäßig zu bestimmten Jahreszeiten von der Siedlung weg, in höhere Bergregionen getrieben werden, während zu anderen Jahreszeiten Weideflächen im Tal bzw. in Siedlungsnähe genutzt werden¹⁰⁰.

⁹⁷ Einen Überblick über die Verbreitung und regionalen Differenzen rezenten und subrezenten Nomadismus bietet Scholz 1995, 67-111.

⁹⁸ Khazanov 1984, 19; Bar-Yosef/Khazanov 1992b, 2; Scholz 1994, 72; Karmyčeva 1981, 93.

⁹⁹ Khazanov 1984, 16, 22; Karmyčeva 1981, 93; Benecke 1994, 168; Walker 1983, 37; Geddes 1983, 51.

¹⁰⁰ Khazanov 1984, 23; Karmyčeva 1981, 93; Chang 1993, 687; Scholz 1994, 72.

Das wohl bekannteste Beispiel für diese Form der Transhumanz ist die Almwirtschaft in den Alpen. Hier werden Schafe und Rinder in den Sommermonaten auf Weiden in höheren Lagen des Gebirges getrieben, während sie die Winter in den Tälern verbringen (Benecke 1994, 168). Ähnliches kennt man noch heute in Spanien, wo Schafe von den Sommerweiden in Kastilien im Winter nach Südwestspanien gebracht werden (Walker 1983, 37).

Als dritte Form der Transhumanz kann man die sog. »Triftwirtschaft« bezeichnen. Hier wird das Vieh ganzjährig auf Weiden in Siedlungsnähe gehalten und über Nacht in die Siedlungen getrieben. Teilweise erfolgt auch Vorratshaltung von Futter und Zufütterung (Karmyčeva 1981, 93).

Eine letzte Form des Pastoralismus ist die Stallhaltung von Tieren. Dabei wird das Vieh ganzjährig in Dörfern bzw. Städten gehalten, ist ortsfest untergebracht und erhält regelmäßig vorher aufbereitetes Futter. Die Menschen betreiben neben der Viehzucht Ackerbau und verbringen das ganze Jahr in festen Siedlungen. Es gibt keine regelhaften Formen von Mobilität (Karmyčeva 1981, 93).

Pastoralismus in der ur- und frühgeschichtlichen Forschung

Archäologisches Interesse an auf Viehzucht beruhenden Wirtschaftsformen erwachte mit der Frage nach dem Beginn der Domestikation. Dabei stand im Zentrum, ob sie auf Jäger und Sammler oder auf Ackerbauern zurückgeht. Diesbezügliche Überlegungen begannen in den 1930er Jahren (Koppers 1932) und wurden besonders seit den 1950er Jahren, als zunehmend Material aus gut dokumentierten Ausgrabungen zur Verfügung stand, vorangetrieben (vgl. Bar-Yosef/Khazanov 1992b, 3-4). Besonderes Interesse an der Tierzucht und der damit verbundenen Wirtschafts- und Lebensweise zeigte A. Sherratt mit seinem Postulat der *Secondary Products Revolution*¹⁰¹. Sherratt trug Hinweise darauf zusammen, dass ab dem 4. Jt. v. Chr. Haustiere nicht mehr nur zur Nahrungsgewinnung dienten, sondern auch vor den Pflug gespannt oder als Transporttiere eingesetzt wurden, dass man nicht mehr nur das Fleisch, sondern auch Milch und Wolle nutzte. In diesem Zusammenhang spielten verschiedene Tierhaltungsformen und damit auch der Pastoralismus eine große Rolle.

Die heutige Forschung geht sehr kritisch und vorsichtig mit Aussagen zu pastoralen Lebensweisen und damit verbundener Mobilität um und erkennt die vielfältigen Schwierigkeiten, die mit ihrem Nachweis auf der Grundlage von archäologischen Quellen verbunden sind. Ein wichtiges Hilfsmittel sind Analogien, die aus ethnographischen Studien gewonnen werden (Chang 1993). Aus ihnen entwickelt man Modelle, die anhand von Material aus sorgfältig durchgeführten und gut dokumentierten Ausgrabungen, bei denen besonders auch kleine Reste von Flora und Fauna Beachtung finden, getestet werden sollen (Bar-Yosef/Khazanov 1992b, 6). Außerdem gewinnen großräumige Surveys an Bedeutung, die der Erforschung der ökologischen Bedingungen der Landschaft und dem Erkennen von kleineren Fundplätzen dienen, die Überreste kurzzeitiger Lagerplätze sein könnten (Levy 1992; Gilead 1992; Haiman 1992).

Als problematisch erweist sich immer wieder, dass die verschiedenen Arten von Pastoralismus quellenbedingt in den archäologischen Hinterlassenschaften kaum zu unterscheiden sind. Neben der Problematik, nur kurzzeitig aufgesuchte Plätze heute überhaupt noch in der Landschaft auszumachen (Gilbert 1983, 107), ist die Verbindung zwischen festen Siedlungen und Hirtenlagern derselben Gruppe kaum mehr zu erkennen bzw. auszuschließen (Bar-Yosef/Khazanov 1992b, 3; Walker 1983, 37).

Mit den Ursprüngen des Nomadismus setzte man sich seit den 1960er Jahren von archäologischen und historischen Überlieferungen ausgehend auseinander. Dabei spielt die historische Dimension seiner Herausbildung eine besondere Rolle, während Überlegungen zur pastoralen Wirtschaftsweise selbst, d.h. zum Ablauf der Weidewechsel, zur Gruppenorganisation u. ä., deutlich dahinter zurücktreten (Dittmer 1965; Jettmar 1966; Brentjes 1981).

Einen Forschungsschwerpunkt in Bezug auf nomadische bzw. pastorale Lebensweisen bilden die Osteuropäischen Steppen (Shilov 1989). Hier wird bereits für das Neolithikum und die Bronzezeit – für die Träger der sog. Grubengrab- und Kurgankultur – eine sehr mobile Lebensweise angenommen, die auch,

¹⁰¹ Sherratt 1981; Sherratt 1983; kritisch dazu: Vosteen 1996.

wie vor allem M. Gimbutas betonte, starken Einfluss auf Mitteleuropa ausgeübt haben soll (Gimbutas 1994; Gimbutas 1997; Häusler 1996). Im selben Gebiet treten in späteren Zeiten antike schriftliche Quellen, die Völker wie die Kimmerier oder Skythen erwähnen, oder früh- und hochmittelalterliche, in denen verschiedene Reitervölker dargestellt werden, neben die archäologischen Hinterlassenschaften (vgl. Rolle et al. 1991; Davis-Kimball et al. 1995). Wohl oft sehr stark von diesen Quellen beeinflusst, setzt man meist eine mobile Wirtschaftsweise voraus, ohne sie explizit aus den materiellen Hinterlassenschaften abzuleiten.

Diesbezüglich ist eine Arbeit R. J. Bradleys im nördlichen Sudan als vorbildlich einzustufen. Sie versucht, zunächst anhand rezenter Materials Unterschiede zwischen nomadisierenden und sesshaften Gruppen in den Siedlungshinterlassenschaften und der materiellen Kultur herauszuarbeiten und wendet die daraus abgeleiteten Erkenntnisse für eine Interpretation archäologischer Hinterlassenschaften an (Bradley 1992). Ebenso ist eine Arbeit von R. Cribb hervorzuheben, der sich zum einen allgemein mit Nomadismus und den materiellen Spuren, die er in der Landschaft hinterlassen kann, auseinandersetzt, und zum anderen besondere Betonung auf die Erforschung dieser Wirtschaftsweise im Bereich des Taurus und Zagros-Gebirges legt (Cribb 1991).

Archäologische Auseinandersetzungen mit Transhumanz sind besonders seit den 1980er Jahren zu verzeichnen. Vor allem sind hier ein diesem Thema gewidmeter Band der Zeitschrift *World Archaeology* (1983) mit dem Titel »*Transhumance and Pastoralism*« und ein Sammelband zum Thema Pastoralismus in der Levante (Bar-Yosef/Khazanov 1992a) zu nennen.

Als archäologische Hinweise auf Hirten, die mit ihren Herden ein sehr mobiles Leben führen, gelten vor allem kleine Fundplätze, die nur aus einer Feuerstelle und wenigen Artefakten bestehen. Handelt es sich bei der Wirtschaftsweise um Transhumanz und nicht um Nomadismus, so müssen auch gleichzeitige größere Fundplätze existieren, die von sesshaften Bevölkerungsteilen bewohnt wurden. Besonders gut sind diese Zusammenhänge für die Negev-Wüste in Süd-Israel erforscht¹⁰². Ähnliche Siedlungsmuster konnten A. S. Gilbert (1983) für den westlichen Iran, A. Close (1990) für die östliche Sahara und P. T. Robertshaw und D. P. Collett (1983) für Ostafrika feststellen.

Hinweise auf das Aufsuchen verschiedener Fundplatztypen durch dieselben Gruppen können Analysen der beweglichen materiellen Hinterlassenschaften bieten. So betont D. S. Geddes, dass ähnliche Spektren von Steinartefakten mit ähnlichen technologischen Merkmalen an verschiedenen Plätzen Hinweise auf transhumante Bevölkerungsteile geben könnten (Geddes 1983, 57). Auf eine Dominanz von Tierhaltung an bestimmten Fundplätzen kann außerdem geschlossen werden, wenn Werkzeuge, die mit der Verarbeitung von pflanzlichen Materialien, wie Reibsteine oder Geräte mit Sichelglanz, an der Fundstelle fehlen (Gilbert 1983, 109), oder das Gebiet aufgrund seiner Bodeneigenschaften oder Reliefform nicht für eine ackerbauliche Nutzung geeignet ist (Robertshaw/Collett 1983).

Forschungsbeitrag der Strontiumisotopenanalyse

Mit Hilfe von Strontiumisotopenanalysen können mehrmalige Wechsel des Aufenthaltsortes des Menschen mit zufriedenstellender Sicherheit nur bis zum Abschluss des Zahnwachstums, d.h. bis zum Ende des zwölften bzw. vierzehnten Lebensjahres, nachgewiesen werden. Im Zusammenhang mit Hinweisen auf eine sesshafte Lebensweise wurde oben (s. S. 639ff.) bereits eine Beprobungsweise angesprochen, die ebenso auf regelhafte Ortswechsel hinweisen kann. Sie besteht darin, dass man entweder mehrere Proben eines Zahnes oder Proben mehrere Zähne, die unterschiedliche Bildungszeiträume widerspiegeln, untersucht. Im Gegensatz zu den für eine sesshafte Lebensweise sprechenden konstanten Werten würde man bei häufig stattfindenden Ortswechseln deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Bildungszeitpunkte repräsentierenden Proben erwarten. Messergebnisse wie in Abb. 22 mit deutlichen Unterschieden zwischen verschiedenen Zähnen und Bereichen innerhalb eines Zahnes würden für häufige Mobilität im Kindesalter sprechen.

¹⁰² Levy 1983; Gilead 1992; Haiman 1992; Cohen 1992.

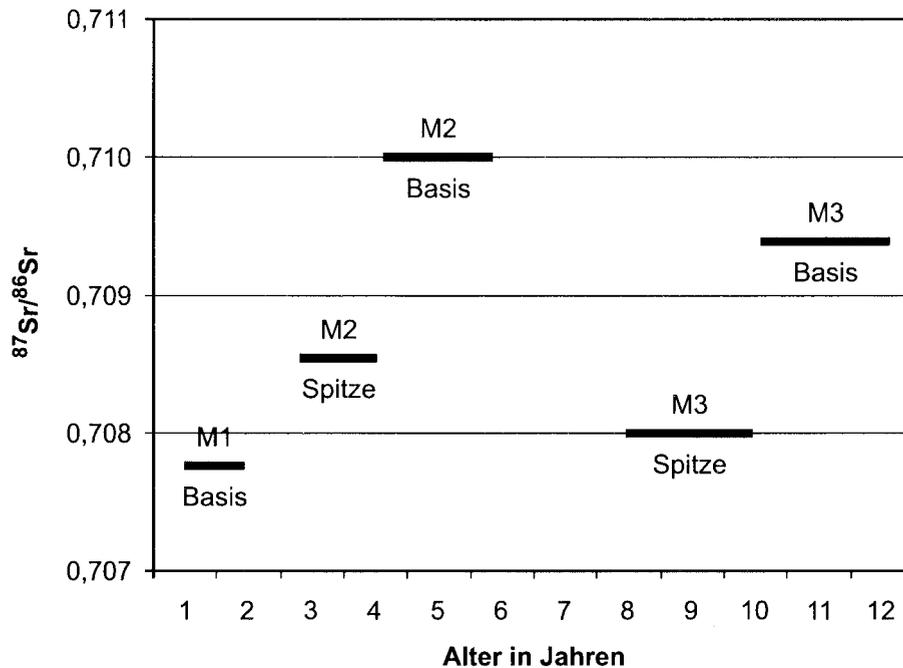


Abb. 22 Potentielle Strontiumisotopenverhältnisse verschiedener Bereiche der Dauermolaren eines erwachsenen Individuums. Die Unterschiede zwischen den Strontiumisotopenverhältnissen des zu verschiedenen Zeitpunkten gebildeten Schmelzes würden auf häufige Ortswechsel hinweisen.

Bei der Interpretation von Zahndaten ist immer zu beachten, welchen Zeitraum sie im Leben des beprobten Individuums widerspiegeln. Werden die Beprobungsbereiche zu groß gewählt, besteht die Gefahr, dass in dem durch diesen Zahnschmelz repräsentierten Zeitraum mehrere Ortswechsel stattfanden, die dann nicht mehr erkennbar wären. Deshalb empfiehlt es sich, zur Bearbeitung von Fragestellungen nach regelhafter bzw. saisonaler Mobilität mit möglichst geringen Probenmengen zu arbeiten und zusätzlich Daten zu erheben, die darauf hinweisen, zu welcher Jahreszeit die betreffende Stelle des Zahnes gebildet wurde. Diese Hinweise wären aus zusätzlich durchgeführten Sauerstoffisotopenanalysen zu erhalten (vgl. S. 665).

Bei entsprechender Kenntnis der Strontiumisotopenprovinzen im jeweiligen Arbeitsgebiet können die einzelnen Werte verschiedenen Regionen zugeordnet und damit Aussagen über die zurückgelegten Distanzen getroffen werden.

Diesem Beispiel ähnliche Messwerte könnten entweder für ein Leben als Jäger und Sammler, als Vollnomade oder als Halbnomade aus einem Teil der Gruppe, der im Familienverband regelmäßig seine Herden auf die verschiedenen Weiden begleitet hat, sprechen. Allein vom Strontiumisotopenbefund her sind für diese verschiedenen Wirtschaftsweisen keine Unterschiede zu erwarten. Zu einer Differenzierung ist es daher unabdingbar, auf Daten aus dem archäologischen Kontext zurückzugreifen.

Regelmäßige Mobilität, die erst im Erwachsenenalter beginnt, ist anhand der Zahndaten nicht erkennbar. Für sie müsste man auf Knochenwerte zurückgreifen. Sicherlich ist, wenn die Grenze der Strontiumisotopenprovinz des Geburtsortes überschritten wird, ein Unterschied zwischen Zahnschmelz und Knochen erkennbar. Hinweise auf die Dauer der Einzelaufenthalte sind aus den Knochen jedoch kaum ableitbar, da ihre jährlichen Umbauraten zu gering sind, als dass sich darin saisonale Ortswechsel widerspiegeln würden. Konkrete Studien, die dies bestätigen oder widerlegen würden, liegen bisher noch nicht vor.

Im Zusammenhang mit potentiell regelhaft mobilen Individuen liegt bislang nur eine Studie zu Knochen- und Zahnschmelzresten von Australopithecinen und Vertretern der Gattung *Homo* aus der Höhle von Swartkrans im Sterkfontein-Tal in Südafrika vor. In deren Zentrum stand allerdings weniger die Erforschung der Mobilität, als vielmehr, herauszufinden, ob die Nahrung der Australopithecinen aus einem relativ kleinen Gebiet um die Fundstelle herum stammte, oder ob sie weitläufig durch die Landschaft streiften und dabei Nahrung von verschiedenen geologischen Einheiten bezogen. Die Gegend um Swartkrans erscheint für Strontiumisotopenstudien gut geeignet, da die geologischen Bedingungen in einem Umkreis von 15 km um die Fundstelle sehr variabel sind. Die Fundstelle selbst liegt auf Dolomit. In der näheren Umgebung stehen außerdem Tongesteine, Granite, Quarzite sowie vulkanische Gesteine an¹⁰³. Umfangreiche Untersuchungen an Gesteinen, Wasserproben und Pflanzenmaterial ergaben Unterschiede zwischen dem biologisch verfügbaren Strontium im Flusstal, wo die Fundstelle liegt, und den daran anschließenden, mit Gras bewachsenen Hügeln. Unterschiede in der Strontiumisotopie der geologischen Einheiten des Hinterlandes setzen sich jedoch kaum ins biologisch verfügbare Strontium fort, weshalb man im vorliegenden Untersuchungsgebiet nur unterscheiden kann, ob die Nahrung vorrangig aus dem Flusstal oder aus dem Hinterland bezogen wurde (Sillen et al. 1998, 2470 mit Fig. 7). Die Untersuchungen an morphologisch undiagnostischen Knochen von sechs Australopithecinen und zwei Individuen der Gattung *Homo* ergaben einander sehr ähnliche Strontiumisotopenverhältnisse. Sie sind gut mit Daten für Fauna vergleichbar, die ihre Nahrung hauptsächlich von den Anhöhen bezog, und legen nahe, dass sich die Hominiden nicht auf Nahrung aus Feuchtbiotopen in Flussnähe spezialisiert hatten¹⁰⁴. Lediglich Zahnschmelz und Knochenmaterial eines männlichen, robusten Australopithecinen wichen signifikant von den anderen Individuen ab und sind gut mit in Feuchtbiotopen lebender Fauna vergleichbar. Da es jedoch wenig wahrscheinlich ist, dass ein einziges Individuum gänzlich andere Nahrungsgewohnheiten als die anderen Vertreter derselben Art hatte, kann angenommen werden, dass das Individuum erst relativ kurz vor seinem Tod in die Gegend von Sterkfontein gekommen ist (Sillen et al. 1998, 2471-2472).

Mobilität von Tieren

Ebenso wie die Mobilität des Menschen ist mit Hilfe von Strontiumisotopenuntersuchungen auch tierische Mobilität erfassbar. Trotzdem wurden Analysen bezüglich archäozoologischer Fragestellungen bisher kaum durchgeführt. Obwohl Untersuchungen meist rezenter Tierknochen in vielen Studien einen außerordentlich bedeutenden Beitrag zur Charakterisierung des biologisch verfügbaren Strontiums leisteten und damit wertvolle Anhaltspunkte für das Vorhandensein von Zuwanderern lieferten¹⁰⁵, sind mir lediglich zwei Beispiele für konkrete archäozoologische Anwendungen bekannt geworden (Schweissing/Grupe 2003b; Balasse et al. 2002).

Dagegen werden von nicht archäologisch arbeitenden Zoologen seit Beginn der 1990er Jahre zur Beantwortung unterschiedlicher Fragestellungen Strontiumisotopenanalysen durchgeführt, so z.B. in der Zoologie zur Erforschung des Zugverhaltens von Zugvögeln (Chamberlain et al. 1997), in der Kriminalistik zur Lokalisierung der Herkunft von illegal verhandeltem Elefanteneifenbein (van der Merwe et al. 1990; Koch et al. 1995) oder Hirschgeweih (Beard/Johnson 2000) sowie in der Paläontologie zur Rekonstruktion des Wanderverhaltens von Lachsen (Koch et al. 1992) oder Mammuts bzw. Mastodons (Hoppe et al. 1999).

¹⁰³ Sillen et al. 1995, 279 mit Fig. 1; Sillen et al. 1998, 2463-2464 mit Fig. 1.

¹⁰⁴ Sillen et al. 1995, 279 mit Tab. 1 und Fig. 4; Sillen et al. 1998, 2470-2471.

¹⁰⁵ Vgl. Price et al. 2000; Knudson et al. 2001; Price et al. 2002.

Archäologische Fragestellungen

Von archäozoologischem Interesse im Zusammenhang mit Mobilität von Tieren sind zwei Arten von Fragestellungen, auf die im folgenden anhand einiger Beispiele eingegangen werden soll.

Zum einen interessiert die natürliche, saisonale Mobilität von Herden, die vom Menschen unabhängig ist. Im Zusammenhang mit der Erforschung von Jäger- und Sammlergesellschaften hat sie große Bedeutung, da die Tiere teilweise wichtigste Nahrungsgrundlage des Menschen waren, und ihre Wanderungen eventuell Rückschlüsse auf die Lebensweise des Menschen und dessen Nutzung seiner Umwelt erlauben. Anhaltspunkte für die Bewegung von Tierherden können saisonale Analysen, aber auch osteometrische Auswertungen von Faunenresten archäologischer Fundplätze bieten, wie sie z.B. für jungpaläolithische Fundstellen in Deutschland und Frankreich vorliegen¹⁰⁶.

Andere archäozoologische Fragestellungen beschäftigen sich damit, ob Tiere z.B. als Nutz- oder Zucht-tiere vom Menschen bewusst in andere Regionen gebracht worden sind. Hier ist, ähnlich wie bei der menschlichen Mobilität auch, zwischen regelhaften, saisonalen und unregelmäßigen und/oder einmaligen Ortswechseln zu unterscheiden. Regelmäßige Weidewechsel von Haustieren finden im Zusammenhang mit den bereits bei den regelhaften Mobilitätsformen des Menschen erörterten Formen des Pastoralismus (s. S. 657ff.) statt.

Unregelhafte oder einmalige Ortswechsel von Tieren können im Zusammenhang mit dem Austausch von Tieren zu Zucht- oder dem Verhandeln zu anderen Nutzzwecken stehen. Besonders in der Auseinandersetzung mit Befunden aus der Römischen Kaiserzeit sind Züchtungsmethoden wie die Meliorations- oder Verdrängungszüchtung von Interesse, bei der durch die wiederholte Anpaarung von fremden Vatertieren versucht wird, einer bodenständigen Rasse verbesserte Form- und Leistungsmerkmale anzuzüchten. Aus osteologischen Befunden schließt man, dass diese Form der Tierzucht besonders in den Provinzen an Rhein und Donau verbreitet war. Danach brachten die Römer männliche Zuchttiere in jene Gebiete und betrieben mit den einheimischen, kleinwüchsigen Rindern Verdrängungszucht (Benecke 1994, 180, 188-190; dagegen: Kokabi 1988, 132).

Über Handelsbeziehungen scheinen größere Rinder gelegentlich auch über die Grenzen des Römischen Reiches hinaus bis nach Brandenburg bzw. Mecklenburg gelangt zu sein (Benecke 1994, 191). Mit Hilfe von Strontiumisotopenuntersuchungen könnte geklärt werden, inwieweit es sich bei durch ihre besondere Größe auffallenden Rindern wirklich um Importe aus dem italischen Raum handelt, und welche Bedeutung ortsfremde Tiere bei der Zucht überhaupt hatten.

Ähnlich wie die Mobilitätsformen des Menschen kann man diese Fragenkomplexe nach der Regelmäßigkeit von großräumigen Bewegungen in zwei Gruppen einteilen, die man im Rahmen von Strontiumisotopenanalysen mit unterschiedlichen Probenauswahlstrategien untersuchen würde (Abb. 23).

Als eine erste Gruppe können regelmäßige saisonale Wanderungen entweder von Wildtieren im Zusammenhang mit saisonalen Bewegungen oder von Haustieren im Kontext mit den mobilen Wirtschaftsformen Nomadismus und Transhumanz von Bedeutung sein. Eine zweite Gruppe bilden unregelmäßige oder gar nur einmalige großräumige Bewegungen im Leben eines Tieres. Darunter kann z.B. Handel mit Tieren fallen, der sowohl für Wildtiere – z.B. wenn es sich um Exoten handelt – als auch für Haustiere – z.B. im Zusammenhang mit Züchtungen – denkbar ist.

Forschungsbeitrag der Strontiumisotopenanalyse

Da Säugetiere mit ihren Zähnen und Knochen die gleichen biogenen Gewebe mit den gleichen biologischen und chemischen Eigenschaften wie der Mensch aufweisen, sind Strontiumisotopenanalysen zur Erkennung von Mobilität auch in der gleichen Art und Weise wie beim Menschen anwendbar.

Von zentraler Bedeutung für die Erfassung jeglicher Form von tierischer Mobilität ist der Zahnschmelz. Besonders bei Schlachttieren besteht gegenüber dem Menschen der entscheidende Vorteil, dass das

¹⁰⁶ Gordon 1988; Weinstock 2000, 110-111; Weniger 1982; Vgl. s. S. 655f.

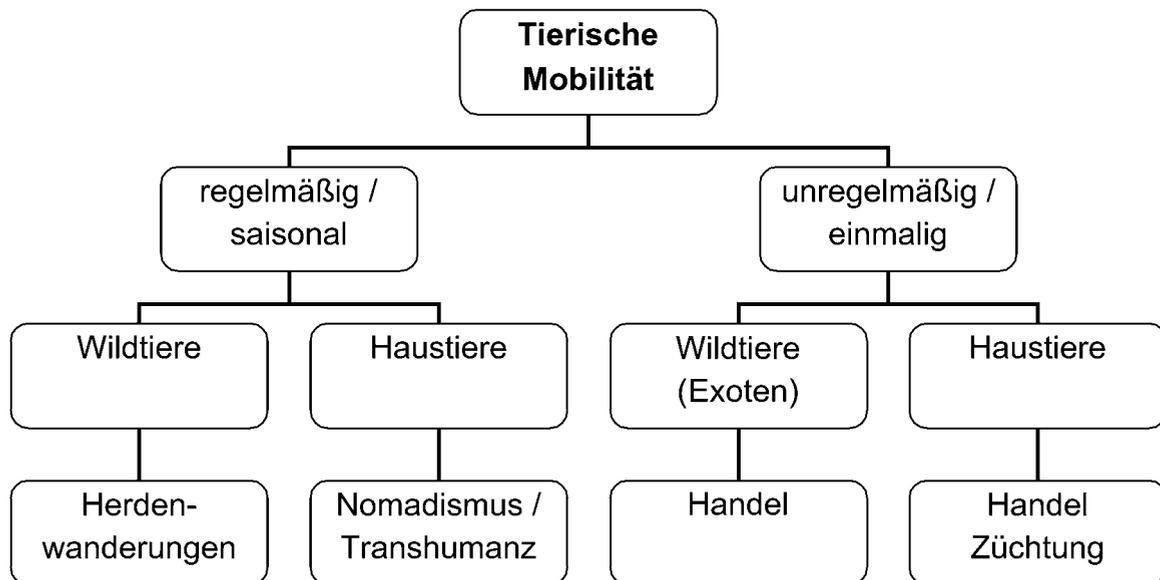


Abb. 23 Einteilung tierischer Mobilität nach der Regelmäßigkeit von großräumigen Bewegungen.

Zahnwachstum über den größten Teil des gesamten Lebens stattfindet oder teilweise selbst zum Todeszeitpunkt des Tieres noch nicht abgeschlossen ist. Daraus folgt, dass der größte Teil oder die gesamte Zeitspanne des tierischen Individuallebens im Zahnschmelz repräsentiert sind, und damit – zumindest theoretisch – die verschiedenen Aufenthaltsorte differenziert werden können. Im Zusammenhang mit tierischer Mobilität wird man auf die Beprobung von potenziell stärker kontaminiertem Knochenmaterial weitgehend verzichten können. Je nach Fragestellung wird man die Anzahl der Proben bzw. die Beprobungsstellen unterschiedlich auswählen.

Erfassung von regelmäßiger, saisonaler Mobilität

Wie beim Menschen erfolgt die Bildung des Zahnschmelzes der verschiedenen Zähne zu verschiedenen Zeiten und beginnt jeweils an der Spitze des Zahnes und schreitet dann in Richtung seiner Basis fort. Das bedeutet, dass die Zahnschmelzspitze jeweils am ältesten ist, während sich am Übergang zur Zahnwurzel der jüngste Schmelz befindet. Die Länge der Bildungszeit des Schmelzes unterscheidet sich je nach Art des Zahnes und der Tierart (Hillson 1986). Im Schmelz des ersten und zweiten Molaren von Rindern sind z.B. jeweils zwischen einem halben und einem anderthalben Jahr repräsentiert (Wiedemann et al. 1999).

Tierarten mit hochkronigen Zähnen, wie Pferde oder Rinder, sind für Strontiumisotopenanalysen mit der Frage nach regelmäßiger, saisonaler Mobilität besonders gut geeignet. Dabei erweist sich die sog. sequenzielle Beprobung, wie sie in der Sauerstoffisotopenforschung entwickelt und angewendet wurde, als vielversprechend (Balasse 2003; Balasse et al. 2002). Sequenzielle Beprobung eines Zahnes bedeutet, dass in bestimmten, regelmäßigen Abständen Probenmaterial mit Hilfe eines Zahnarztbohrers herausgefräst wird. Die Probenentnahmestellen werden als horizontale Linien angelegt, da so gewährleistet ist, dass der in eine Probe gelangende Zahnschmelz einen möglichst kurzen Zeitraum widerspiegelt. Die Breite eines solchen horizontalen Bandes beträgt je nach verwendetem Werkzeug ca. 1 bis 1,5 mm oder sogar weniger (Abb. 24).

Der Abstand der Probenentnahmestellen richtet sich nach der Fragestellung bzw. den finanziellen Kapazitäten, die für die Untersuchung zur Verfügung stehen. Je dichter die Bänder angelegt werden, desto



Abb. 24 Sequenzielle Beprobung von Rinderzähnen aus der bandkeramischen Fundstelle von Ensisheim auf der französischen Seite des Oberrheingraben mit Hilfe eines Zahnarztbohrers. Die horizontalen Linien entsprechen jeweils einer Probe.

größer ist die zeitliche Auflösung, die man mit der Beprobung erreichen kann, und desto genauer ist der Zeitpunkt der Ortswechsel festzulegen.

Welche Ergebnisse zum einen für eine ortsstabile Lebensweise bzw. für Bewegungen über geologische Grenzen hinweg zu erwarten sind, soll am Beispiel der Untersuchungen von M. Balasse et al. an Schafszähnen aus Südafrika verdeutlicht werden, die unter der Fragestellung nach saisonaler Mobilität auf Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Strontiumisotopen beprobt wurden (Balasse et al. 2002).

Abb. 25 und Abb. 26 verdeutlichen die Untersuchungsergebnisse für Kohlenstoff- und Strontiumisotopenuntersuchungen der Zähne zweier Schafe. Die Kohlenstoffisotopenverhältnisse sind in beiden Diagrammen als schwarze Punkte dargestellt. Sie variieren mit dem Anteil von C_3 - und C_4 -Pflanzen in der Nahrung. Die deutlichen Variationen innerhalb der jeweiligen Probenreihen weisen auf Veränderungen in der Nahrungszusammensetzung innerhalb des Zeitraumes hin, in dem die Zähne gebildet wurden. Um zu entscheiden, ob die sich in den Daten widerspiegelnden jahreszeitlichen Veränderungen mit saisonalen Standortwechseln oder mit je nach Jahreszeit unterschiedlichem Angebot von C_3 - und C_4 -Pflanzen an einem Ort zu erklären sind, wurden zusätzlich Strontiumisotopenverhältnisse für einige der Proben bestimmt.

Für eine stationäre Lebensweise bzw. für einen ganzjährigen Aufenthalt im selben Gebiet würden konstante Strontiumisotopenverhältnisse in der gesamten Probensequenz sprechen. Dies ist in dem in Abb. 25 dargestellten Beispiel der Fall. Alle Strontiumisotopenverhältnisse fallen in den Bereich mariner Sande und sprechen für einen ganzjährigen Aufenthalt des Tieres an der Küste.

Das Beispiel in Abb. 26 zeigt ähnliche Varianzen in der Kohlenstoffisotopie wie das vorhergehende. Die Strontiumisotopenverhältnisse sprechen hier allerdings für einen Ortswechsel. Dies ist daran zu erkennen, dass die drei Millimeter vom Zahnhals entfernt genommene Probe nicht wie die anderen beiden, in den Bereich der Tafelbergsedimente im Hinterland fällt, sondern zwischen diesen und den Strontiumisotopenverhältnissen der marinen Sande angesiedelt ist.

Das zweite Beispiel weist auf alle Fälle auf einen Standortwechsel des Tieres hin. Ob es sich dabei jedoch um eine einmalige Bewegung oder regelmäßige saisonale Mobilität handelt, ist anhand der geringen Probenanzahl nicht zu entscheiden. Für eine solche Entscheidung wäre die Beprobung mehrerer Zähne mit möglichst mehreren Messungen pro Zahn nötig. Außerdem ist es unbedingt ratsam, zusätzlich Sauerstoffisotopen, die in Abhängigkeit von der Temperatur und damit von der Jahreszeit schwanken, bzw. wenn jahreszeitlich bedingt C_3 - und C_4 -Pflanzen in unterschiedlichem Maße zur Verfügung stehen,

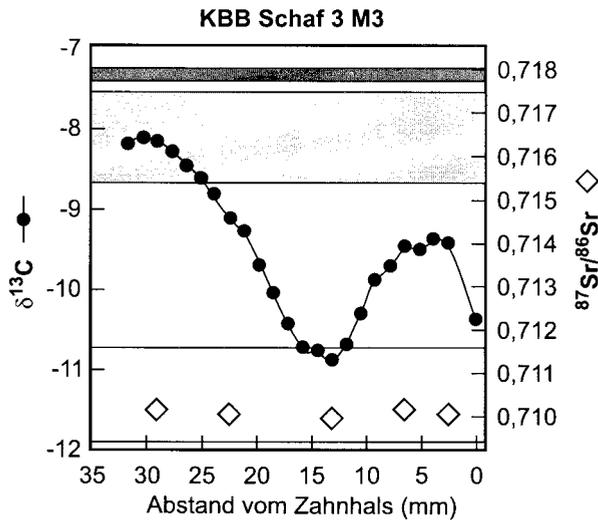


Abb. 25 Sequenzielle Beprobung des Zahnschmelzes eines Schafszahnes. Schwarze Punkte = Kohlenstoffisotopendaten. Weiße Rhomben = Strontiumisotopendaten. Die horizontalen Balken markieren Strontiumisotopenverhältnisse verschiedener geologischer Einheiten. Alle Strontiumisotopendaten fallen in den Bereich einer geologischen Einheit und weisen auf eine ortstabile Lebensweise des Tieres hin (umgezeichnet nach: Balasse et al. 2002, Fig. 7).

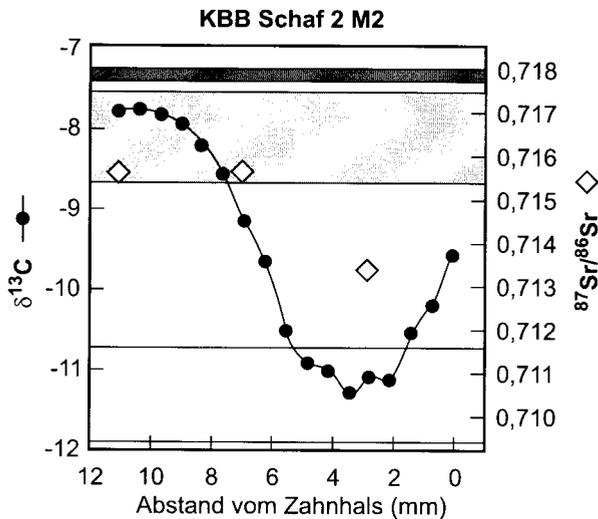


Abb. 26 Sequenzielle Beprobung des Zahnschmelzes eines Schafszahnes. Schwarze Punkte = Kohlenstoffisotopendaten. Weiße Rhomben = Strontiumisotopendaten. Die horizontalen Balken markieren Strontiumisotopenverhältnisse verschiedener geologischer Einheiten. Die Strontiumisotopendaten befinden sich im Bereich zweier geologischer Einheiten und weisen auf die Nutzung verschiedener Nahrungsquellen in dem weniger als ein Jahr umfassenden Zeitraum hin (umgezeichnet nach: Balasse et al. 2002, Fig. 7).

Kohlenstoffisotopenuntersuchungen durchzuführen. Solche Analysen ermöglichen es, zwischen Zahnschmelzbereichen, die in der warmen bzw. in der kalten Jahreszeit gebildet wurden, zu unterscheiden und gleichzeitig gebildete Zahnschmelzbereiche zweier benachbarter Zähne zu parallelisieren. Damit ist es möglich, den gesamten Zeitraum, der durch die Proben widerspiegelt wird, besser einzuschätzen und nicht denselben Zeitpunkt durch Proben zweier Zähne repräsentiert zu haben und aus der Ähnlichkeit der Daten auf einen längeren stationären Aufenthalt zu schließen.

Unter solchen im Hinblick auf die Probenanzahl und Auswahl idealen Bedingungen würde man für den Nachweis saisonaler Mobilität in den Strontiumisotopenverhältnissen Unterschiede erwarten, die sich mit den saisonalen Kurven für Sauerstoff- oder/und Kohlenstoffisotopen korrelieren lassen.

Wie schon in anderen Zusammenhängen mehrfach erwähnt, ist eine hinreichende Differenzierung des biologisch verfügbaren Strontiums zwischen den jahreszeitlich verschiedenen Aufenthaltsorten Voraus-

		MENSCH	
		mobil	ortsstabil
TIER	mobil	Wildtiere: ⇒ Jäger und Sammler Haustiere: ⇒ Vollnomadismus ⇒ Halbnomadismus (Kinder gehören mobilen Einheiten an)	Wildtiere: ⇒ sesshafte Jäger und Sammler Haustiere: ⇒ Halbnomadismus, semi-sesshafter Pastoralismus (Kinder gehören mobilen Einheiten nicht an) ⇒ Transhumanz
	ortsstabil	Existenz verschiedener Wirtschaftsweisen	Haltung der Tiere im Stall oder zumindest in Siedlungsnähe, Sesshaftigkeit des Menschen

Tab. 10 Wirtschaftsweisen im Spiegel von Strontiumisotopenanalysen.

setzung für den Nachweis saisonaler Mobilität. Die Kenntnis der Isotopie des biologisch verfügbaren Strontiums ist auch hier für eine regionale Zuweisung der Aufenthaltsgebiete bzw. eine Abschätzung der zurückgelegten Distanzen notwendig.

Wie bereits dargelegt, spielt saisonale Mobilität sowohl bei der Untersuchung von wilden Herdentieren als auch bei Analysen von menschlichen Wirtschaftsweisen eine Rolle. Unabhängig vom archäologischen Kontext wird man mit Hilfe von Strontiumisotopenuntersuchungen aussagen können, ob ein menschliches oder tierisches Individuum ortskonstant gelebt hat oder nicht. Eine Zusammenschau von menschlichen und tierischen Daten aus demselben Fund- oder zumindest kulturellen Kontext könnte erhebliche Fortschritte bezüglich der Erforschung von Wirtschaftsweisen erbringen (Tab. 10). Diesbezügliche Überlegungen können derzeit allerdings noch nicht durch konkrete Messdaten untermauert werden.

Geben sowohl menschliche als auch tierische Zähne aus demselben archäologischen Kontext Hinweise auf eine regelhaft mobile Lebensweise, so spräche das entweder für ein Jäger- und Sammlertum, bei dem Menschen ebenso wie Tiere regelmäßig ihre Aufenthaltsgebiete wechseln, oder für Voll- bzw. Halbnomadismus, bei dem Kinder den mobilen Einheiten angehören. Ob es sich in einem konkreten Fall um das eine oder das andere handelt, muss jeweils aus dem archäologischen Kontext, in diesem Falle aus dem Vorhandensein einer Wildfauna oder für Nomadismus geeigneter Haustiere, geschlossen werden.

Auch für den Befund ›ortsstabile Menschen und mobile Tiere‹ gibt es mehrere Interpretationsmöglichkeiten. Handelt es sich im entsprechenden Fundkontext ausschließlich um eine Wildfauna, so liegt nahe, dass es sich um sesshafte Jäger und Sammler handelt, oder um Individuen, die zumindest ihre Kindheit in ortsfesten Lagern verbracht haben. Liegen Haustiere vor, so ist an verschiedene Formen des Pastoralismus zu denken, bei denen Kinder nicht den mobilen Einheiten angehören. Dies können zum einen Halbnomadismus oder semi-sesshafter Pastoralismus sein, bei denen die Kinder in einer über längere Zeit bewohnten Siedlung bleiben. Andererseits sind aber auch verschiedene Formen von Transhumanz denkbar, bei denen Herden von spezialisierten Hirten begleitet werden. Die Hirten können Individuen sein, die ihre Kindheit in einer festen Siedlung verbracht haben und daher den Zahndaten nach sesshaft erscheinen.

Hinweise auf Ortsstabilität sowohl in den Faunenresten als auch in den menschlichen Zähnen sprechen für eine sesshafte Lebensweise des Menschen und eine Haltung des Viehbestandes in der Nähe der Siedlung ohne reguläre Mobilität. Daten, die für Ortsstabilität im Bereich der Fauna sprechen, während die menschlichen Proben auf regelhafte Mobilität während der ersten zwölf Lebensjahre hinweisen, könnten wohl am ehesten mit dem Nebeneinanderbestehen verschiedener Wirtschaftsweisen interpretiert werden.

Hat man durch entsprechende Kombinationen von menschlichen und tierischen Daten Hinweise auf regelhafte Mobilität, kann diese noch genauer charakterisiert werden, wenn es gelingt, einzelne Messwerte mit dem biologisch verfügbaren Strontium verschiedener Regionen in Verbindung zu bringen. Aus derartigen Analysen können z.B. Aussagen über die Distanz der Wanderungen getroffen werden.

Als sehr vielversprechend erweist sich auch die Kombination von Strontiumisotopenuntersuchungen mit Sauerstoff- oder Kohlenstoffisotopenanalysen, die Hinweise darauf geben können, welche Jahreszeit die einzelnen Probenpunkte widerspiegeln. Aus solchen Kombinationsuntersuchungen wären sehr zuverlässige Aussagen über die Bedeutung und den Ablauf saisonaler Mobilität zu treffen.

Erfassung von unregelmäßiger oder einmaliger Mobilität

Der Nachweis von unregelmäßiger – im Sinne von seltener – oder gar nur einmaliger Mobilität von Tieren, was im Fall von Handel oder dem Erwerb von Tieren zu Zuchtzwecken der Fall wäre, beruht ebenso wie die Analyse von saisonaler Mobilität auf der Tatsache, dass die Zahnschmelzbildung über einen relativ langen Zeitraum erfolgt, und Strontium mit einer für den jeweiligen Aufenthaltsort typischen isotopischen Zusammensetzung in diesen eingebaut wird. Der Unterschied liegt lediglich in der Beprobungsstrategie – genauer gesagt, in der Anzahl der zu untersuchenden Proben.

Während beim Nachweis von saisonaler Mobilität eine möglichst große Probenanzahl für die Charakterisierung der unterschiedlichen Aufenthaltsgebiete wünschenswert ist, kommt die Fragestellung nach einmaligem Ortswechsel grundsätzlich mit einer sehr geringen Probenmenge aus. Hier genügt bereits ein signifikanter Unterschied zwischen einem möglichst früh und einem möglichst spät gebildeten Bereich des Zahnschmelzes, um einen solchen Schluss zu ziehen¹⁰⁷. Wird dann allerdings angestrebt, den Zeitpunkt des Ortswechsels genauer einzugrenzen oder besteht der Verdacht auf mehrmalige Verlagerungen des Standortes, so sind auch hier mehrere Proben vonnöten, die in der oben beschriebenen Weise (s. S. 664f.) entnommen werden sollten. Die genaue Anzahl und Position der Beprobungsstellen richten sich nach der jeweiligen Fragestellung bzw. nach bereits vorliegenden Ergebnissen.

Während saisonale Mobilität auf jeden Fall schon während der Zahnbildungsphase stattfindet, die sich bei den meisten für archäozoologische Fragestellungen relevanten Säugetieren über mehrere Jahre erstreckt, kann ein einmaliger Ortswechsel auch noch im adulten Stadium des Tieres, d.h. nach Abschluss der Zahnbildung, erfolgen. Die Erkennung eines solchen Ortswechsels würde in derselben Weise wie für erwachsene Menschen entweder durch Vergleich von Zahnschmelzwerten mit Knochen desselben Individuums oder durch Vergleich der Zähne mit auf andere Weise ermitteltem biologisch verfügbarem Strontium erfolgen.

Andere Anwendungen der Strontiumisotopenanalyse

Strontium ist nicht nur in Knochen und Zähnen von Mensch und Tier, sondern auch in anderen organisch gebildeten oder anorganischen Materialien ein weit verbreitetes Spurenelement. In der Untersuchung von Rohmaterialien und Artefakten liegen Anwendungsmöglichkeiten der Strontiumisotopenanalyse in Bezug auf Handels- und Distributionssysteme oder die Nutzung von Ressourcen im Umkreis einer Fundstelle.

Diesbezügliche Studien wurden bereits an Steinen als Rohstoff für die Artefaktherstellung und als Baumaterial durchgeführt. Obwohl auch hier kleinräumige Differenzen der Strontiumisotopie in einer Rohstofflagerstätte oder zwischen verschiedenen Mineralen eines Gesteins eine Rolle spielen, sollten die

¹⁰⁷ Beprobte man tierische Individuen in Bezug auf einmalige oder seltene Ortswechsel, so sollte aus dem historischen oder archäologischen Kontext ausgeschlossen werden

können, dass regelhafte Mobilität für die Tiere eine Rolle spielte.

Untersuchungsergebnisse im Einzelfall zuverlässiger als bei Analysen von bereits biologisch umgesetztem Strontium sein, da man die Primärquellen des Strontiums beprobt. Mit archäologischer Fragestellung wurden Strontiumisotopenuntersuchungen an Gesteinen bereits für bewegliche Artefakte aus Obsidian (Gale 1981) sowie für Marmor (Zöldföldi/Székely 2002; Zöldföldi et al. 2002) und Gips (Gale et al. 1988) als Baumaterialien durchgeführt.

Auch der Frage nach der Herkunft von Bauhölzern wurde mit Hilfe der Strontiumisotopenanalyse nachgegangen. Bäume nehmen mobiles Strontium mit einer standortspezifischen Isotopensignatur aus dem Boden auf und lagern es als Spurenelement in das Holz ein. Darauf griffen z.B. umfangreiche Spurenelement- und Strontiumisotopenanalysen an Bauhölzern von sechs Pueblo-Fundplätzen der Anazazi-Kultur im Chaco Canyon im San Juan Becken (New Mexico, USA) zurück (Durand et al. 1999; English et al. 2001). Die Analysedaten belegen eine Herkunft der Bauhölzer aus zwei über 70 km entfernten Gebirgsregionen, während ein drittes potentiell Waldgebiet offensichtlich nicht zum Holzeinschlag genutzt wurde.

Auch in tonigen Sedimenten, die zur Keramikherstellung genutzt wurden, ist Strontium in messbaren Konzentrationen enthalten. Je nach Lagerstätte unterschiedliche Isotopenverhältnisse ermöglichen die Beantwortung von Fragestellungen nach der Produktion und Distribution von Tonware. Eine Studie an Keramik aus Troia untersucht mit Hilfe von Spurenelement- und Isotopenanalysen die Nutzung unterschiedlicher Tonvorkommen im Umkreis der Stadt und die Herkunft von Imitaten mykenischer Keramik und sicheren Importstücken (Knacke-Loy 1994; Knacke-Loy et al. 1995).

Eine weitere für Strontiumisotopenanalysen geeignete Materialgruppe ist Glas. Sie können zu Fragen nach der Art der für die Glasherstellung verwendeten Rohmaterialien und deren Herkunft wichtige Beiträge leisten. Untersuchungen liegen bereits für römische Gläser aus der Eifel vor, wo die Herkunft des bei der Herstellung benötigten Karbonats untersucht wurde (Wedepohl/Baumann 2000).

Diese Anwendungen der Strontiumisotopenanalyse legen zumeist großräumige, d.h. regionale oder überregionale Unterschiede in der Strontiumisotopie zugrunde. Demgegenüber sollte es möglich sein, auch lokale Differenzen zur Beantwortung von wirtschaftsgeschichtlichen Fragestellungen nach der Nutzung des unmittelbaren Umlandes einer Siedlung zu nutzen. Eine Beschäftigung mit derartigen Fragen ist dort sinnvoll, wo es in geologisch abwechslungsreichen Gebieten kleinregionale Differenzen im biologisch verfügbaren Strontium gibt, oder wo verschiedene größere Strontiumisotopenprovinzen aneinandergrenzen. Anwendungsmöglichkeiten der Strontiumisotopenanalyse im Rahmen von *Site Catchment*-Untersuchungen¹⁰⁸ wurden bereits 1985 von J. E. Ericson im ersten grundlegenden Aufsatz zu dieser Methode angesprochen (Ericson 1985, 503, 509, 512). Diesbezügliche Anwendungen an Einzelbeispielen liegen allerdings bis heute noch nicht vor.

Ein Sonderfall der *Site Catchment Analyse* ist die Frage nach der Nutzung mariner Nahrungsquellen als eine spezifische Ressource in Küstengebieten. Der Ansatz beruht darauf, dass Meerwasser ein spezifisches Strontiumisotopenverhältnis hat, das durch die Übertragung in der Nahrungskette ebenso in Meereslebewesen zu finden ist und bei einer entsprechenden marinen Komponente der menschlichen Nahrung auch in dessen Knochen und Zähnen sichtbar sein sollte (Sealy et al. 1991, 400). Schwierigkeiten entstehen jedoch dadurch, dass es terrestrische Sedimente mit einem dem Meerwasser ähnlichen Strontiumisotopenverhältnis gibt und, dass die Strontiumisotopie von Landpflanzen in unmittelbarer Meeresnähe durch die Gischt und feine Wassertröpfchen an marine Werte angeglichen werden kann. Mit konkreten Analysen an menschlichem Knochenmaterial wurde der Frage nach der Bedeutung mariner Nahrungsquellen von Krueger (1985) und Sealy et al. (1991) nachgegangen.

¹⁰⁸ E. S. Higgs definiert Site Catchment als: »The total area from which the contents of a site have been derived.« (Higgs 1975, ix). Die Site Catchment-Analyse steht für eine Untersuchung der wirtschaftlichen Nutzung des Umlandes eines Fundortes. Sie beschäftigt sich damit,

woher die an einem Ort aufgefundenen Artefakte und Biofakte stammen, und welche Bereiche des Umlandes eines Ortes auf welche Weise vom Menschen genutzt wurden.

DAS POTENTIAL VON STRONTIUMISOTOPENANALYSEN: FORSCHUNGSSTAND UND FORSCHUNGSAUFGABEN

Wie in den vorangegangenen Ausführungen gezeigt, bietet die Strontiumisotopenanalyse Möglichkeiten, zu einer Vielzahl von archäologischen Fragestellungen einen Beitrag zu leisten. Die Themenbereiche umfassen Studien zu großräumigen Langstreckenwanderungen zwischen sehr verschiedenen Landschaften bis hin zu lokalen Analysen des Wirtschaftslandes im Umkreis einer Siedlung. Es ergibt sich die Frage, ob es wirklich realistisch ist, mit einer einzigen Methode so unterschiedliche Themenstellungen zu bearbeiten. Ist nicht anzunehmen, dass, wenn es Unterschiede im biologisch verfügbaren Strontium zwischen Großlandschaften gibt, und diese die Feststellung von Langstreckenmigrationen erlauben, das Strontium im lokalen Bereich homogen ist, so dass Untersuchungen im Rahmen von *Site Catchment*-Studien wenig fruchtbringend erscheinen? Und umgekehrt: Wenn sich bereits kleinregional verschiedene Wirtschaftsflächen differenzieren lassen, ist es dann nicht wahrscheinlich, dass bestimmte Strontiumisotopensignaturen bereits in geringem Abstand von einer Fundstelle so häufig vorkommen, dass die Frage nach Ortswechselln von Menschen kaum noch beantwortbar ist?

Es ist eine Tatsache, dass Strontiumisotopenverhältnisse in Gesteinen sowohl großräumig als auch kleinräumig variieren können, und Strontium, während es die Nahrungskette passiert, nicht fraktioniert, d.h. in derselben isotopischen Zusammensetzung aufgenommen und auch weitergegeben wird. Eine Problematik besteht jedoch darin, dass die Isotopie des biologisch verfügbaren Strontiums sich in der Regel vom Strontiumisotopenverhältnis des Gesamtgesteins im Untergrund unterscheidet und zumeist unbekannt ist. Deshalb muss in Zukunft die Charakterisierung des biologisch verfügbaren Strontiums in den verschiedenen Regionen wichtigster Gegenstand der Grundlagenforschung sein. Sie wird Auskunft darüber geben, ob tendenziell mit eher großräumigen oder eher kleinräumigen Variationen oder, je nach Region, vielleicht auch mit beidem zu rechnen ist. Die Charakterisierung des biologisch verfügbaren Strontiums ist Voraussetzung für eine Interpretation der an menschlichen und tierischen Überresten gewonnenen Messdaten, sowohl in Bezug auf die Feststellung von Zuwanderern und deren potentieller Herkunftsgebiete als auch auf die Nutzung von Wirtschaftsbereichen. Auch für die Arbeit mit Rohmaterialien und Artefakten ist es unumgänglich, die Strontiumisotopenverhältnisse verschiedener potentieller Lagerstätten zu kennen. Die Möglichkeiten der Methode hängen nicht zuletzt von den jeweiligen regionalen Verhältnissen ab.

Auch wenn die Variation der Isotopie des biologisch verfügbaren Strontiums in den zumeist auf quartären Sedimenten liegenden Hauptsiedelgebieten Mitteleuropas noch unzureichend erforscht ist, und sich die Hinweise mehren, dass hier über große Gebiete ähnliche Werte anzutreffen sind, scheinen sich die oftmals durch Grundgebirge gekennzeichneten Mittelgebirge davon zu unterscheiden.

Diese Differenzen klarer herauszustellen, wird Aufgabe der Zukunft sein. Es liegt jedoch nahe, dass die Strontiumisotopenanalyse – wenn auch ihre Aussagemöglichkeiten zu Ortswechselln innerhalb der Hauptsiedlungsgebiete vielleicht beschränkt sein mögen – einen wichtigen Beitrag zur Erforschung der ur- und frühgeschichtlichen Nutzung bzw. Besiedlung der Mittelgebirge leisten kann. Diese Frage wurde gerade in der jüngeren Forschung wieder aufgegriffen (Valde-Novak/Kienlin 2002).

Wie des öfteren deutlich wurde, ist teilweise mit recht großen zusammenhängenden Strontiumisotopenprovinzen zu rechnen, innerhalb derer Ortswechsel kaum nachzuvollziehen sind. Ebenso können auch voneinander entfernt liegende Gebiete durch ähnliches biologisch verfügbares Strontium gekennzeichnet sein, so dass man in Bezug auf eine Herkunftsanalyse von Zuwanderern keine Aussage zu treffen vermag. Um hier zu deutlicheren Differenzierungen zu kommen, liegt großes Potential in der Kombination von Strontiumisotopenanalysen mit anderen naturwissenschaftlichen Untersuchungen. So variiert die Isotopie des Sauerstoffs im Wasser mit den klimatischen Verhältnissen oder mit der Höhenlage und der Distanz zum Meer, während die Absolutgehalte von Strontium und Barium sowie die isotopische Zusammensetzung von Blei und Schwefel ebenfalls je nach geologischem Untergrund verschieden sind. Diese Elemente können möglicherweise dort differenzieren, wo dies anhand von Strontiumisotopen nicht der Fall ist.

Unabhängig davon, welches oder welche Kriterien man letztendlich heranzieht, ist darauf zu achten, dass die festgestellten Signale biogenen Ursprungs sind und nicht auf Kontamination während der Bodenlagerung zurückgehen. Deshalb ist der Feststellung diagenetischer Veränderungen, insbesondere bei Knochenmaterial, in Zukunft vermehrte Aufmerksamkeit zu widmen und an Methoden zu ihrer Beseitigung zu arbeiten.

In Bezug auf eine kulturwissenschaftliche Interpretation von Messdaten sollte man sich immer bewusst sein, dass diese auf Variationen im biologisch verfügbaren Strontium zurückgehen. Die größtenteils noch auszuarbeitenden Strontiumisotopenprovinzen decken sich wohl nur in den seltensten Fällen mit den Hauptverbreitungsgebieten verschiedener Elemente der materiellen Kultur, so dass sich ein strontiumisotopisch fremdes Individuum nicht auch durch eine fremde materielle Kultur auszeichnen muss. Andererseits können Strontiumisotopenprovinzen auch über die Grenzen von archäologischen Kulturen hinausgehen, so dass Strontiumisotopenanalysen in diesen Fällen nichts zur Interpretation von archäologisch sichtbaren Fremdeinflüssen beitragen können (vgl. Abb. 21).

In Zukunft gilt es, sowohl Knochenmaterial als auch die Überreste des menschlichen kulturellen Schaffens gleichermaßen als Quellen für verschiedene Fragestellungen heranzuziehen. In der seit jüngerer Zeit wieder auflebenden archäologischen Diskussion um menschliche Mobilität sollten auch die Ergebnisse naturwissenschaftlicher Untersuchungen einen Platz finden. Die bisher vorgelegten archäologischen Beiträge enthalten andererseits viele Aspekte, die der Strontiumisotopenforschung Anregungen zur Entwicklung neuer Fragestellungen und gezielter, systematischer Durchführung von Forschungsprojekten geben können.

Eine reflektierende Verknüpfung verschiedener natur- und kulturwissenschaftlicher Daten, die aus den menschlichen Überresten selbst und den mit ihnen hinterlassenen Artefakten gewonnen werden können, verspricht in Zukunft weitere, fundierte Erkenntnisse nicht nur über den Stellenwert von Mobilität in verschiedenen menschlichen Gesellschaften, sondern auch über Aspekte des Rohmaterial- und Warenaustauschs sowie der wirtschaftlichen Nutzung des Umlandes von Siedlungsstellen. Strontiumisotopenanalysen haben ein großes Potential, dabei einen wichtigen Stellenwert einzunehmen.

ANHANG

Probenaufbereitung und Messung von Strontiumisotopenverhältnissen

Wichtigstes Hilfsmittel zur Probenentnahme für Strontiumisotopenanalysen ist ein Zahnarztbohrer, der mit verschiedenen Bohrvorsätzen bestückt werden kann. Mit seiner Hilfe ist zunächst die Oberfläche der zu beprobenden Stelle zu entfernen, da hier schon zu Lebzeiten oder während der Bodenlagerung Elementaustauschvorgänge stattfinden, oder winzige, kaum sichtbare Sedimentreste anhaften können. Danach erfolgt die eigentliche Probenentnahme. Proben können entweder als Pulver aus dem Zahn oder Knochen herausgefräst oder als kleine Stückchen, deren Oberfläche allseitig entfernt wurde, präpariert werden. Die Probenmenge richtet sich nach der Fragestellung, der Anzahl der zu untersuchenden Parameter (nur Strontiumisotopie oder auch Spurenelemente, Sauerstoffisotopen etc.), der Durchführung von weiteren Aufbereitungs- und Reinigungsschritten und der Art und Bedienungsweise des eingesetzten Massenspektrometers. Steht ausreichend Probenmaterial zur Verfügung, und sind die im folgenden zu beschreibenden Aufbereitungsschritte sowie neben Strontiumisotopie andere Untersuchungen angestrebt, so empfiehlt es sich, bei Zahn- oder Knochenmaterial mindestens 20 mg zu entnehmen. Dies würde bei Zahnschmelz ungefähr einer Kavität von 2×3 mm bei einer Tiefe von 1 mm entsprechen. Für Strontiumisotopenmessungen mit einem Thermionenmassenspektrometer (TIMS) können auch wenige Milligramm Probenmaterial genügen.

Weitere Aufbereitungsschritte dienen der Lösung von während der Bodenlagerung ausgefällten sekundären Mineralisationen, die leichter löslich als das Knochen- oder Zahnmaterial selbst sind. Die Proben werden hierzu nacheinander mit Wasser, 5%iger Essigsäure und nochmals Wasser versetzt und jeweils für ca. 15 min. in einem Ultraschallbad behandelt. Nach dem Zentrifugieren und Trocknen werden die Proben bei ca. 850°C für 10h im Muffelofen verascht, um die organischen Bestandteile zu entfernen. Die Dauer der Ultraschallbäder, Art und Konzentration von Säuren und die Dauer des Veraschens kann je nach Bearbeiter verschieden sein¹⁰⁹.

Danach wird die Probe mit Hilfe von konzentrierter Salpetersäure aufgeschlossen, d.h. in Lösung gebracht. Für Strontiumisotopenuntersuchungen ist es nötig, alle anderen Elemente von der Probe abzutrennen und nur reines Strontium zu analysieren. Diese Abtrennung erfolgt in einem Reinraumlabor mit Hilfe von Kationenaustauschersäulen. Diese Quarzglassäulen sind mit einem Harz gefüllt, auf das die Probenlösung gegeben wird. Dabei werden H⁺-Ionen im Harz durch Probenionen mit gleicher Ladung ersetzt. Die Kationen der verschiedenen jetzt im Harz befindlichen Elemente können durch Auftragen bestimmter Säuremengen nacheinander eluiert (herausgespült) werden. Jede Säule muss dazu eigens geeicht sein. Man gibt also eine bestimmte Säuremenge auf, um alle Elemente, die das Harz leichter als Strontium verlassen, abzugreifen. Mit der nächsten bestimmten Säuremenge erhält man eine Lösung mit reinem Strontium und kann durch weitere Hinzugabe von bestimmten Säuremengen weitere Elemente, wie die seltenen Erden Samarium und Neodym, abtrennen.

Das nun von anderen Elementen getrennte Strontium kann mit Hilfe eines Massenspektrometers auf seine isotopische Zusammensetzung untersucht werden. Hierzu werden TIMS (Thermionenmassenspektrometer) oder ICP-MS (*Inductively coupled plasma mass spectrometer*) eingesetzt. Das Massenspektrometer ermittelt die Konzentrationen der gemessenen Isotope in ppb oder ppm und gibt sie über einen Computer aus. Die Division von ⁸⁷Sr durch ⁸⁶Sr ergibt das für archäologische Fragestellungen relevante Strontiumisotopenverhältnis.

LITERATUR

- Adams 1968: W. Y. Adams, Invasion, diffusion, evolution? *Antiquity* 42, 194-215.
- Adler 1987: W. Adler, Gustaf Kossinna. In: R. Hachmann (Hrsg.), *Studien zum Kulturbegriff in der Vor- und Frühgeschichtsforschung*. Saarbrücker Beiträge zur Altertumskunde 48 (Bonn) 33-56.
- Altherr et al. 1999: R. Altherr/F. Hentjes-Kunst/C. Langer/J. Otto, Interaction between crustal-derived felsic and mantle derived mafic magmas in the Oberkirch pluton (European Variscides, Schwarzwald, Germany). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 137, 304-322.
- Ammerman/Cavalli-Sforza 1984: A. J. Ammerman/L. L. Cavalli-Sforza, *The Neolithic transition and the genetics of populations in Europe* (Princeton, New Jersey).
- Andresen 2000: M. Andresen, Comment on: S. Burmeister, Archaeology and migration. Approaches to an archaeological proof of migration. *Current Anthropology* 41/4, 553-554.
- Anthony 1990: D. W. Anthony, Migration in archeology: The baby and the bathwater. *American Anthropologist* 92, 895-914.
- 1992: D. W. Anthony, The bath refilled: Migration in archeology again. *American Anthropologist* 94, 174-176.
- 1997: D. W. Anthony, Prehistoric migration as a social progress. In: J. Chapman/H. Hamerow (Hrsg.), *Migrations and invasions in archaeological explanation*. BAR International Series 664 (Oxford) 21-32.

¹⁰⁹ In eigenen, bisher nicht vorgelegten Experimenten untersuchte ich die Auswirkung von fünf verschiedenen Reinigungs- bzw. Aufbereitungsmethoden und konnte

kaum Unterschiede zwischen chemisch behandelten und veraschten und nur mechanisch gereinigten Proben feststellen.

- 2000: D. W. Anthony, Comment on: S. Burmeister, Archaeology and migration. Approaches to an archaeological proof of migration. *Current Anthropology* 41/4, 554-555.
- Arnold/Scharbert 1973: A. Arnold/H. G. Scharbert, Rb-Sr Altersbestimmungen an Granuliten der südlichen Böhmisches Masse in Österreich. *Schweizerische mineralogische und petrochemische Mitteilungen* 53, 61-78.
- Aubert et al. 2002: D. Aubert/A. Probst/P. Stille/D. Viville, Evidence of hydrological control of Sr behavior in stream water (Strengbach catchment, Vosges mountains, France). *Applied Geochemistry* 17/3, 285-300.
- Balasse 2003: M. Balasse, Potential biases in sampling design and interpretation of intra-tooth isotope analysis. *International Journal of Osteoarchaeology* 13, 3-10.
- Balasse et al. 2002: M. Balasse/S. H. Ambrose/A. B. Smith/T. D. Price, The seasonal mobility model for prehistoric herders in the south-western Cape of South Africa assessed by isotopic analysis of sheep tooth enamel. *Journal Arch. Science* 29, 917-932.
- Bar-Yosef/Khazanov 1992a: O. Bar-Yosef/A. Khazanov, Pastoralism in the Levant. Archaeological materials in anthropological perspectives. *Monographs in World Archaeology* 10 (Madison, Wisconsin; Prehistory Press).
- 1992b: O. Bar-Yosef/A. M. Khazanov, Introduction. In: O. Bar-Yosef/A. M. Khazanov, Pastoralism in the Levant. Archaeological materials in anthropological perspectives. *Monographs in World Archaeology* 10 (Madison, Wisconsin Prehistory Press) 1-9.
- Beard/Johnson 2000: B. L. Beard/C. M. Johnson, Strontium isotope composition of skeletal material can determine the birth place and geographic mobility of humans and animals. *Journal of Forensic Sciences* 45/II, 1049-1061.
- Benecke 1994: N. Benecke, Der Mensch und seine Haustiere. Die Geschichte einer jahrtausendealten Beziehung (Stuttgart).
- Bentley et al. 2002: R. A. Bentley/T. D. Price/J. Lüning/D. Gronenborn/J. Wahl/P. D. Fullager, Prehistoric migration in Europe: Strontium isotope analysis of early Neolithic skeletons. *Current Anthropology* 43/5, 799-804.
- 2003a: R. A. Bentley/R. Krause/T. D. Price/B. Kaufmann, Human mobility at the early Neolithic settlement of Vaihingen, Germany: Evidence from strontium isotope analysis. *Archaeometry* 45/3, 471-486.
- 2003b: R. A. Bentley/L. Chikhi/T. D. Price, The Neolithic transition in Europe: comparing broad scale genetic and local scale isotopic evidence. *Antiquity* 77/295, 63-66.
- Benz/van Willigen 1998: M. Benz/S. van Willigen (Hrsg.), Some new approaches to the Bell Beaker »phenomenon lost paradise...?. Proceedings of the 2nd meeting of the »Association Archéologie et Gobelets« Feldberg (Germany), 18th-20th April 1997. BAR International Series 690 (Oxford).
- Benzian 1987: H. Benzian, Grundlagen der Kollagenverteilung im menschlichen Knochen und im menschlichen Dentin. Immunhistochemische Darstellungen der Prokollagene vom Typ I und III sowie der Kollagene vom Typ IV, V und VI. Dissertation zur Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde am Fachbereich Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Freien Universität (Berlin).
- Bernbeck 1997: R. Bernbeck, Theorien in der Archäologie. UTB für Wissenschaft. Uni-Taschenbücher 1964 (Tübingen, Basel).
- Bickle et al. 1988: M. J. Bickle/S. M. Wickham/H. J. Chapman/H. P. Taylor jr., A strontium, neodymium and oxygen isotope study of hydrothermal metamorphism and crustal anatexis in the Trois Seigneurs Massif, Pyrenees, France. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 100, 399-417.
- Binford 1962: L. R. Binford, Archaeology as anthropology. *American Antiquity* 28/3, 217-225.
- Böhlke/Horan 2000: J. K. Böhlke/M. Horan, Strontium isotope geochemistry of groundwaters and streams affected by agriculture, Locust Grove, MD. *Applied Geochemistry* 15, 599-609.
- Boyde 1989: A. Boyde, Enamel. In: B. K. B. Berkovitz/A. Boyde/R. M. Frank/H. J. Höhling/B. J. Moxham/J. Nalbandian/C. H. Tonge (Hrsg.), *Teeth* (Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo) 309-473.
- Bradley 1992: R. J. Bradley, Nomads in the archaeological record. Case studies in the northern Provinces of the Sudan. *Meroitica* 13 (Berlin).
- Brass 1975: G. Brass, The effect of weathering on the distribution of strontium isotopes in weathering profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 39, 1647-1653.
- Brass 1976: G. W. Brass, The variation of the marine ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratio during Phanerozoic time: interpretation using a flux model. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 40, 721-730.
- Brather 1996: S. Brather, »Germanische«, »slawische« und »deutsche« Sachkultur des Mittelalters – Probleme ethnischer Interpretation. *Ethnogr.-Arch. Zeitschr.* 37, 177-216.
- Brentjes 1981: B. Brentjes, Die Entwicklung des Nomadismus im Alten Orient nach archäologischen Quellen und unter Berücksichtigung der postglazialen Klimaschwankungen. In: R. Krusche (Red.), *Die Nomaden in Geschichte und Gegenwart. Beiträge zu einem internationalen Nomadismus-Symposium am 11. und 12. Dezember 1975 im Museum für Völkerkunde Leipzig. Veröffentlichungen des Museums für Völkerkunde zu Leipzig* 33 (Berlin) 41-48.

- Brewer/Lippolt 1973 M. S. Brewer/H. J. Lippolt, Isotopische Altersbestimmung an Schwarzwald-Gesteinen, eine Übersicht. *Fortschritte der Mineralogie* 50, Beih. 2, 42-50.
- 1974: M. S. Brewer/H. J. Lippolt, Rb-Sr age determinations of the pre-tectonic granites from the Southern Schwarzwald, SW Germany. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte* 1974/1, 28-41.
- Brockhaus 1998: Stichwort: Mobilität. In: Brockhaus. *Die Enzyklopädie in vierundzwanzig Bänden*. 20. überarbeitete und aktualisierte Auflage Band 14 (MAE-MOB) (Leipzig, Mannheim) 746-749.
- Budd et al. 2000: P. Budd/J. Montgomery/B. Barreiro/R. G. Thomas, Differential diagenesis of strontium in archaeological dental tissues. *Applied Geochemistry* 15, 687-694.
- 2003: P. Budd/C. Chenery/J. Montgomery/J. Evans, You are where you ate: isotopic analysis in the reconstruction of prehistoric residency. In: M. Parker Pearson (Hrsg.), *Food, culture and identity in the Neolithic and Early Bronze Age*. BAR International Series 1117 (Oxford) 69-78.
- Buddecke 1981: E. Buddecke, *Biochemische Grundlagen der Zahnmedizin* (Berlin, New York).
- Buhl et al. 1991: D. Buhl/R. D. Neuser/D. K. Richter/D. Riedel/B. Roberts/H. Strauss/J. Veizer, Nature and nurture: Environmental isotope story of the river Rhine. *Naturwissenschaften* 78, 337-346.
- Bullen et al. 1997: Th. Bullen/A. White/A. Blum/J. Harden/M. Schulz, Chemical weathering of a soil chronosequence on granitoid alluvium: II. Mineralogic and isotopic constraints on the behavior of strontium. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61/2, 291-306.
- Bürgers et al. 2000: H. Bürgers/M. M. Schweissing/G. Gruppe, Serielle Gebissanalysen von Strontiumisotopen zur zeitlichen Eingrenzung individueller Migration (Germanische Söldner, 4. Jh. n. Chr. Neuburg/Donau). *Homo* 51, Suppl. 14.
- Burke et al. 1982: W. H. Burke/R. E. Denison/E. A. Haetherington/T. B. Koepnick/N. F. Nelson/J. B. Otto, Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time. *Geology* 10, 516-519.
- Burmeister 1996: S. Burmeister, Migrationen und ihre archäologische Nachweisbarkeit. *Archäologische Informationen* 19/1&2, 13-21.
- 1997: S. Burmeister, Zum sozialen Gebrauch von Tracht. Aussagemöglichkeiten hinsichtlich des Nachweises von Migrationen. *Ethnogr.-Arch. Zeitschr.* 38, 177-203.
- 1998: S. Burmeister, Ursachen und Verlauf von Migrationen – Anregungen für die Untersuchung prähistorischer Wanderungen. *Studien zur Sachsenforschung* 11, 19-41.
- 2000a: S. Burmeister, Archaeology and migration. Approaches to an archaeological proof of migration. *Current Anthropology* 41/4, 539-553.
- 2000b: S. Burmeister, Reply to the comments on: S. Burmeister, Archaeology and migration. Approaches to an archaeological proof of migration. *Current Anthropology* 41/4, 559-561.
- Burton 1996: J. H. Burton, Trace elements in bone as paleodietary indicators. In: M. V. Orna, *Archaeological Chemistry. Organic, Inorganic, and Biochemical Analysis*. ACS Symposium Series 625 (Washington, D. C.) 327-333.
- 2003: J. H. Burton/T. D. Price, T. D. Cahue/L. E. Wright, L. E., The use of barium and strontium abundances in human skeletal tissues to determine their geographic origins. *International Journal of Osteoarchaeology* 13, 88-95.
- Burton et al. 1999: J. H. Burton/T. D. Price/W. D. Middleton, Correlation of bone Ba/Ca and Sr/Ca due to biological purification of calcium. *Journal of Arch. Science* 26, 609-616.
- Burton/Price 2002: J. H. Burton/T. D. Price, Alkaline-earth ratios in teeth as indicators of human mobility. Abstract. In: 33rd International Symposium on Archaeometry. 22-26 April 2002 (Program and Abstracts, Amsterdam) 159.
- Burton/Wright 1995: J. H. Burton/L. E. Wright, Nonlinearity in the relationship between bone Sr/Ca and diet: paleodietary implications. *American Journal of Physical Anthropology* 96, 273-282.
- Byrne 1978: W. J. Byrne, An archaeological demonstration of migration on the northern Great Plains. In: R. C. Dunne/E. S. Hall Jr., *Archaeological essays in honor of Irving B. Rouse*. Studies in Anthropology 2 (The Hague) 247-273.
- Calvez/Lippolt 1980: J. Y. Calvez/H. J. Lippolt, Strontium isotope constraints to the Rhine Graben volcanism. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen* 139/1, 59-81.
- Carlson 1996: A. K. Carlson, Lead isotope analysis of human bone for addressing cultural affinity: a case study from Rocky Mountain House, Alberta. *Journal Arch. Science* 23, 557-567.
- Chadwick et al. 1999: O. A. Chadwick/L. A. Derry/P. M. Vitousek/B. J. Huebert/L. O. Hedin, Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature* 397, 1999, 491-497.
- Chamberlain et al. 1997: C. P. Chamberlain/J. D. Blum/R. T. Holmes/X. Feng/T. W. Sherry/G. R. Graves, The use of isotope tracers for identifying populations of migratory birds. *Oecologia* 109, 132-141.
- Champion 1990: Th. Champion, Migration revived. *Journal of Danish Archaeology* 9, 214-218.

- Chang 1993: C. Chang, Pastoral transhumance in the southern Balkans as a social ideology: Ethnoarchaeological research in northern Greece. *American Anthropologist* 95/3, 687-703.
- Chapman 1997: J. Chapman, The impact of modern invasions and migrations on archaeological explanation. In: J. Chapman/H. Hamerow (Hrsg.), *Migrations and invasions in archaeological explanation*. BAR International Series 664 (Oxford) 11-20.
- Chapman/Dolukhanov 1992: J. Chapman/P. M. Dolukhanov, The Baby and the bathwater: Pulling the plug on Migrations. *American Anthropologist* 94, 169-174.
- Chapman/Hamerow 1997a: J. Chapman/H. Hamerow, Introduction: On the move again – migrations and invasions in archaeological explanation. In: J. Chapman/H. Hamerow (Hrsg.), *Migrations and invasions in archaeological explanation*. BAR International Series 664 (Oxford) 1-10.
- 1997b: J. Chapman/H. Hamerow, Migrations and invasions in archaeological explanation. BAR International Series 664 (Oxford).
- Chiaradia et al. 2003: M. Chiaradia/A. Gallay/W. Todt, Different contamination styles of prehistoric human teeth at a Swiss necropolis (Sion, Valais) inferred from lead and strontium isotopes. *Applied Geochemistry* 18, 353-370.
- Childe 1950: V. G. Childe, *Prehistoric migrations in Europe*. Institutet for Sammenlignende Kulturforskning, A 20 (Oslo).
- 1957: V. G. Childe, *The dawn of European civilization* (London).
- Christansen 2001: P. Christiansen, The skeleton in primary hyperparathyroidism: A review focussing on bone remodeling, structure, mass, and fracture. *APMIS Suppl.* 102, Vol. 109, 1-52.
- Clark 1966: G. Clark, The invasion hypothesis in British archaeology. *Antiquity* 40, 1966, 172-189.
- 1994: G. A. Clark, Migration as an explanatory concept in Paleolithic archaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory* 1/4, 305-343.
- Clarke 1968: D. L. Clarke, *Analytical Archaeology* (London).
- 1975: G. Clarke, Popular movements and late Roman cemeteries. *World Archaeology* 7/1, 1975, 46-56.
- Cliff 1971: R. A. Cliff, Strontium isotope distribution in a regionally metamorphosed granite from the Zentralgneis, south-east Tauernfenster, Austria. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 32, 274-288.
- Close 1990: A. E. Close, Living on the edge: Neolithic herders in the eastern Sahara. *Antiquity* 64, 79-96.
- Cochran et al. 1994: M. Cochran/M. Cochran/A. Neville/E. A. Marshall, Comparison of bone formation rates measured by radiocalcium kinetics and double-tetracycline labeling in maintenance dialysis patients. *Calcified Tissue International* 54, 392-398.
- Cohen 1992: R. Cohen, The nomadic or semi-nomadic Middle Bronze Age I settlements in the Central Negev. In: O. Bar-Yosef/A. M. Khazanov (Hrsg.), *Pastoralism in the Levant*. Archaeological materials in anthropological perspectives. *Monographs in World Archaeology* 10 (Madison, Wisconsin) 105-131.
- Comar 1963: C. L. Comar, Some over-all aspects of strontium-calcium discrimination. In: R. H. Wasserman (Hrsg.), *The transfer of calcium and strontium across biological membranes* (New York) 405-418.
- Comar et al. 1957: C. L. Comar/R. S. Russell/R. H. Wasserman, Strontium-calcium movement from soil to man. *Science* 126/3272, 485-492.
- Conti et al. 2000: A. Conti/E. Sacchi/M. Chiarle/G. Martignelli/G. M. Zuppi, Geochemistry of the formation waters in the Po plain (Northern Italy): an overview. *Applied Geochemistry* 15, 51-65.
- Cox/Sealy 1997: G. Cox/J. Sealy, Investigating identity and life histories. Isotopic analysis and historical documentation of slave skeletons found on the Cape Town foreshore, South Africa. *International Journal of Historical Archaeology* 1/3, 207-224.
- Crawford 1922: O. G. S. Crawford, A prehistoric invasion of England. *The Antiquaries Journal* 2, 27-35.
- Cribb 1991: R. Cribb, *Nomads in archaeology*. New Studies in Archaeology (Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney).
- Dasch 1969: E. J. Dasch, Strontium isotopes in weathering profiles, deep sea sediments, and sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 33, 1521-1552.
- Davis-Kimball et al. 1995: J. Davis-Kimball/V. A. Bashilov/L. T. Yablonsky, *Nomads of the Eurasian steppes in the Early Iron Age* (Berkeley).
- Dittmer 1965: K. Dittmer, Zur Entstehung des Rinderhirtennomadismus. *Paideuma* 11, 8-23.
- Drach et al. 1974: V. v. Drach/H. J. Lippolt/M. S. Brewer, Rb-Sr-Altersbestimmungen an Graniten des Nordschwarzwaldes. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen* 123/1, 38-62.
- Dupras/Schwarcz 2001: T. L. Dupras/H. P. Schwarcz, Strangers in a strange land: stable isotope evidence for human migration in the Dakhleh Oasis, Egypt. *Journal Arch. Science* 28, 1199-1208.
- Durand et al. 1999: S. R. Durand/P. H. Shelley/R. C. Antweiler/H. E. Taylor, Trees, chemistry, and prehistory in

- the American Southwest. *Journal Arch. Science* 26, 185-203.
- Eastell et al. 1988: R. Eastell/P. D. Delmas/S. F. Hodgson/E. F. Eriksen/K. G. Mann/B. L. Riggs, Bone formation rate in older normal women: Concurrent assessment with bone histomorphometry, calcium kinetics, and biochemical markers. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 67/4, 741-748.
- Egg/Spindler 1992: M. Egg/K. Spindler, Die Gletschermumie vom Ende der Steinzeit aus den Ötztaler Alpen. Ein Vorbericht. *Jahrbuch RGZM* 39, 1-113.
- Eggert 1988: M. K. H. Eggert, Die fremdbestimmte Zeit: Überlegungen zu einigen Aspekten von Archäologie und Naturwissenschaft. *Hephaistos* 9, 43-59.
- Elias et al. 1982: R. W. Elias/H. Yoshimitsu/C. C. Patterson, The circumvention of the natural biopurification of calcium along nutrient pathways by atmospheric inputs of industrial lead. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 46, 2561-2580.
- Engelhardt 1991: B. Engelhardt, Beiträge zur Kenntnis der Glockenbecherkultur in Niederbayern. Kurze Einführung in die Glockenbecherkultur. In: K. Schmotz (Hrsg.), *Vorträge des 9. Niederbayerischen Archäologentages* (Deggendorf) 65-84.
- English et al. 2001: N. B. English/J. L. Betancourt/J. S. Dean/J. Quade, Strontium isotopes reveal distant sources of architectural timber in Chaco Canyon, New Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98/21, 11891-11896.
- Ericson 1981: J. E. Ericson, Residence patterns by isotopic characterization. Paper presented at the Society for American Archaeology, San Diego, CA. Zitiert nach Price et al. 2002.
- 1985: J. E. Ericson, Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology. *Journal of Human Evolution* 14, 503-514.
- Eriksen 1986: E. F. Eriksen, Normal and pathological remodeling of human trabecular bone: Three dimensional sequence in normals and in metabolic bone disease. *Endocrine Reviews* 7/4, 379-408.
- Ezzo et al. 1997: J. A. Ezzo/C. M. Johnson/T. D. Price, Analytical perspectives on prehistoric migration: A case study from east Central Arizona. *Journal Arch. Science* 24, 447-466.
- Ezzo/Price 2002: J. A. Ezzo/T. D. Price, Migration, regional reorganization, and spatial group composition at Grasshopper Pueblo, Arizona. *Journal Arch. Science* 29, 499-520.
- Fabig 2002: A. Fabig, Spurenelementuntersuchungen an bodengelagertem Skelettmaterial. Validitätserwägungen im Kontext diagenetisch bedingter Konzentrationsänderungen des Knochenmaterials. Dissertation Göttingen.
- Faure 1986: G. Faure, Principles of isotope geology (New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore).
- Faure/Powell 1972: G. Faure/J. L. Powell, Strontium isotope geology (Berlin, Heidelberg, New York).
- Flintrop et al. 1996: C. Flintrop/B. Hohmann/T. Jasper/Chr. Korte/O. G. Podlaha/S. Scheele/J. Veizer, Anatomy of pollution: Rivers of north Rhine-Westphalia, Germany. *American Journal of Science* 296, 58-98.
- Frank/Nalbandian 1989a: R. M. Frank/J. Nalbandian, Development of Dentine and Pulp. In: B. K. B. Berkovitz/A. Boyde/R. M. Frank/H. J. Höhling/B. J. Moxham/J. Nalbandian/C. H. Tonge, *Teeth* (Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo) 73-171.
- 1989b: R. M. Frank/J. Nalbandian, Structure und ultrastructure of dentine. In: B. K. B. Berkovitz/A. Boyde/R. M. Frank/H. J. Höhling/B. J. Moxham/J. Nalbandian/C. H. Tonge, *Teeth* (Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo) 173-247.
- Frankel 2000: D. Frankel, Migration and ethnicity in prehistoric Cyprus: Technology and *habitus*. *European Journal of Archaeology* 3/2, 167-187.
- Frost 1969: H. M. Frost, Tetracycline-based histological analysis of bone remodeling. *Calcified Tissue Research* 3, 211-237.
- 1985: H. M. Frost, The »New Bone«: Some anthropological potentials. *Yearbook of Physical Anthropology* 28, 211-226.
- Gale 1981: N. H. Gale, Mediterranean obsidian source characterisation by strontium isotope analysis. *Archaeometry* 23/1, 41-51.
- Gale et al. 1988: N. H. Gale/H. C. Einfalt/H. W. Hubberten/R. E. Jones, The sources of Mycenaean gypsum. *Journal Arch. Science* 15, 57-72.
- Gallet et al. 1998: S. Gallet/B. Jahn/B. van Vilet Lanoë/A. Dia/E. Rossello, Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth and Planetary Science Letters* 156, 157-172.
- Gebauer/Grünenfelder 1979: D. Gebauer/M. Grünenfelder, U-Pb Zircon and Rb-Sr mineral dating of eclogites and their country rocks. Example: Münchberg Gneiss Massif, northeast Bavaria. *Earth and Planetary Science Letters* 42, 35-44.
- Gebühr 1997: M. Gebühr, Überlegungen zum archäologischen Nachweis von Wanderungen am Beispiel der angelsächsischen Landnahme in Britannien. *Arch. Inf.* 20/1, 11-24.
- Geddes 1983: D. S. Geddes, Neolithic transhumance in the Mediterranean Pyrenees. *World Archaeology* 15/1, 51-66.

- Gerhard 1953: K. Gerhardt, Die Glockenbecherleute in Mittel- und Westdeutschland. Ein Beitrag zur Paläanthropologie Eurafrikas (Stuttgart).
- 1976: K. Gerhardt, Anthropotypologie der Glockenbecherleute in ihren Ausschwärmelandschaften. In: J. N. Lan-ting/J. D. van der Waals (Red.), Glockenbecher Symposium Oberried 1974 (Bussum/Haarlem) 147-166.
- Gilbert 1983: A. S. Gilbert, On the origins of specialized nomadic pastoralism in western Iran. *World Archaeology* 15/1, 105-119.
- Gilead 1992: I. Gilead, Farmers and herders in southern Israel during the Chalcolithic period. In: O. Bar-Yosef/A. M. Khazanov (Hrsg.), Pastoralism in the Levant. Archaeological materials in anthropological perspectives. Monographs in World Archaeology 10 (Madison, Wisconsin) 29-39.
- Gimbutas 1994: M. Gimbutas, Das Ende Alteuropas. Der Einfall von Steppennomaden aus Südrussland und die Indogermanisierung Mitteleuropas. Innsbrucker Beiträge zur Kulturwissenschaft. Sonderheft 90. *Archaeolingua Series Minor* (Innsbruck).
- 1997: M. Gimbutas, The Kurgan Culture and the Indo-Europeanization of Europe. Selected articles from 1952 to 1993. Ed. by M. R. Dexter and K. Jones-Bley. *Journal of Indo-European Studies Monograph* 18 (Washington, D. C.).
- Gordon 1988: B. C. Gordon, Of men and reindeer herds in French Magdalenian prehistory. *BAR International Series* 390 (Oxford).
- Gosz et al. 1983: J. R. Gosz/D. G. Brookins/D. I. Moore, Using strontium isotope ratios to estimate inputs to ecosystems. *BioScience* 33/1, 23-30.
- Grauert et al. 1974: B. Grauert/R. Hännig/G. Soptrajanova, Geochronology of a polymetamorphic and anatectic gneiss region: The Moldanubicum of the area Lam-Degendorf, Eastern Bavaria, Germany. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 45, 37-63.
- Graustein 1988: W. C. Graustein, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios measure the sources and flow of strontium in terrestrial ecosystems. In: P. W. Rundel/J. R. Ehleringer/K. A. Nagy (Hrsg.), Stable isotopes in ecological research (New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo) 491-512.
- Graustein/Armstrong 1983: W. C. Graustein/R. L. Armstrong, The use of strontium-87/strontium-86 ratios to measure atmospheric transport into forested watersheds. *Science* 219, 289-292.
- Groenman-van Waateringe 1992: W. Groenman-van Waateringe, Analysis of the hides and skins from the Hauslabjoch. *Jahrbuch RGZM* 39, 114-128.
- Grupe 1995: G. Grupe, Reconstructing migration in the Bell Beaker period by $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratios in teeth and bones. In: R. J. Radlanski/H. Renz (Hrsg.), Proceedings of the 10th international symposium on dental morphology (Berlin) 339-342.
- 1998: G. Grupe, Archives of childhood. In: K. W. Alt/F. W. Rösing/M. Teschler-Nicola (Hrsg.), *Dental Anthropology. Fundamentals, Limits, and Perspectives* (Wien, New York) 337-347.
- Grupe et al. 1997: G. Grupe/T. D. Price/P. Schröter/F. Söllner/C. M. Johnson/B. L. Beard, Mobility of Bell Beaker people revealed by strontium isotope ratios of tooth and bone: a study of southern Bavarian skeletal remains. *Applied Geochemistry* 12, 517-525.
- 1999: G. Grupe/T. D. Price/P. Schröter/F. Söllner/C. M. Johnson/B. L. Beard, Mobility of Bell Beaker people revealed by Sr isotope ratios of tooth and bone: a study of southern Bavarian skeletal material: A reply to the comments by Peter Horn and Dieter Müller-Sohnius. *Applied Geochemistry* 14, 217-275.
- Grupe et al. 2001: G. Grupe/T. D. Price/P. Schröter, Zur Mobilität der Glockenbecherkultur. Eine archäometrische Analyse südbayerischer Skelettfunde. In: A. Lippert/M. Schultz/S. Shennan/M. Teschler-Nicola (Hrsg.), Mensch und Umwelt während des Neolithikums und der Frühbronzezeit in Mitteleuropa. Ergebnisse interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Archäologie, Klimatologie, Biologie und Medizin. Internationaler Workshop vom 9.-12. November 1995. Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Wien. Internationale Archäologie: Arbeitsgemeinschaft, Symposium, Tagung, Kongress 2 (Rahden/Westf.) 207-213.
- Gulson et al. 1997: B. L. Gulson/C. W. Jameson/B. R. Gillings, Stable lead isotopes in teeth as indicators of past domicile – A potential new tool in forensic science? *Journal of Forensic Science* 42/2, 787-791.
- Hachmann 1970: R. Hachmann, Die Goten und Skandinavi- en. Quellen und Forschungen zur Sprach- und Kulturgeschichte der germanischen Völker 34 (158) (Berlin).
- Hägg 1996: I. Hägg, Textil und Tracht als Zeugnis von Bevölkerungsverschiebungen. *Arch. Inf.* 19/1&2, 135-147.
- Hahn 1983a: J. Hahn, Eiszeitliche Jäger zwischen 35000 und 15000 Jahren vor heute. In: H. Müller-Beck, *Urgeschichte in Baden-Württemberg* (Stuttgart) 273-330.
- 1983b: J. Hahn, Die frühe Mittelsteinzeit. In: H. Müller-Beck, *Urgeschichte in Baden-Württemberg* (Stuttgart) 364-392.
- Haiman 1992: M. Haiman, Sedentari-ism and pastoralism in the Negev Highlands on the Early Bronze Age: Results of the western Negev Highlands emergency survey. In: O. Bar-Yosef/A. M. Khazanov (Hrsg.), Pastoralism in the Levant. Archaeological materials in anthropological perspectives. Monographs in World Archaeology 10 (Madison, Wisconsin) 93-104.

- Härke 1997: H. Härke, Wanderungsthematik, Archäologen und politisches Umfeld. Arch. Inf. 20/1, 61-71.
- 1998: H. Härke, Archaeologists and migrations. A problem of attitude? Current Anthropology 39/1, 19-24.
- Häusler 1996: A. Häusler, Invasionen aus den nordpontischen Steppen nach Mitteleuropa im Neolithikum und in der Bronzezeit: Realität oder Phantasieprodukt? Arch. Inf. 19/1&2, 75-88.
- Hedges 2002: R. E. M. Hedges, Bone diagenesis: an overview of processes. Archaeometry 44/3, 319-328.
- Herzog 1982: R. Herzog, Der Nomadismus in der Sahara. Geographische Rundschau 34/6, 275-279.
- Hess et al. 1986: J. Hess/M. L. Bender/J.-G. Schilling, Evolution of the ratio of strontium-87 to strontium-86 in seawater from Cretaceous to present. Science 231, 979-984.
- Higgs 1975: E. S. Higgs (Hrsg.), Palaeoeconomy (Cambridge).
- Hillson 1986: S. Hillson, Teeth. Cambridge Manuals in Archaeology (Cambridge).
- Hofmann/Köhler 1973: A. Hofmann/H. Köhler, Whole-rock Rb-Sr ages of anatectic gneisses from the Schwarzwald, SW-Germany. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen 119/2, 163-187.
- Höhling 1989: H. J. Höhling, Special aspects of biomineralization of dental tissues. In: B. K. B. Berkovitz/A. Boyde/R. M. Frank/H. J. Höhling/B. J. Moxham/J. Nalbandian/C. H. Tonge, Teeth (Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo) 475-524.
- Hoika, 1996: J. Hoika, Völkerwanderungen. Eine Einleitung. Arch. Inf. 19/1&2, 9-12.
- Höpfel et al. 1992: F. Höpfel/W. Platzer/K. Spindler, Der Mann im Eis 1. Bericht über das Internationale Symposium ²1992 in Innsbruck. Veröffentlichungen der Universität Innsbruck 187 (Innsbruck).
- Hoogewerff et al. 2001: J. Hoogewerff/W. Papesch/M. Kralik/M. Berner/P. Vroon/H. Miesbauer/O. Gaber/K.-H. Künzler/J. Kleinjans, The last domicile of the Iceman from Hauslabjoch: A geochemical approach using Sr, C and O isotopes and trace element signatures. Journal Arch. Science 28, 983-989.
- Hoppe et al. 1999: K. A. Hoppe/P. L. Koch/R. W. Carlson/S. D. Webb, Tracking mammoths and mastodons: Reconstruction of migratory behavior using strontium isotope ratios. Geology 27/5, 439-442.
- 2003: K. A. Hoppe/P. L. Koch/T. T. Furutani, Assessing the preservation of biogenic strontium in fossil bones and tooth enamel. International Journal of Osteoarchaeology 13, 20-28.
- Horn et al. 1985: P. Horn/D. Müller-Sohnius/H. Köhler/G. Graup, Rb-Sr systematics of rocks related to the Ries Crater, Germany. Earth and Planetary Science Letters 75, 384-392.
- 1994: P. Horn/St. Hölzl/D. Storz, Habitat determination on a fossil stag's mandible from the site of *Homo erectus heidelbergensis* at Mauer by use of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. Naturwissenschaften 81, 360-362.
- 1997: P. Horn/St. Hölzl/Th. Fehr, Spurenelemente und Isotopenverhältnisse in fossilen Knochen und Zähnen. In: Günther A. Wagner/Karl W. Beinbauer (Hrsg.), *Homo heidelbergensis* von Mauer. Das Auftreten des Menschen in Europa (Heidelberg) 144-166.
- Horn/Müller-Sohnius 1999: P. Horn/D. Müller-Sohnius, Comment on »Mobility of Bell Beaker people revealed by strontium isotope ratios of tooth and bone: a study of southern Bavarian skeletal remains« by Gisela Grupe, T. Douglas Price, Peter Schröter, Frank Söllner, Clark M. Johnson and Brian L. Beard. Applied Geochemistry 14, 263-269.
- Jacomet/Kreuz 1999: St. Jacomet/A. Kreuz, Archäobotanik. Aufgaben, Methoden und Ergebnisse vegetations- und agrargeschichtlicher Forschung (Stuttgart).
- Jaworski 1984: Z. F. G. Jaworski, Lamellar bone turnover system and its effector organ. Calcified Tissue International 36, S46-S55.
- Jettmar 1966: K. Jettmar, Die Entstehung der Reiternomaden. Saeculum 17, 1-11.
- Jochim 1993: M. A. Jochim, Henauhof-Nordwest – Ein mittelsteinzeitlicher Lagerplatz am Federsee. Materialhefte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 19 (Stuttgart).
- Jochim et al. 1999: M. Jochim/C. Herhahn/H. Starr, The Magdalenian colonization of southern Germany. American Anthropologist 101/1, 129-142.
- Jockenhövel 1991: A. Jockenhövel, Räumliche Mobilität von Personen in der mittleren Bronzezeit des westlichen Mitteleuropa. Germania 69/1, 49-62.
- Jones et al. 1994a: C. E. Jones/H. C. Jenkyns/A. L. Coe/S. P. Hesselbo, Strontium isotopic variations in Jurassic and Cretaceous seawater. Geochimica et Cosmochimica Acta 58, 3061-3074.
- 1994b: C. E. Jones/H. C. Jenkyns/S. P. Hesselbo, Strontium isotopes in Early Jurassic seawater. Geochimica et Cosmochimica Acta 58, 1285-1301.
- Jowsey/Gordan 1971: J. Jowsey/G. Gordan, Bone turnover and osteoporosis. In: G. H. Bourne, The biochemistry and physiology of bone. Vol. III. Development and growth (New York, London) 201-238.
- Kalt et al. 1994: A. Kalt/B. Grauert/A. Baumann, Rb-Sr and U-Pb isotope studies on migmatites from the Schwarzwald (Germany): constraints on isotopic resetting during

- Variscan high-temperature metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology* 12, 667-680.
- Karmyčeva 1981: B. Ch. Karmyčeva, Versuch einer Typologisierung der traditionellen Formen der Viehwirtschaft Mittelasiens und Kasachstans am Ende des 19./Anfang des 20. Jh. In: R. Krusche (Red.), *Die Nomaden in Geschichte und Gegenwart. Beiträge zu einem internationalen Nomadismus-Symposium am 11. und 12. Dezember 1975 im Museum für Völkerkunde Leipzig. Veröffentlichungen des Museums für Völkerkunde zu Leipzig* 33 (Berlin) 91-96.
- Katz/Bullen 1996: B. G. Katz/Th. D. Bullen, The combined use of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and carbon and water isotopes to study the hydrochemical interaction between groundwater and lakewater in mantled karst. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 5075-5087.
- Keller 1979: E. Keller, Das spätrömische Gräberfeld von Neuburg an der Donau. *Materialhefte zur Bayerischen Vorgeschichte A* 40 (Kallmünz/Opf.).
- Kent 1989: S. Kent, Cross-cultural perceptions of farmers as hunters and the value of meat. In: S. Kent (Hrsg.), *Farmers as hunters. The implications of sedentism. New Directions in Archaeology* (Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney) 1-36.
- Khazanov 1984: A. M. Khazanov, *Nomads and the outside world. Cambridge Studies in Social Anthropology* 44 (Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney).
- Kind 1998: J. Kind, Komplexe Wildbeuter und frühe Ackerbauern. Bemerkungen zur Ausbreitung der Linerbandkeramik im südlichen Mitteleuropa. *Germania* 76/1, 1-23.
- Klejn 1974: L. S. Klejn, Kossinna im Abstand von vierzig Jahren. *Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte* 58, 7-55.
- Klengel 1972: H. Klengel, *Zwischen Zelt und Palast. Die Begegnung von Nomaden und Sesshaften im alten Vorderasien* (Wien).
- Knacke-Loy 1994: O. Knacke-Loy, Isotopengeochemische, chemische und petrographische Untersuchungen zur Herkunftsbestimmung der bronzezeitlichen Keramik von Troia. *Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen* 77 (Heidelberg).
- Knacke-Loy et al. 1995: O. Knacke-Loy/M. Satir/E. Pernicka, Zur Herkunftsbestimmung der bronzezeitlichen Keramik von Troia: Chemische und isotopengeochemische (Nd, Sr, Pb) Untersuchungen. *Studia Troica* 5, 145-175.
- Knipper 2002: C. Knipper, Mobility, diet and diagenesis – Trace elemental analyses of faunal remains from southern Germany. Abstract. In: *33rd International Symposium on Archaeometry. 22-26 April 2002 Program and Abstracts* (Amsterdam). 160.
- 2003: C. Knipper, Regional variations of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Sr/Ca and Ba/Ca ratios as determined from animal remains from southern Germany. XV ICAES 2K3. *Humankind/Nature Interaction: Past, Present and Future*. (Florence) July 5th – 12th. Vortragsmanuskript. Publikation in Vorb.
- 2005: C. Knipper, Mobility, diet and diagenesis – Trace elemental analyses of faunal remains from southern Germany. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Archaeometry, 22-26 April 2002, Amsterdam. Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies* 3 (Amsterdam) 471-475.
- Knudson et al. 2001: K. J. Knudson/T. D. Price/J. E. Buikstra/D. E. Blom, Tiwanaku residential mobility as determined by strontium and lead isotope analyses. Paper presented in the symposium ›Resolution and Refinement: Leading Edge Research in Archaeological Chemistry‹ at the 66th Annual Meeting of the Society of American Archaeology, April 18-22 New Orleans.
- 2002: K. J. Knudson/T. D. Price/J. E. Buikstra/D. E. Blom, Strontium isotope analysis and migration in the South Central Andes: Tiwanaku colonization of the Osmore drainage. In: *33rd International Symposium on Archaeometry. 22-26 April. Program and Abstracts* (Amsterdam). 160.
- Koch et al. 1992: P. L. Koch/A. N. Halliday/L. M. Walter/R. F. Stearley/T. J. Huston/G. R. Smith, Sr isotopic composition of hydroxylapatite from recent and fossil salmon: the record of lifetime migration and diagenesis. *Earth and Planetary Science Letters* 108, 277-287.
- 1995: P. L. Koch/J. Heisinger/C. Moss/R. W. Carlson/M. L. Fogel/A. K. Behrensmeier, Isotopic tracking of change in diet and habitat use in African elephants. *Science* 267, 1340-1343.
- Köhler et al. 1974: H. Köhler/D. Müller-Sohnius/K. Cammann, Rb-Sr Altersbestimmungen an Mineral- und Gesamtgesteinsproben des Leuchtenberger und Flossenbürger Granits, NE Bayern. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen* 123/1, 63-85.
- Köhler/Müller-Sohnius 1980: H. Köhler/D. Müller-Sohnius, Rb-Sr systematics on the paragneiss series from the Bavarian Moldanubicum, Germany. *Contrib. Mineral. Petrol.* 71, 387-392.
- 1985: H. Köhler/D. Müller-Sohnius, Rb-Sr Altersbestimmungen und Sr-Isotopensystematik an Gesteinen des Regensburger Waldes (Moldanubikum NE Bayerns). *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen* 151/1, 1-28.
- Kohn et al. 1999: M. J. Kohn/M. J. Schoeninger/W. W. Barker, Altered states: Effects of diagenesis on fossil tooth chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63/18, 2737-2747.
- Kokabi 1988: M. Kokabi, Viehhaltung und Jagd im römischen Rottweil. *Arae Flaviae IV. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* 28 (Stuttgart).

- Koppers 1932: W. Koppers, Konnten Jägervölker Tierzüchter werden? *Biologia Generalis* 8, 179-186.
- Korte 1999: C. Korte, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -, $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^{13}\text{C}$ -Evolution des triassischen Meerwassers: Geochemische und stratigraphische Untersuchungen an Conodonten und Brachiopoden. *Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten*, 52 (Bochum).
- Kossinna 1911: G. Kossinna, Die Herkunft der Germanen. Zur Methode der Siedlungsarchäologie. *Mannus-Bibliothek* 9 (Leipzig).
- 1912: G. Kossinna, Die deutsche Vorgeschichte eine hervorragend nationale Wissenschaft. *Mannus-Bibliothek* 9 (Leipzig).
- 1921: G. Kossinna, Die Indogermanen. Ein Abriss. Teil 1: Das indogermanische Urvolk. *Mannus-Bibliothek* 26 (Leipzig).
- Kristiansen 1989: K. Kristiansen, Prehistoric migration – the case of the Single Grave and Corded Ware cultures. *Journal of Danish Archaeology* 8, 211-225.
- Krueger 1985: H. W. Krueger, Sr isotopes and Sr/Ca in bone. Poster Paper presented at the Biomineralization Conference. Airlie House (Warrenton, VA). April 14-17.
- Krüger 1977: B. Krüger, Zum Problem germanischer Wanderungen. In: J. Herrmann (Hrsg.), *Archäologie als Geschichtswissenschaft. Studien und Untersuchungen. Schriften zur Ur- und Frühgeschichte* 30 (Berlin) 225-233.
- Kuckenburg 2000: M. Kuckenburg, Vom Steinzeitlager zur Keltenstadt. Siedlungen in der Vorgeschichte in Deutschland (Darmstadt).
- Lacroix 1971: P. Lacroix, The internal remodelling of bones. In: G. H. Bourne, *The biochemistry and physiology of bone. Vol. III. Development and growth* (New York, London) 119-144.
- Land et al. 2000: M. Land/J. Ingri/P. S. Andersson/B. Öhlander, Ba/Sr, Ca/Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in soil water and groundwater: implications for relative contributions to stream water discharge. *Applied Geochemistry* 15, 311-325.
- Lanting/van der Waals 1974: J. N. Lanting/J. D. van der Waals (Red.), *Glockenbecher Symposium Oberried 1974* (Bussum/Haarlem).
- Lasker/Mascie-Taylor 1988: G. W. Lasker/C. G. N. Mascie-Taylor, The framework of migration studies. In: C. G. N. Mascie-Taylor/G. W. Lasker (Hrsg.), *Biological aspects of human migration. Cambridge Studies in Biological Anthropology* (Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney) 1-13.
- Latkoczy et al. 1998: Ch. Latkoczy/Th. Prohaska/G. Stinger/M. Teschler-Nicola, Strontium isotope ratio measurements in prehistoric human bone samples by means of high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (HR-ICP-MS). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 13, 1998, 561-566.
- 1999: Ch. Latkoczy/Th. Prohaska/G. Stinger/M. Teschler-Nicola, Inductively coupled plasma sectorfield mass spectrometry (IPC-SFMS) for accurate and precise strontium isotope ratio measurements in prehistoric human bone samples. In: G. Holland/S. D. Tanner (Hrsg.), *Plasma Source Mass Spectrometry: New Developments and Applications* (Cambridge) 208-221.
- Lavelle/Armstrong 1993: M. Lavelle/R. A. Armstrong, Strontium isotope ratios in modern biogenic and chemical marine precipitates from southern Africa. *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Wetenskap* 89, 533-536.
- Leube 1995: A. Leube, Germanische Völkerwanderungen und ihr archäologischer Fundniederschlag. Das 5. und 6. Jh. östlich der Elbe. Ein Forschungsbericht (I). *Ethnogr.-Arch. Zeitschr.* 36, 3-84.
- 1996: A. Leube, Germanische Völkerwanderungen und ihr archäologischer Fundniederschlag. Slawisch-germanische Kontakte im nördlichen Elbe-Oder-Gebiet. Ein Forschungsbericht (II). *Ethnogr.-Arch. Zeitschr.* 36, 259-298.
- Levy 1983: Th. E. Levy, The emergence of specialized pastoralism in the southern Levant. *World Archaeology* 15/1, 15-36.
- 1992: Th. E. Levy, Transhumance, subsistence, and social evolution in the northern Negev desert. In: O. Bar-Yosef/A. M. Khazanov (Hrsg.), *Pastoralism in the Levant. Archaeological materials in anthropological perspectives. Monographs in World Archaeology* 10 (Madison, Wisconsin) 65-82.
- Lindholm et al. 1991: J. Lindholm/T. Steiniche/E. Rasmussen/G. Thomsen/I. O. Nielsen/H. Brockstedt-Rasmussen/T. Strom/L. Hyldstrup/Ch. Schou, Bone disorder in men with chronic alcoholism: a reversible disease? *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 73/1, 118-124.
- Lippolt et al. 1983: H. J. Lippolt/H. Schleicher/I. Raczek, Rb-Sr systematics of Permian volcanites in the Schwarzwald (SW-Germany). Part I: Space of time between plutonism and late orogenic volcanism. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 84, 272-280.
- Lipsinic et al. 1986: F. E., Lipsinic/E. Paunovic/G. D. Houston/S. F. Robison, Correlation of age and incremental lines in the cementum of human teeth. *Journal of Forensic Sciences* 31/2, 982-989.
- Lowenstam/Weiner 1989: H. A. Lowenstam/S. Weiner, *On biomineralization* (New York, Oxford).
- Lüning 1988: J. Lüning, Frühe Bauern in Mitteleuropa im 6. und 5. Jahrtausend v. Chr. *Jahrbuch RGZM* 35/1, 27-93.
- McArthur 1994: J. M. McArthur, Recent trends in strontium isotope stratigraphy. *Terra Nova* 6, 331-358.
- McArthur et al. 2000: J. M. McArthur/D. T. Donovan/M. F. Thirlwall/B. W. Fouke/D. Mathey, Strontium isotope profile of the early Toarcian (Jurassic) oceanic anoxic event,

- the duration of ammonite biozones, and belmentite palaeotemperatures. *Earth and Planetary Science Letters* 179, 269-285.
- Meadow 1996: R. H. Meadow, The origin and spread of agriculture and pastoralism in northwestern South Asia. In: D. H. Harris (Hrsg.), *The origins and spread of agriculture and pastoralism in Eurasia* (London) 390-412.
- Melsen/Mosekilde 1978: F. Melsen/L. Mosekilde, Tetracycline double-labeling of iliac trabecular bone in 41 normal adults. *Calcified Tissue International* 26, 99-102.
- Mengel et al. 1984: K. Mengel/U. Kramm/K. H. Wedepohl/E. Gohn, Sr isotopes in peridotite xenoliths and their basaltic host rocks from the northern Hessian depression (NW Germany). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 87, 369-375.
- Miller et al. 1988: C. S. Miller/S. B. Dove/J. A. Cottone, Failure of use of cemental annulations in teeth to determine the age of human. *Journal of Forensic Sciences* 33/1, 137-143.
- Miller et al. 1993: E. K. Miller/J. D. Blum/A. J. Friedland, Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering rates using Sr isotopes. *Nature* 362, 438-441.
- Montañez et al. 2000: I. P. Montañez/D. A. Osleger/L. E. Mack/M. L. Musgrove, Evolution of the Sr and C isotope composition of Cambrian oceans. *GSA Today* 10/5, 1-6.
- Montgomery et al. 1999: J. Montgomery/P. Budd/A. Cox/P. Krause/R. G. Thomas, LA-ICP-MS evidence for the distribution of lead and strontium in Romano-British, medieval and modern human teeth: implications for life history and exposure reconstruction. In: S. M. M. Young/A. M. Pollard/P. Budd/R. A. Ixer (Hrsg.), *Metals in Antiquity*. BAR International Series 792 (Oxford) 290-296.
- 2000: J. Montgomery/P. Budd/J. Evans, Reconstructing the lifetime movements of ancient people: A Neolithic case study from southern England. *European Journal of Archaeology* 3/3, 370-385.
- Mörrike et al. 1989: K. D. Mörrike/E. Betz/W. Mergenthaler, *Biologie des Menschen*. 12. völlig neu bearb. und erw. Aufl. (Heidelberg, Wiesbaden).
- Müller et al. 2002: W. Müller/H. Fricke/A. N. Halliday, Isotopic tracing of the Neolithic Alpine Iceman – Clues on his origin and migration. In: 33rd International Symposium on Archaeometry. 22-26 April. Program and Abstracts (Amsterdam) 161.
- 2003: W. Müller/H. Fricke/A. N. Halliday/M. T. McCulloch/J.-A. Wartho, Origin and migration of the Alpine Iceman. *Science* 302, 862-866.
- Myhre/Myhre 1972: B. M. Myhre/B. Myhre, The concept ›Immigration‹ in archaeological contexts illustrated by examples from west Norwegian and north Norwegian early Iron age. *Norwegian Archaeological Review* 5/1, 45-61.
- Négrel et al. 1997: P. Négrel/C. Fouillac/M. Brach, A strontium isotopic study of mineral and surface waters from the Cézallier (Massif Central, France): implications for mixing processes in areas of disseminated emergences of mineral waters. *Chemical Geology* 135, 89-101.
- Nelson et al. 1986: B. K. Nelson/M. J. DeNiro/M. J. Schoeninger/D. J. De Paolo/P. E. Hare, Effects of diagenesis on strontium, carbon, nitrogen, and oxygen concentration and isotopic composition of bone. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50, 1941-1949.
- Neustupný 1981: E. Neustupný, Mobilität der äneolithischen Populationen. *Slovenská Archeologia* 29/1, 1981, 111-119.
- 1982: E. Neustupný, Prehistoric migration by infiltration. *Arch. rozhledy* 34, 278-293.
- 1983: E. Neustupný, The demography of prehistoric cemeteries. *Památky Arch.* 74, 7-34.
- Nielsen-Marsh/Hedges 1997: C. M. Nielsen-Marsh/R. E. M. Hedges, Dissolution experiments on modern and diagenetically altered bone and the effect on the infrared splitting factor. *Bulletin de la Société Géologique de France* 168/4, 485-490.
- Ortner 1975: D. J. Ortner, Aging effects on osteon remodeling. *Calcified Tissue Research* 18, 27-36.
- Othman et al. 1997: D. B. Othman/J.-M. Luck/M.-G. Tournoud, Geochemistry and water dynamics: application to short time-scale flood phenomena in a small Mediterranean catchment I. Alkalis, alkali-earths and Sr isotopes. *Chemical Geology* 140, 9-28.
- Palmer/Elderfield 1985: M. R. Palmer/H. Elderfield, Sr isotope composition of seawater over the past 75 Myr. *Nature* 314/11, 526-528.
- Parfitt 1979: A. M. Parfitt, Quantum concept of bone remodeling and turnover: implications for the pathogenesis of osteoporosis. *Calcified Tissue International* 28, 1-5.
- 1984: A. M. Parfitt, The cellular basis of bone remodeling: the quantum concept reexamined in light of recent advances in the cell biology of bone. *Calcified Tissue International* 36, S37-S45.
- Parfitt et al. 2000: A. M. Parfitt/R. Travers/F. Rauch/F. H. Glorieux, Structural and cellular changes during bone growth in healthy children. *Bone* 27/4, 487-494.
- Pate 1994: F. D. Pate, Bone chemistry and paleodiet. *Journal of Archaeological Method and Theory* 1/2, 161-209.
- Paulus 2000: S. Paulus, Saisonalitätsrekonstruktion anhand von Sauerstoffisotopen an Equidenzähnen aus den Fundstellen Kalkriese und Dangstetten. unpubl. Magisterarbeit (Tübingen).

- Peterman et al. 1970: Z. E. Peterman/C. E. Hedge/H. A. Tourtelot, Isotopic composition of strontium in sea water throughout Phanerozoic time. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 34, 105-120.
- Pødenphant/Engel 1987: J. Pødenphant/U. Engel, Regional variations in histomorphometric bone dynamics from the skeleton of an osteoporotic woman. *Calcified Tissue International* 40, 184-188.
- Price 2001: T. D. Price (Hrsg.), *Europe's first farmers* (Cambridge; Cambridge University Press).
- Price et al. 1985: T. D. Price/M. Connor/J. D. Parsen, Bone chemistry and the reconstruction of diet: Strontium discrimination in white-tailed deer. *Journal Arch. Science* 12, 419-442.
- 1994a: T. D. Price/C. M. Johnson/J. A. Ezzo/J. Ericson/J. H. Burton, Residential mobility in the prehistoric southwest United States: A preliminary study using strontium isotope analysis. *Journal Arch. Science* 21, 315-330.
- 1994b: T. D. Price/G. Grupe/P. Schröter, Reconstruction of migration patterns in the Bell Beaker period by stable strontium isotope analysis. *Applied Geochemistry* 9, 413-417.
- 1998: T. D. Price/G. Grupe/P. Schröter, Migration in the Bell Beaker period in central Europe. *Antiquity* 72, 405-411.
- 2000: T. D. Price/L. Manzanilla/W. D. Middleton, Immigration and the ancient city of Teotihuacan in Mexico: a study using strontium isotope ratios in human bone and teeth. *Journal Arch. Science* 27, 903-913.
- 2001: T. D. Price/R. A. Bentley/J. Lüning/D. Gronenborn/J. Wahl, Prehistoric human migration in the Linearbandkeramik of Central Europe. *Antiquity* 75, 593-603.
- 2002: T. D. Price/J. H. Burton/R. A. Bentley, The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration. *Archaeometry* 44/1, 117-135.
- 2003: T. D. Price/J. Wahl/C. Knipper/E. Burger-Heinrich/G. Kurz/R. A. Bentley, Das bandkeramische Gräberfeld vom »Viesenhäuser Hof« bei Stuttgart-Mühlhausen: Neue Untersuchungsergebnisse zum Migrationsverhalten im frühen Neolithikum. *Fundberichte aus Baden-Württemberg* 27, 23-58.
- 2004: T. D. Price/C. Knipper/G. Grupe/V. Smrcka, Strontium isotopes and prehistoric migration: The bell beaker period in central Europe. *European Journal Arch.* 7/1, 9-40.
- Price/Bentley 2002: T. D. Price/R. A. Bentley, Strontium isotopes and Europe's first farmers: Migration and the Linearbandkeramik in central Europe. In: 33rd International Symposium on Archaeometry. 22-26 April. Program and Abstracts (Amsterdam) 159.
- Qing 1998: H. Qing/C. R. Barnes/D. Buhl/J. Veizer, The Sr isotopic composition of Ordovician and Silurian brachiopods and conodonts: relationships to geological events and implications for coeval seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62/10, 1721-1733.
- Richards et al. 1998: M. P. Richards/R. E. M. Hedges/T. I. Molleson/J. C. Vogel, Stable isotope analysis reveals variation in human diet at the Poundbury camp cemetery site. *Journal of Arch. Science* 25, 1247-1252.
- 2001: M. P. Richards/B. T. Fuller/R. E. M. Hedges, Sulphur isotopic variation in ancient bone collagen from Europe: implications for human palaeodiet, residence mobility, and modern pollutant studies. *Earth and Planetary Science Letters* 191, 185-190.
- Robertshaw/Collett 1983: P. T. Robertshaw/D. P. Collett, The identification of pastoral peoples in the archaeological record: an example from east Africa. *World Archaeology* 15/1, 67-78.
- Rolle et al. 1991: R. Rolle/M. Müller-Wille/K. Schietzel (Hrsg.), *Gold der Steppe. Archäologie der Ukraine* (Schleswig).
- Rouse 1986: I. Rouse, *Migrations in prehistory. Inferring population movement from cultural remains* (New Haven, London).
- Ruiz Zapatero 1997: G. Ruiz Zapatero, Migration revisited. Urnfields in Iberia. In: M. Díaz-Andreu/S. Keay, *The archaeology of Iberia. The dynamics of change* (London, New York) 158-174.
- Sangmeister 1972: E. Sangmeister, Sozial-ökonomische Aspekte der Glockenbecherkultur. *Homo* 23, 88-103.
- Schleicher et al. 1983: H. Schleicher/H. J. Lippolt/I. Raczek, Rb-Sr systematics of Permian volcanites in the Schwarzwald (SW-Germany). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 84, 281-291.
- Schlette 1977: F. Schlette, Zum Problem ur- und frühgeschichtlicher Wanderungen und ihres archäologischen Nachweises. In: J. Herrmann (Hrsg.), *Archäologie als Geschichtswissenschaft. Studien und Untersuchungen. Schriften zur Ur- und Frühgeschichte* 30 (Berlin) 39-44.
- Schoeninger 1979: M. J. Schoeninger, Diet and status at Chalcatzingo: Some empirical and technical aspects of strontium analysis. *American Journal of Physical Anthropology* 51, 295-310.
- Scholz 1994: F. Scholz, Nomadismus – Mobile Tierhaltung. Formen, Niedergang und Perspektiven einer traditionsreichen Lebens- und Wirtschaftsweise. *Geographische Rundschau* 46/2, 72-78.
- 1995: F. Scholz, Nomadismus. Theorie und Wandel einer sozio-ökologischen Kulturweise. *Erdkundliches Wissen* 118 (Stuttgart).

- Schroeder 1987: H. E. Schroeder, *Orale Strukturbio-
Entwicklungsgeschichte, Struktur und Funktion normaler
Hart- und Weichgewebe der Mundhöhle und des Kiefer-
gelenkes*. 3. überarb. und erw. Aufl. (Stuttgart, New
York).
- Schumacher et al. 1990: G.-H. Schumacher/H. Schmidt/H.
Börnig/W. Richter, *Anatomie und Biochemie der Zähne*
(Stuttgart, New York).
- Schwarcz et al. 1991: H. P. Schwarcz/L. Gibbs/M. Knyf,
Oxygen isotope analysis as an indicator of place of origin.
In: S. Pfeiffer/R. Williamson (Hrsg.), *Snake Hill: An In-
vestigation of a Military Cemetery from the War of 1812*
(Toronto) 263-268.
- Schweissing 1998: M. M. Schweissing, *Gebietsfremd oder
ortsansässig? Untersuchungen von völkerwanderungs-
zeitlichen Individuen mit künstlich deformierten Schädeln
mittels Analyse stabiler Strontium-Isotope*. *Homo* 49,
Suppl. 99.
- 2000: M. M. Schweissing, *Strontiumisotopie zur Erken-
nung gebietsfremder Individuen: Problematik und Lö-
sungsansätze am Beispiel einer spätrömischen Nekropole
aus Neuburg/Donau*. *Homo* 51, Suppl. 120.
- Schweissing/Grupe 2000: M. M. Schweissing/G. Grupe,
*Local or nonlocal? A research of strontium isotope ratios
of teeth and bones on skeletal remains with artificial
deformed skulls*. *Anthropologischer Anzeiger* 58/1, 99-
103.
- Schweissing/Grupe 2003a: M. M. Schweissing/G. Grupe,
*Stable strontium isotopes in human teeth and bone: a key
to migration events of the late Roman period in Bavaria*.
Journal Arch. Science 30, 1373-1383.
- 2003b: M. M. Schweissing/G. Grupe, *Tracing migration
events in man and cattle by stable strontium isotope
analysis of appositionally grown mineralized tissue*. *Inter-
national Journal of Osteoarchaeology* 13, 96-103.
- Sealy et al. 1991: J. C. Sealy/N. J. van der Merwe/A. Sillen/
F. J. Kruger/H. W. Krueger, *⁸⁷Sr/⁸⁶Sr as a dietary indicator
in modern and archaeological bone*. *Journal Arch. Science*
18, 399-416.
- Shennan 2000: S. Shennan, *Population, culture history, and
the dynamics of culture change*. *Current Anthropology*
41/5, 811-822.
- Sherratt 1981: A. Sherratt, *Plough and pastoralism: aspects of
the secondary products revolution*. In: I. Hodder/
G. Isaac/N. Hammond, *Pattern of the Past. Studies in
honour of David Clarke* (Cambridge, London, New York,
New Rochelle, Melbourne, Sydney) 261-305.
- 1983: A. Sherratt, *The secondary exploitation of animals in
the Old World*. *World Archaeology* 15, 90-104.
- Shilov 1989: V. P. Shilov, *The origins of migration and animal
husbandry in the steppes of eastern Europe*. In: J. Clut-
ton-Brock, *The walking larder. Patterns of domestication,
pastoralism, and predation* (London) 119-126.
- Siebel 1995: W. Siebel, *Anticorrelated Rb-Sr and K-Ar age
discordances, Leuchtenberg granite, NE Bavaria, Ger-
many*. *Contrib. Mineral. Petrol.* 120, 197-211.
- Sillen et al. 1995: A. Sillen/G. Hall/R. Armstrong, *Strontium
calcium ratios (Sr/Ca) and strontium isotope ratios
(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) of *Australopithecus robustus* and *Homo* sp.
from Swartkrans*. *Journal of Human Evolution* 28, 277-
285.
- 1998: A. Sillen/G. Hall/S. Richardson/R. Armstrong,
*⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios in modern and fossil food-webs of the
Sterkfontein Valley: Implications for early hominid habi-
tation preference*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62/14,
2463-2473.
- Sillen/Kavanagh 1982: A. Sillen/M. Kavanagh, *Strontium and
paleodietary research: A review*. *Yearbook of Physical
Anthropology* 25, 67-90.
- Sillen/Sealy 1995: A. Sillen/J. C. Sealy, *Diagenesis of stron-
tium in fossil bone: A reconsideration of Nelson et al.
1986*. *Journal Arch. Science* 22, 313-320.
- Smith 2000: A. J. Smith, *Pulpo-dentinal interaction in devel-
opment and repair of dentin*. In: M. F. Teaford/M. Mere-
dith Smith/M. W. J. Ferguson, *Development, Function
and Evolution of Teeth* (Cambridge) 82-91.
- Spindler et al. 1995: K. Spindler/E. Rastbichler-Ziessernig/
H. Wilfing/D. zur Nedden/H. Nothdurfter (Hrsg.), *Der
Mann im Eis. Neue Funde und Ergebnisse. The Man in
the Ice 2. Veröffentlichungen des Forschungsinstituts für
Alpine Vorzeit der Universität Innsbruck 2* (Wien, New
York).
- 1996: K. Spindler/H. Wilfing/E. Rastbichler-Ziessernig/
D. zur Nedden/H. Nothdurfter (Hrsg.), *Human
mummies. A global survey of their status and the techni-
que of conservation. The Man in the Ice 3. Veröffentli-
chungen des Forschungsinstituts für Alpine Vorzeit der
Universität Innsbruck 3* (Wien, New York).
- Sponheimer/Lee-Thorp 1999: M. Sponheimer/J. A. Lee-
Thorp, *Oxygen isotopes in enamel carbonate and their
ecological significance*. *Journal Arch. Science* 26, 723-
728.
- Steiniche 1995: T. Steiniche, *Bone histomorphometry in the
pathophysiological evaluation of primary and secondary
osteoporosis and various treatment modalities*. *APMIS
Suppl.* 51, Vol. 103, 1-44.
- Stephan 2000: E. Stephan, *Oxygen isotope analysis of animal
bone phosphate: Method refinements, influence of conso-
lidants, and reconstruction of palaeotemperatures of holo-
cene sites*. *Journal Arch. Science* 27, 523-535.
- Steuer 2001: H. Steuer, *Stichwort: Mobilität*. In: H. Beck/D.
Geuenich/H. Steuer (Hrsg.), *Reallexikon der germani-*

- schen Alterumskunde. Bd. 20: Metuonis – Naturwissenschaftliche Methoden in der Archäologie. 2. Aufl. (Berlin) 118-123.
- Stiner et al. 1995: M. C. Stiner/S. L. Kuhn/S. Weiner/O. Bar-Yosef, Differential burning, recrystallization, and fragmentation of archaeological bone. *Journal Arch. Science* 22, 223-237.
- 2001: M. C. Stiner/S. L. Kuhn/T. A. Surovell/P. Goldberg/L. Meignen/S. Weiner/O. Bar-Yosef, Bone preservation in Hayonim Cave (Israel): a macroscopic and mineralogical study. *Journal Arch. Science* 28, 643-659.
- Stout/Teitelbaum 1976: S. D. Stout/S. L. Teitelbaum, Histomorphometric determination of formation rates of archaeological bone. *Calcified Tissue Research* 21, 163-169.
- Strahm 1995: Chr. Strahm (Hrsg.), *Das Glockenbecker-Phänomen. Ein Seminar. Freiburger Archäologische Studien 2* (Freiburg).
- Straughan et al. 1981: I. R. Straughan/A. A. Elseewi/A. L. Page/I. R. Kaplan/R. W. Hurst/T. E. Davis, Fly ash-derived strontium as an index to monitor deposition from coal-fired power plants. *Science* 212, 1267-1269.
- Surovell/Stiner 2001: T. A. Surovell/M. C. Stiner, Standardizing infra-red measures of bone mineral crystallinity: an experimental approach. *Journal Arch. Science* 28, 633-642.
- Taylor et al. 1983: S. R. Taylor/S. M. McLennan/M. T. McCulloch, Geochemistry of loess, continental crustal composition and crustal model ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 47, 1897-1905.
- Teschler-Nicola et al. 2000: M. Teschler-Nicola/T. Prohaska/F. Gerold/M. Watkins/C. Latkoczy/G. Stinger, Strontium-Isotopenverhältnisse in (prä)historischen Skeletserien Ostösterreichs – ein interdisziplinäres Forschungsprojekt. *Homo* 51, Suppl. 132.
- Teufel 1987: S. Teufel, Vergleichende U-Pb- und Rb-Sr-Altersbestimmungen an Gesteinen des Übergangsbereiches Saxothuringikum/Moldanubikum, NE Bayern. *Göttinger Arb. Geol. Paläont.* 35 (Göttingen).
- Trickett et al. 2003: M. A. Trickett/P. Budd/J. Montgomery/J. Evans, An assessment of solubility profiling as a decontamination procedure for the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ analysis of archaeological human skeletal tissue. *Applied Geochemistry* 18, 653-658.
- Valde-Novak/Kienlin 2002: P. Valde-Nowak/T. Kienlin, Neolithische Transhumanz in den Mittelgebirgen: Ein Survey im westlichen Schwarzwald. *Præhist. Zeitschr.* 77, 29-75.
- van der Merwe et al. 1990: N. J. van der Merwe/J. A. Lee-Thorp/J. F. Thackeray/A. Hall-Martin/F. J. Kruger/H. Coetzee/R. H. V. Bell/M. Lindeque, Source-area determination of elephant ivory by isotopic analysis. *Nature* 346, 744-746.
- Veit 1984: U. Veit, Gustaf Kossinna und V. Gordon Childe. Ansätze zu einer theoretischen Grundlegung der Vorgeschichte. *Saeculum* 35, 326-364.
- Veizer et al. 1997: J. Veizer/D. Buhl/A. Diener/S. Ebner/O. G. Podlaha/P. Bruckschen/T. Jasper/C. Korte/M. Schaaf/D. Ala/K. Azmy, Strontium isotope stratigraphy: potential resolution and event correlation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 132, 65-77.
- 1999: J. Veizer/D. Ala/K. Azmy/P. Bruckschen/D. Buhl/F. Bruhn/G. A. F. Carden/A. Diener/S. Ebner/Y. Godderis/T. Jasper/C. Korte/F. Pawellek/O. G. Podlaha/H. Strauss, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology* 161, 59-88.
- Vosteen 1996: M. Vosteen, Unter die Räder gekommen. Untersuchungen zu Sherratts ›Secondary Products Revolution‹. *Archäologische Berichte* 7 (Bonn).
- Walker 1983: M. J. Walker, Laying a mega-myth: dolmens and drovers in prehistoric Spain. *World Archaeology* 15/1, 37-50.
- Wedepohl/Baumann 2000: K. H. Wedepohl/A. Baumann, The use of marine mollusk shells for Roman glass and local raw glass production in the Eifel Area (Western Germany). *Naturwissenschaften* 87, 129-132.
- Weiner/Bar-Yosef 1990: S. Weiner/O. Bar-Yosef, States of preservation of bones from prehistoric sites in the Near East: A survey. *Journal Arch. Science* 17, 187-196.
- Weinstock 2000: J. Weinstock, Late Pleistocene reindeer populations in middle and western Europe. An osteometrical study of *Rangifer tarandus*. *BioArchaeologia* 3 (Tübingen).
- Wels-Weyrauch 1989: U. Wels-Weyrauch, »Fremder Mann«? *Germania* 67/1, 162-168.
- Weniger 1981: G.-C. Weniger, Aktivitätsspezifische Differenzierungen zwischen Siedlungsplätzen des südwestdeutschen Magdaléniens. *Arch. Korrbblatt* 11, 293-300.
- 1982: G.-C. Weniger, Wildbeuter und ihre Umwelt. Ein Beitrag zum Magdalénien Südwestdeutschlands aus ökologischer und ethno-archäologischer Sicht. *Archaeologia Venatoria* 5 (Tübingen).
- 1987: G.-C. Weniger, Magdalenian settlement and subsistence in south-west Germany. *Proc. Prehist. Society* 53, 293-307.
- 1989: G.-C. Weniger, The Magdalenian in western central Europe: Settlement pattern and regionality. *Journal of World Prehistory* 3/3, 323-372.
- 1991: G.-C. Weniger, Überlegungen zur Mobilität jägerischer Gruppen im Jungpaläolithikum. *Saeculum* 42, 82-103.
- Wenskus 1961: R. Wenskus, Stammesbildung und Verfassung. Das Werden der frühmittelalterlichen gentes (Köln).

- White et al. 1998: Ch. D. White/M. W. Spence/H. Le Q. Stuart-Williams/H. P. Schwarcz, Oxygen isotopes and the identification of geographical origins: The valley of Oaxaca versus the valley of Mexico. *Journal Arch. Science* 25, 643-655.
- White/Arend Folkens 2000: T. D. White/P. Arend Folkens, *Human osteology*. 2. Aufl. (San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo).
- Whittle 1999: A. Whittle, The Neolithic period c. 4000-2500/2200 BC. Changing the world. In: J. Hunter/I. Ralston, *The Archaeology of Britain. An Introduction from the Upper Palaeolithic to the Industrial Revolution* (London, New York) 59-76.
- Wiedemann et al. 1999: F. B. Wiedemann/H. Bocherens/A. Mariotti/A. v. d. Driesch/G. Grupe, Methodological and archaeological implications of intra-tooth isotopic variations ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) in herbivores from Ain Ghazal (Jordan, Neolithic). *Journal Arch. Science* 26, 697-704.
- Wright/Schwarcz 1996: L. E. Wright/H. P. Schwarcz, Infrared and isotopic evidence for diagenesis of bone apatite at Dos Pilas, Guatemala: Palaeodietary implications. *Journal Arch. Science* 23, 933-944.
- Wu et al. 1970: K. Wu/K. E. Schubeck/H. M. Frost/A. Villanueva, 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.
- Zöldföldi et al. 2002: J. Zöldföldi/M. Tóth/B. Székely/M. Satir/P. Árkai, Provenance of the white marble building stones in the monuments of the ancient Troy. Abstract. In: 33rd International Symposium on Archaeometry. 22-26 April. Program and Abstracts (Amsterdam) 54.
- Zöldföldi/Székely 2002: J. Zöldföldi/B. Székely, Quantitative fabric analysis (QFA) and fractal analysis (FA) on marble from central Europe and West-Anatolia. Abstract. In: 33rd International Symposium on Archaeometry. 22-26 April. Program and Abstracts (Amsterdam) 53.

