

MATTHEW MIKE SCHWEISSING

Archäologische Fragen zu Migration: Grundlagen, Chancen und Probleme von Untersuchungen stabiler Strontiumisotope ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

Schlagwörter: Stabile Strontiumisotope, Archäometrie, Migration, Handel, Anthropologie

Keywords: stable strontium isotopes, Archaeometry, migration, trade, anthropology

Einleitung

Die moderne Archäometrie erlaubt den Zugriff auf Skelettfunde in ihrer Funktion als ‚biologische Datenbanken‘ zur prähistorischen und historischen Forschung.

Diese Fragestellungen beziehen sich u. a. auf die Umstände von Bevölkerungsmischungen und Provenienzfragen. Ortswechsel von Individuen oder Gruppen initiieren nicht selten einen Transfer von Kultur und Technologie. Dieser Transfer kann Veränderungen in den Lebensgewohnheiten von einzelnen Individuen oder sogar Populationen bewirken und dadurch wiederum den Einfluss auf die Umwelt verändern sowie sogar das gesamte soziale Gefüge betreffen. Die Untersuchung prähistorischer und historischer menschlicher Populationen wirft Fragen über Bevölkerungsdynamik wie den Anteil von ortsfremden Individuen oder deren Herkunft auf.

Die Analyse stabiler Strontiumisotopen von Knochen und Zahnschmelz ist seit ihrer erstmaligen Anwendung in den 1980er Jahren¹ eine in der Archäometrie verwendete Methode zur Bestimmung ortsfremder Individuen. Mehrfach wurde diese Methode inzwischen erfolgreich angewandt, um primär gebietsfremde Individuen innerhalb von Nekropolen zu detektieren².

1 J. E. ERICSON, Strontium isotope characterizations in the study of prehistoric human ecology. *Journal of Human Evolution* 14, 1985, 503–514; N. J. VAN DER MERWE u. a., Source-area determination of elephant ivory by isotopic analysis. *Nature* 346, 1990, 744–746.

2 G. GRUPE u. a., Mobility of Bell Beaker people revealed by strontium isotope ratios of tooth and bone. A study of southern Bavarian skeletal remains. *Appl. Geochem.* 12, 1997, 517–525;

Strontium bietet potenziell einen Zugang zur Nahrungszusammensetzung eines Individuums³, über die standorttypische Signatur einzelner Strontiumsisotope kann jedoch potenziell eine Aussage über die räumliche Herkunft von Individuen getroffen werden.

Methodische Hintergründe

Isotope sind Atome eines gleichen Elementes mit unterschiedlicher Masse. Die Masse eines Atoms ist durch seine im Kern befindlichen Neutronen und Protonen gekennzeichnet. Die Elektronen sind nur für das Reaktionsverhalten verantwortlich, besitzen selbst aber so gut wie keine Masse. Variiert die Anzahl der Neutronen im Kern, so ist nur das Gewicht der Atome unterschiedlich, das Reaktionsverhalten bleibt unverändert.

Isotope werden in stabile und radioaktive Isotope unterschieden. Radioaktive Isotope zerfallen zu nichtradioaktiven Elementen unter Abgabe von Energie, stabile Isotope zerfallen nicht.

Das höhere Gewicht von schwereren Isotopen führt zu unterschiedlichen Bewegungs- oder Diffusionsraten, sog. kinetischen Isotopen-Effekten. Diese Unterschiede sind bei den Isotopen leichter Elemente wie Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff relativ gesehen größer als bei Isotopen schwerer Elemente wie Strontium oder Blei. Der Masseunterschied zwischen Stickstoff 15 (¹⁵N) und Stickstoff 14 (¹⁴N) ist relativ betrachtet größer, nämlich 6,66 % als der Unterschied zwischen Strontium 86 (⁸⁶Sr) und Strontium 87 (⁸⁷Sr) mit nur 1,15 %, obwohl sich die Isotope jeweils nur um ein zusätzliches Neutron unterscheiden. Die kinetischen Effekte verändern die Eigenschaften der Isotope z. B. beim Kristallisieren, Verdampfen oder Gefrieren, und natürlich auch bei Stoffwechselprozessen in biologischen Systemen. Zumeist wird bei den genannten Prozessen zu Ungunsten des schwereren Isotops diskriminiert. Allerdings werden Isotope von Elementen in biologischen Systemen

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. Sci.* 27, 2000, 903–913.

3 J. H. BURTON/L. E. WRIGHT, Nonlinearity in the relationship between Sr/Ca and diet. Paleodietary implications. *Am. Journal of Physical Anthr.* 96, 1995, 273–282.

ab einer Massezahl von etwa 50 Einheiten (u) nicht mehr diskriminiert, da der relative Masseunterschied zu klein ist⁴.

Isotope von schweren Elementen wie Strontium sollten also prinzipiell keiner Fraktionierung unterliegen, so dass ihr Verhältnis im Organismus die Isotopenzusammensetzung des Lebensraumes widerspiegelt. Aus diesem Grund werden Isotope leichter Elemente (z. B. Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff) vor allem zur Ernährungsrekonstruktion und Isotope schwerer Elemente (z. B. Strontium) zur Untersuchung von Migration herangezogen.

Strontium kommt in vier stabilen Isotopen mit den Massen ⁸⁴Sr (0,56 %), ⁸⁶Sr (9,87 %), ⁸⁷Sr (7,04 %) und ⁸⁸Sr (82,53 %) vor. Die Isotope ⁸⁴Sr, ⁸⁶Sr und ⁸⁸Sr bildeten im Laufe der Erdgeschichte konstante Verhältnisse, die laut Konvention $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8,375209$ und $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,056584$ betragen⁵. ⁸⁷Sr ist ein Zerfallsprodukt des radioaktiven Rubidium ⁸⁷(⁸⁷Rb), das eine Halbwertszeit ($t_{1/2}$) von $48,8 \times 10^9$ Jahren besitzt. Somit ist der ⁸⁷Sr-Gehalt eines Gesteins eine Funktion der Ausgangskonzentration an ⁸⁷Rb und seines Alters⁶. Aufgrund der langen Halbwertszeit von Rubidium ändern sich die Verhältnisse eines Gesteins nur innerhalb erdgeschichtlicher Zeitspannen und können somit für die Interpretation von prähistorischen und historischen Zeiträumen vernachlässigt werden.

Da Gesteine unterschiedliche Konzentrationen an Strontium enthalten, wird der ⁸⁷Sr-Gehalt auf die Konzentration von ⁸⁶Sr bezogen, also jenes Isotops, welches eine vergleichbare Häufigkeit aufweist. Die heutigen ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-Verhältnisse der kontinentalen Erdkruste zeigen Minimalwerte von 0,702 und Maximalwerte von bis zu 1⁷.

Aufgrund der Notwendigkeit, bei einer geologischen Rubidium-Strontium-Altersbestimmung immer auch die ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-Verhältnisse bestimmen zu müssen, existieren genaue geologische Sr-Isotopendaten von mittels dieser Methode datierten Gesteinen. Der mittlere Fehler bei der Verwendung von Thermionen-Massenspektrometern (TIMS) liegt in der Regel in der

- 4 P. HORN u. a., Isotope abundance ratios of Sr in wine provenance determinations, in a tree-root activity study, and of Pb in a pollution study on tree-rings. *Isotopes in Environmental and Health Stud.* 34, 1998, 31–42.
- 5 E. H. STEIGER/E. JÄGER, Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Scien. Letter* 36, 1977, 359–362.
- 6 G. FAURE, *Principles of Isotope Geology* (New York 1986).
- 7 M. A. GEYH/H. SCHLEICHER, *Absolute Age Determination. Physical and Chemical dating methods and their Application* (New York 1990) 65.

5. Dezimalstelle. Für geologische Altersbestimmungen ist diese Präzision notwendig, für die Interpretation in Bezug auf Knochen und Zähne zur Herkunftsbestimmung ist normalerweise eine Differenz in der 3. Dezimalstelle von Belang. Die Messgenauigkeit der Methode ist also wesentlich präziser als für Fragestellungen bezüglich Migrationsereignissen benötigt.

Strontium wird bei Mensch und Tier regelmäßig über die Nahrung und das Trinkwasser aufgenommen und, da es keine biologische Relevanz besitzt, im Mineral von Knochen und Zähnen eingelagert, wo es aufgrund seiner ähnlichen Größe Kalzium ersetzt. So sollte das im Knochen und Zahnschmelz eingelagerte Strontium in seiner Isotopenzusammensetzung jenem der Nahrung und somit auch des anstehenden Bodens entsprechen. Strontiumisotope geben also eigentlich die durchschnittliche ‚Nahrungsherkunft‘ an.

Neben menschlichen und tierischen Hartgeweben sind aber auch andere organische Überreste von Interesse für die historischen Wissenschaften. Textilreste und Leder können nach hinreichender Aufbereitung und Dekontamination durchaus Ergebnisse liefern, die für die Erkennung von Handelswaren von Bedeutung sind⁸.

Problematiken der Methode

Die begleitende methodische Diskussion zur Sr-Methode bezieht sich vor allem auf die Frage, ob das in Gesteinen und Sedimenten eingelagerte Strontium auch im gleichen Isotopenverhältnis in die Biosphäre übergeht und somit die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in Knochen und Zahnschmelz auch den Isotopenwert des Gesteins im Habitat widerspiegeln. Mittels ‚leaching‘-Versuche wurden Proben mit verschiedenen starken Säuren angeätzt und die Rückstände auf deren $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis untersucht, um Unterschiede zwischen verschiedenen Schichten des Zahnschmelzes oder des Knochens zu detektieren⁹.

8 C. VON CARNAP-BORNHEIM u. a., Stable strontium isotopic ratios from archaeological organic remains from the Thorsberg peat bog. *Rapid commun. in mass spectrometry* 21, 2007, 1541–1545.

9 P. HORN/S. HÖLZL/D. STORZER, Habitat determination on a fossil stag's mandible from

Verschiedene Aufbereitungsmethoden von Sedimentproben führen zu unterschiedlichen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werten. William C. Graustein¹⁰ konnte nachweisen, dass höhere Werte bei Sedimentproben vorliegen, welche mit Flusssäure (HF) gelöst wurden, als bei der Lösung mit Perchlorsäure (HClO_4). Der Widerstand der nur in HF löslichen Fraktion von Sedimentproben gegen Behandlungen mit schwächeren Säuren lässt vermuten, dass dieser Teil auch der Vegetation im naturräumlichen Habitat nicht zur Verfügung steht. Untersuchungen von Sedimentproben aus Mauer bei Heidelberg zeigten bei der Behandlung mit unterschiedlichen Agenzien (Aqua dest. und HF) zum Anätzen der Proben ebenfalls deutliche Differenzen der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte. Mit destilliertem Wasser aufgeschlossene Proben desselben Standorts wiesen einen Wert von 0,70940 auf, mit HF gelöste Proben besaßen einen Wert von 0,71180. So ist ein genauer Vergleich zwischen Strontiumisotopenwerten des Bodens und denen der untersuchten Individuen notwendig, da keine eindeutige Aussage über die Bioverfügbarkeit von Strontium gemacht werden kann.

Bei der Untersuchung bodengelagerter Skelette ist es notwendig, die im Zuge postmortalen Dekomposition wirksamen physikalischen, chemischen und biologischen Einflüsse auf die mineralisierten Hartgewebe zu berücksichtigen. Neben mikrobiellen Einflüssen sind chemische Umwandlungen und Lösungsvorgänge relevant, welche mit zunehmender Bodenfeuchte effektiver ablaufen. Mit einsickerndem Wasser aus Sedimenten können sogar die relativ stabilen Karbonate und Apatite des Knochens in ihrer Zusammensetzung verändert werden. Das äußere Erscheinungsbild des Knochens bleibt durch diese Effekte oft unverändert, so dass eine alleinige makroskopische Inspektion nicht ausreicht, um solche Veränderungen zu detektieren.

Zur Abschätzung des Erhaltungszustandes von bodengelagerten Knochen wurden vor allem histologische Verfahren, Messungen der Porosität und Kristallinitätsmessungen herangezogen¹¹. Diese Verfahren haben zum Ziel,

the site of *Homo erectus heidelbergensis* at Mauer by use of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Naturwiss.* 81, 1994, 360–362.

10 W. C. GRAUSTEIN, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios measure the sources and flow of strontium in terrestrial ecosystems. In: P. W. Rundel u. a. (Hrsg.), *Stable Isotopes in Ecological Research* (New York 1989) 491–512.

11 C. M. NIELSEN-MARSH/R. E. M. HEDGES, Patterns of diagenesis in bone. The effects of site environments. *Journal Arch. Scien.* 27, 2000, 1139–1150.

die Integrität des bodengelagerten Knochens abzuschätzen und so Aussagen über die Verlässlichkeit von ermittelten Spurenelement- oder Isotopenanalysen treffen zu können. Letztlich geben sie aber nur Auskunft über den Grad des allochthonen Eintrags in den Knochen und nicht über den tatsächlichen Stoffaustausch auf der Ebene von Molekülen oder Atomen. Während für die Untersuchung von Isotopen leichter Elemente wie Kohlenstoff und Stickstoff aus dem Knochenkollagen Verfahren zur Überprüfung des Erhaltungszustandes zur Verfügung stehen, kann die typische Zusammensetzung von originärem Knochenkollagen mittels Aminosäurenanalyse überprüft werden. So kann ermittelt werden, ob das extrahierte Kollagen bereits durch Dekompositionsprozesse verändert wurde.

Derzeit existiert noch kein direktes Verfahren zur Überprüfung der anorganischen Knochenmatrix auf den Grad der Dekomposition. Für die Untersuchung der stabilen Strontiumisotope sind vor allem Faktoren zu berücksichtigen, welche die Apatitstrukturen des Knochens oder der Zähne verändern. Zur Interaktion der chemischen Elemente des Bodens mit denen des Knochens kommt es zum einen durch Ablagerung in Fissuren der Knochenoberflächen, zum anderen durch strukturelle Substitution in die Hydroxylapatitmatrix. Des Weiteren ist zu beachten, dass Elemente auch durch das Grundwasser ausgewaschen werden können¹².

Vergleiche zwischen unbehandelten Proben und solchen, bei denen 1 mm der Oberfläche mechanisch entfernt wurde, zeigen keine Unterschiede in der Strontiumkonzentration. Auch haben Untersuchungen von Sediment, das den Knochen umgibt, eine isotrope Verteilung der Strontiumkonzentration gezeigt¹³. Es wird versucht, diagenetische Effekte durch bestimmte Reinigungsprozesse zu eliminieren. Zuerst wird eine mechanische Reinigung der Proben durchgeführt, dann eine Säurebehandlung. Die Behandlung mit starker ungepufferter Säure entfernt Karbonate und rekristallisiertes, diagenetisch verändertes Material, das leichter löslich ist als der autochthone Bioapatit¹⁴.

12 J. LAMBERT/L. XUE/J. BUIKSTRA, Inorganic analysis of excavated human bone after surface removal. *Journal Arch. Scien.* 18, 1991, 363–383.

13 J. LAMBERT u. a., Bone diagenesis and dietary analysis. *Journal of Human Evolution* 14, 1985, 477–482.

14 T. PRICE/J. BLITZ/J. EZZO, Diagenesis in prehistoric bone. Problems and solutions. *Journal Arch. Scien.* 19, 1992, 513–529.

Dennoch sind Kontaminationen des umgebenden Sediments, z. B. durch den Eintrag von künstlichem Dünger mit hohem Strontiumgehalt, auf Ackerböden nachweisbar¹⁵. Dies ist vor allem bei der Interpretation von Sedimentproben aus Gräberfeldern zu berücksichtigen, welche auf agrarisch intensiv genutzten Flächen liegen.

Diagenetische Effekte spielen vor allem bei der Untersuchung bodengelagerter Hartgewebe eine entscheidende Rolle. Zur Einschätzung des Ausmaßes von Kontamination und deren Entfernung durch geeignete Reinigungsverfahren wurden mehrfach Lösungsansätze entworfen. Meerwasser hat ein einheitliches $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis von etwa 0,708–0,709. Die Untersuchung von meeresbewohnenden Säugetieren, die an Land verendeten und über Jahrhunderte in Sedimenten an Küsten lagerten, boten hier Ansätze zur Rekonstruktion von diagenetischen Effekten während längerer Bodenliegezeiten¹⁶. Die Ergebnisse der Untersuchungen fallen zwar teilweise unterschiedlich aus, doch zeigt sich zumeist, dass bei der Untersuchung auf die stabilen Sr-Isotope der Zahnschmelz die offenbar zuverlässigste Quelle für autochthones Strontium aus Hartgeweben ist. Zahnschmelz wird nach seiner Fertigstellung nicht mehr wesentlich verändert und zeigt somit die Isotopenverhältnisse seines Bildungszeitraumes. Untersuchungen bezüglich der Kontamination von Zahnschmelz zeigen eine weitgehende Resistenz des Zahnschmelzes gegenüber diagenetischen Einflüssen, was vor allem an einer chemischen Struktur liegt. So handelt es sich bei Zahnschmelz um zellfreies Gewebe, das nahezu keine organischen Anteile enthält. Die prismatische Struktur der Schmelzmatrix ist so dicht aneinandergelagert, dass Substitutionen durch andere Mineralien auf die oberflächlichen Areale beschränkt sind. Knochen hingegen ist im Vergleich zu Zahnschmelz weniger dicht gepackt und hat einen mit ca. 25–30 % erheblichen Anteil an organischer Matrix.

Neben den genannten Problemen wie Bioverfügbarkeit von Strontium oder Dekompositionerscheinungen ist insbesondere auch die Frage nach dem

-
- 15 J. BÖHLKE/M. HORAN, Strontium isotope geochemistry of groundwaters and streams affected by agriculture, Locust Grove, MD. *Applied Geochemistry* 15, 2000, 599–609.
- 16 B. K. NELSON u. a., Effects of diagenesis on strontium, carbon, nitrogen and oxygen concentrations and isotopic composition of bone. *Geochim et Cosmochim. Acta* 50, 1986, 1941–1949; K. A. HOPPE/P. L. KOCH/T. T. FURUTANI, Assessing the preservation of biogenic strontium in fossil bones and tooth enamel. *Internat. Journal Osteoarch.* 13, 2003, 20–28.

tatsächlich inkorporierten Strontium zu stellen. Vor allem Menschen können durch Handel Nahrungsmittel erwerben, die aus isotopisch unterschiedlichen Regionen stammen. Als Methode der Wahl sollte hier – vor allem bei unklaren geologischen Bedingungen – eine Probe von einem Tier derselben Zeitstellung genommen werden. Als Vergleich sind vor allem Tiere geeignet, die von Natur aus einen relativ kleinen Lebensraum besiedeln und wenig mobil sind. Untersuchungen von R. Alexander Bentley und anderen aus dem Jahr 2004 legen nahe, dass Schweine die geringste Varianz bezüglich der Strontiumisotopen zeigen¹⁷. Hausschweine sind in diesem Fall zu bevorzugen, da sie als domestizierte Omnivoren auch einen Teil der menschlichen Nahrung in Form von Abfällen zu sich nehmen. Auch Kleinsäuger wie Hasen oder Mäuse sind als ‚Null-Wert‘ für das bioverfügbare Strontium nutzbar. Zur Charakterisierung eines Strontiumwertes als ‚nicht lokal‘ wurde 2003 von T. Douglas Price und anderen vorgeschlagen, nur Werte außerhalb einer ± 2 Standardabweichung der untersuchten Tiere zu nutzen¹⁸. Allerdings ist hiermit natürlich nicht die Variabilität der menschlichen Ernährung erfasst, die durch Handel auch vom Wohnort isotopisch unterschiedliche Nahrung erhalten kann. Klar abgegrenzte und sich nicht überschneidende, geologische Zonen sind nicht in allen Fällen anzutreffen, und eine simple Unterscheidung anhand der erhaltenen Werte des Zahnschmelzes reicht nicht immer aus, um Aussagen über die Migration einzelner Individuen treffen zu können.

Probenbearbeitung

Die Aufbereitung der Zahnschmelzproben erfolgt analog zu langjährig erprobten Verfahren der Archäometrie und Geochemie. Die Probe wird zunächst im Ultraschallbad von makroskopischen Verunreinigungen befreit. Der Zahnschmelz wird vom Rest des Zahnes getrennt und für fünf Minuten

17 R. A. BENTLEY/T. D. PRICE/E. STEPHAN, Determining the local $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ range of archaeological skeletons. A case study from Neolithic Europe. *Journal Arch. Scien.* 31, 2004, 365–375.

18 T. D. PRICE/J. H. BURTON/R. A. BENTLEY, The charakterisazion of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration. *Archaeometry* 44,1, 2003, 117–135.

mittels konzentrierter Ameisensäure oberflächlich angeätzt. Das Anätzen erfolgt, um die Oberfläche von Kontaminationen zu reinigen. Um die gelösten Verunreinigungen nicht wieder auf der Zahnoberfläche auskristallisieren zu lassen, wird der Zahnschmelz mehrfach mit destilliertem Wasser gereinigt.

Der organische Anteil im Zahnschmelz (etwa 1–2 %) wird nun durch Veraschen im Muffelofen (12 h) bei 500 °C entfernt. Etwa 50 mg des veraschten Zahnschmelzes werden nun mit konzentrierter Salpetersäure im Druckaufschluss gelöst. Aufgrund des gleichen Atomgewichtes von ^{87}Rb und ^{87}Sr – beide sind massenspektrometrisch nicht unterscheidbar – erfolgt nun eine Trennung der Elemente mittels Säulenchromatographie. Die so gereinigte Lösung wird danach massenspektrometrisch untersucht und das für die Fragestellung relevante $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis ermittelt. Zur Qualitätskontrolle des Aufbereitungsweges werden mehrfach Standards mitgeführt, deren Isotopenzusammensetzung bekannt ist. Die Qualitätskontrolle des Messgerätes erfolgt über einen anderen Standard, dessen Isotopenzusammensetzung ebenfalls bekannt ist.

Anwendung

Neben all den Problematiken, die mit der Strontiumisotopenanalyse zur Herkunftsbestimmung einhergehen, ist aber vor allem die Genauigkeit der Methode zu betonen. Weist eine Probe ein signifikant unterschiedliches $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis zum Sediment auf, so kann das dazugehörige Individuum als primär gebietsfremd ausgewiesen werden, denn eine Kontamination kann nur mit dem umgebenden Sediment stattfinden.

Die Herkunftsregion von als ortsfremd identifizierten Individuen ist aber nicht eindeutig festzulegen, da ein $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis als Funktion der Zeit auf mehrere Regionen zutreffen kann. Die Interpretation von archäologischen Hinweisen, um letztendlich die plausibelste Herkunftsregion zu ermitteln, spielt hier – neben der geologischen Einschränkung von Herkunftsregionen – eine wesentliche Rolle.

Zur hinreichend sicheren Interpretation mittels Strontiumisotopenanalyse muss der ‚Lebensraum‘ und somit jenes Gebiet, aus dem die Nahrung stammt, hinreichend groß und geologisch einheitlich sein, um es von potenziellen Zuwanderungsgebieten unterscheiden zu können. Hier ist vor allem

wieder die Frage von Fernhandel mit Nahrungsmitteln während der relevanten Perioden zu berücksichtigen. Fernhandel spielt vor allem in der Zeit der wachsenden Städte und der damit verbundenen ‚Überregionalisierung‘ von Energieflüssen eine Rolle. Der Fernhandel von Rindern in der frühen Neuzeit von Ungarn nach Bayern sei hier als Beispiel erwähnt¹⁹.

Der Nachweis von gebietsfremden Individuen spielt vor allem für die Interpretation vermuteter Mobilität und Handelsbeziehungen eine wichtige Rolle. Bisherige Ansätze, Migration in Gräberfeldern anhand von biologischen Parametern zu dokumentieren, waren vor allem auf morphologische Aspekte beschränkt. Von der Norm abweichende Erscheinungsbilder wie z. B. unterschiedliche Schädelmaße dienten als Anhaltspunkte zur Identifikation von gebietsfremden Individuen²⁰.

Neben den biologischen Parametern sind vor allem archäologische Hinweise wie Grabbeigaben mit nicht lokalen Merkmalen ein Anhaltspunkt für Migration von Individuen. Hier ist allerdings zu bemerken, dass der Aspekt des Handels eine nicht unerhebliche Rolle spielt und nicht selten Träger von ortsfremden Merkmalen mittels Strontiumisotopenanalyse nicht als ortsfremd detektiert werden konnten. Der Verfasser des vorliegenden Beitrags wies 2004 bei der Untersuchung des Gräberfeldes von Neuburg an der Donau deutliche Unterschiede in der Anzahl der archäologisch als gebietsfremd beschriebenen Individuen und den mittels Sr-Analyse als ortsfremd detektierten Individuen nach²¹. Die biologischen Parameter zur Herkunftsbestimmung spielen aber vor allem auch dann eine Rolle, wenn keine Grabbeigaben vorhanden sind, entweder aufgrund einer Störung und/oder Beraubung der Bestattung oder wegen Veränderungen in den Beisetzungstraditionen.

Die erwähnten Identifikationsmöglichkeiten reichen aber nicht aus, um Provenienzfragen zu klären. Zumeist handelt es sich um augenscheinliche

19 M. M. SCHWEISSING/G. GRUPE, Tracing migration events in man and cattle by stable strontium isotope analysis of appositionally grown tissue. *Internat. Journal of Osteoarch.* 13, 2003, 96–103.

20 Vgl. etwa G. ZIEGELMAYER, Anthropologischer Beitrag. In: E. Keller, *Das spätrömische Gräberfeld von Neuburg an der Donau. Materialh. bayer. Vorgesch. A 40* (Kallmünz 1979) 71–128.

21 M. M. SCHWEISSING, Strontium-Isotopenanalyse (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr). Eine archäometrische Applikation zur Klärung anthropologischer Fragestellungen in Bezug auf Migration und Handel. *Münchner geol. Hefte, Rh. A, Allg. Geol.* 31 (München 2004).

oder metrisch erfassbare, aber gleichzeitig auch um seltene Parameter. Dies ist evident, da sie, um von der Norm abweichen zu können, auch nicht in großer Anzahl vorhanden sein dürfen. Solche Hinweise sind nicht frei von Zweifeln bezüglich ihrer Authentizität: Fremde Grabbeigaben können eingehandelt worden sein, und unterschiedliche morphologische Ausprägungen können normale Variationen einer Population sein. Diese Parameter lassen zwar einen Einfluss von ortsfremden Individuen oder einen fremden kulturellen Einfluss vermuten, die Anzahl der tatsächlich zugewanderten Individuen lässt sich aber letztendlich mit diesen Mitteln nicht abschätzen. Mittel der Wahl zur Klärung von Provenienzfragen ist hier der archäometrische Ansatz der Untersuchung von stabilen Strontiumisotopen.

Neue Perspektiven

Strontiumisotope als geologische Marker in menschlichen und tierischen Hartgeweben besitzen also das Potential, Aussagen über Migrationsereignisse treffen zu können. Neben diagenetischen Aspekten ist vor allem das Problem des intravitalen Stoffaustausches in Hartgeweben ein entscheidendes Kriterium, das in die Interpretation einbezogen werden muss. Prinzipiell erscheint jede entnommene Probe als Mischisotopie und somit als Akkumulation von Isotopien über eine definierte Zeit. Gerade die Zeit, über welche Strontium in Hartgeweben akkumuliert, ist ein noch weitgehend unerforschtes Feld, da weder Knochenumbauraten noch die Bildung von Sekundärdentin ausreichend bekannt sind und nur abgeschätzt werden können. So ist die Perspektive der Methode vor allem in einer Verfeinerung der Probenentnahme (Microsampling, der Entnahme von Proben auf mikroskopischer Ebene) und der Vertiefung von Kenntnissen zum Wachstum und Stoffwechsel appositionell wachsender Hartgewebsstrukturen zu sehen. Sichere Daten erhält man aber vor allem durch die Untersuchung von Zahnschmelz, bei welchem die Diageneseproblematik weitgehend ausgeschlossen werden kann und der Bildungszeitraum auf wenige Jahre begrenzt ist.

Die Kombination von Strontiumanalysen mit weiteren Anwendungen, wie z. B. die von Sauerstoff- oder Bleiisotopen sowie Microsampling-Methoden, werden in diesem Zusammenhang in Zukunft sicherlich weiter zur Erhellung solcher Fragestellungen beitragen. Vor allem erscheinen hier die jähr-

lich gebildeten Zahnzementringe als erfolgversprechendes Gewebe zur Detektion von Migration. Durch die Analyse von Hartgewebsstrukturen, welche in klar definierten Zeiträumen gebildet werden, wäre unter günstigen Umständen sogar ein Zugang zu chronologischen Daten von Ortswechseln möglich, doch spielt auch hier vor allem der allochthone Eintrag von Mineralien aus dem umgebenden Sediment eine bislang noch nicht abschätzbare Rolle.

Die Kombination verschiedener Techniken erscheint notwendig, um vor allem auch in geologischen Gebieten archäometrische Daten erheben zu können, welche weniger günstige Voraussetzungen aufweisen und keine unterschiedlichen Strontiumisotopenwerte zeigen. Das Detektieren von Umweltparametern in menschlichen Hartgeweben ist mehrfach erfolgreich angewendet worden, eine sinnvolle Kombination mehrerer Methoden, wie sie bereits heute im Bereich von Lebensmitteluntersuchungen²² und in der Kriminalistik angewendet wird, lässt sich mit Sicherheit in der Zukunft auch besser auf archäologisches Material anwenden.

Die Bedeutung von interdisziplinären Forschungsansätzen vor allem zur Klärung historischer Fragestellungen rückt mehr und mehr in den Vordergrund. Die Anthropologie kann hier mit archäometrischen Methoden in Zusammenarbeit mit der Archäologie neue Impulse liefern, und festgefahrene Modelle und Methoden können kritisch überprüft werden²³.

Bei der Überlegung, eine Herkunftsanalyse mittels stabiler Strontiumisotope durchzuführen, sind neben den finanziellen Aufwendungen auch andere Parameter zu beachten:

1. Gibt es archäologische Hinweise auf Zuwanderung einzelner Individuen oder Gruppen?
2. Sind Hinweise auf bestimmte Regionen der Herkunft potenziell ortsfremder Individuen vorhanden?
3. Sind Bodenproben und Proben von Tieren aus derselben Periode vorhanden?
4. Gibt es eine hinreichende geologische Zonierung, um möglichst genaue Abgrenzungen zu anderen Regionen ableiten zu können?

22 S. HÖLZL u. a., Isotope-abundance ratios of light (bio) and heavy (geo) elements in biogenic tissues – methods and applications. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 378,2, 2004, 270–272.

23 G. MOOSBAUER, mit Beitr. M. SCHWEISSING, Kastell und Friedhöfe der Spätantike in Straubing. *Passauer Universitätsschr. Arch.* 10 (Rahden/Westf. 2005).

Die ersten drei Punkte sind in der Regel durch die archäologische Auswertung zu beantworten, wohingegen die Frage nach einer geologischen Zonierung bei der Rücksprache mit dem Untersucher zu klären sein sollte. Einfache geologische Karten helfen nur bedingt, da sowohl das Gestein als auch dessen Alter eine wichtige Rolle bei der Charakterisierung für die zu erwartenden Isotopen spielen. Letztendlich ergibt eine solch kostenintensive Methode wie die Untersuchung von stabilen Strontiumisotopen nur dann einen Sinn, wenn zumindest der Hinweis auf ortsfremde Individuen gegeben ist. Dafür sind hiermit aber Individualdaten verfügbar, die auf biologischer Basis ein Migrationsereignis während des Lebens nachweisen können. Vor allem die sich daraus ergebenden Informationen über Geschlechtsspezifität oder Altersstruktur der zugewanderten Personen bergen die Möglichkeit, bestehende Hypothesen zu verifizieren oder zu falsifizieren.

Die Analyse stabiler Strontiumisotope ist trotz der erwähnten Einschränkungen ein wertvolles Mittel zur Detektierung von gebietsfremden Individuen. Die Aussage, ob ein Individuum gebietsfremd ist, kann klar getroffen werden, wenn die gemessenen Isotopenwerte nicht denen der Fundregion entsprechen. Ist ein Individuum als nicht ortsansässig detektiert, kann über die ermittelten Werte versucht werden, eine mögliche Herkunftsregion zu ermitteln. Die Aussagen sind hierbei aber nur soweit verlässlich wie weitere Hinweise, z. B. archäologische Funde, auf eine Herkunft vorliegen.

Der Vorteil liegt vor allem in der Unabhängigkeit dieser Methode von archäologischen Funden, da die Daten aus biologischem Material gewonnen werden und somit das Individuum selbst als ortsfremd oder nicht ausweist. Die Methode der Strontiumisotopenanalyse hat sich im Rahmen von vielen untersuchten Fragestellungen als adäquates Mittel zur Feststellung von Migrationsereignissen bewährt und kann dabei helfen, Migration und Bevölkerungsmischung in der Historie und Prähistorie zu erkennen und deren Parameter zu entschlüsseln.

Zusammenfassung

Die Analyse stabiler Strontiumisotope in kulturhistorisch bedeutsamen Knochenfunden ist inzwischen eine gut etablierte Methode zur Identifikation zugewanderter Individuen. Die aktuelle Methodik umfasst aber inzwischen neben menschlichen Hartgeweben auch organische Materialien wie Leder und Holz. Als wichtiges Ziel zur genaueren Zuordnung von nicht-lokalen Individuen ist vor allem eine exakte Kartierung des biologisch verfügbaren Isotopensignaturen erforderlich.

Summary

The analysis of stable strontium isotopes in cultural-historically important bone finds is at present a well-established method of identifying migrant individuals. However, the present methodology encompasses not only human bone-substance, but also organic materials such as leather and wood. An important aim for an exact assignment of non-local individuals is, in particular, the need of an exact mapping of the biologically available isotopic signatures.