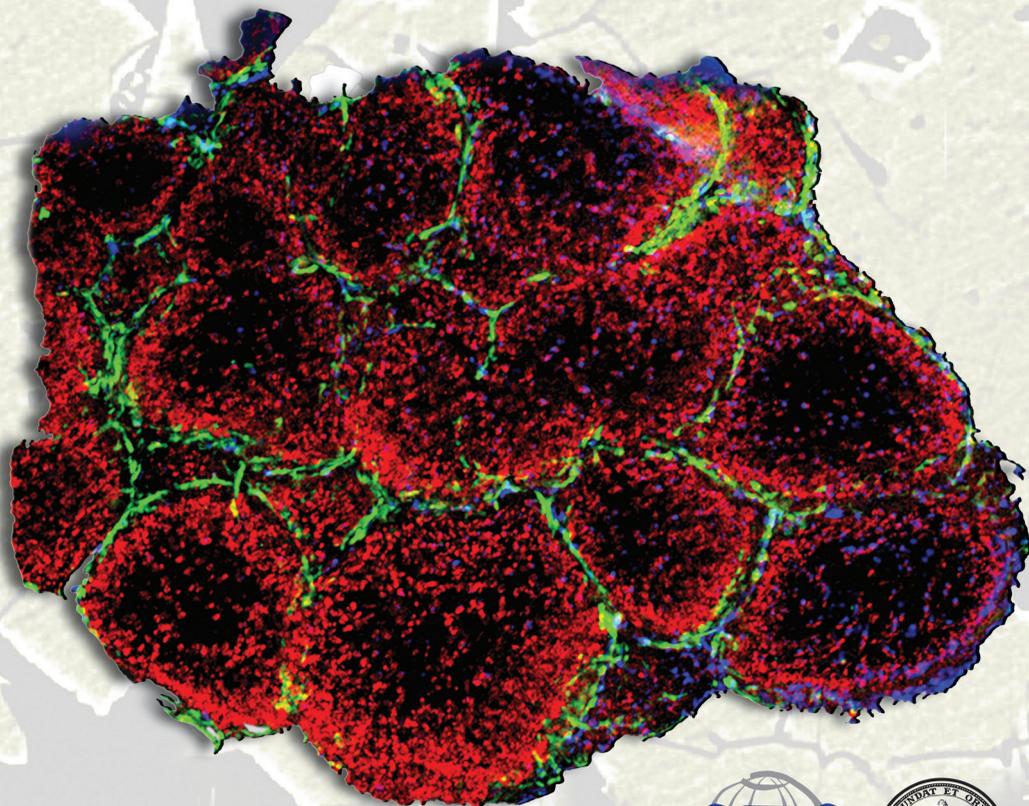


Bent Tauber Hansen
Isotope, die Gene der Gesteine

Sonderdruck aus:

Das System Erde — was bewegt die Welt? Lebensraum und Zukunftsperspektiven

Herausgegeben im Auftrage der Akademie der Wissenschaften
zu Göttingen von Joachim Reitner, Klaus Weber und Ute Karg



Universitätsverlag Göttingen

Geobiologie



Joachim Reitner, Klaus Weber und
Ute Karg (Hg.)

Das System Erde –
Was bewegt die Welt?

Lebensraum und
Zukunftsperspektiven



Universitätsverlag Göttingen
2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.



Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen

Goldschmidtstr. 3
37077 Göttingen

Tel. +49-(0)551-397951
Fax +49-(0)551-397918
uggp@gwdg.de



Akademie der Wissenschaften zu Göttingen

Theaterstraße 7
37073 Göttingen
Tel. +49 (0)551 / 39-5362
Fax +49 (0)551 / 39-5365
udeppe@gwdg.de

Satz und Layout Ute Karg

Titelgestaltung Conny Kaubisch und Karsten Riedl

Umschlaghintergrund: Polierter Dünnschliff mit Flussspat-Kristallen

Titelabbildung: Epifluoreszenz-Bild von Kolonien anaerob Methanoxidierender Mikroorganismen aus dem Schwarzen Meer. Diese Mikroorganismen sind aktiv an der Bildung von Karbonatgesteinen beteiligt. Die Mikroorganismen wurden über die sog. Fluoreszenz in situ Hybridisierung (FISH) bestimmt, bei der bestimmte Abschnitte des 16S rRNA Gens angefarbt werden. Die grüne Farbe detektiert hier Archaea, die Methan anaerob oxidieren (ANME2) und die rote Farbe markiert Sulfatreduzierende Bakterien. Der DNS Farbstoff DAPI ist blau und wird zur Kontrolle der FISH-Daten eingesetzt.

© Alle Rechte vorbehalten, Universitätsverlag Göttingen 2005

ISBN 3-938616-07-5

Isotope, die Gene der Gesteine

Bent Tauber Hansen

Der oben aufgeführte Titel wird manche dazu veranlassen, sich zu fragen, wo denn der Zusammenhang zwischen Genen und Isotopen besteht. Der Vergleich ist nahe liegend. Betrachtet man die menschliche Zelle, hat diese einen Zellkern mit Chromosomen, in denen die individuellen DNA-Informationen enthalten sind. Bei den Gesteinen entsprechen die einzelnen Kristalle sozusagen den Zellen, und das Kristallgitter ist mit dem Zellkern zu vergleichen. Im Kristallgitter sind durch Einbau von radiogenen und radioaktiven Isotopen Informationen gespeichert, die für diesen Kristall und somit letztlich für das betreffende Gestein einzigartig sind. Um diese Informationen verstehen zu können, müssen wir erst zwei Begriffe definieren, „Isotope“ und „radioaktiven Zerfall“.

Die natürlichen Elemente (die 92 chemischen Elemente des Periodensystems von Mendelejew, 1869) sind eine Mischung von Isotopen, d. h. von Atomen, deren Kerne dieselbe, für ein Element bezeichnende Anzahl von Protonen enthalten und die sich nur in der Zahl der Neutronen unterscheiden. Ein Isotop wird durch die Gesamtzahl von Protonen und Neutronen gekennzeichnet, die man oben links vor das chemische Symbol schreibt. Einige an Neutronen reiche Isotope haben instabile Kerne. Diese neigen spontan dazu, ihre Energie zu verringern, indem sie etwas abgeben, z. B. ein Alpha-Teilchen (zwei Protonen und zwei Neutronen), die anderen ein Elektron (oder Beta-Teilchen), das durch Spaltung eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron entsteht. Sie verwandeln sich somit in so genannte „Tochterelemente“, deren Kern eine (vom Mutterelement) abwei-

chende Zahl von Protonen enthält. Das ist der Prozess des radioaktiven Zerfalls. Die Tochterelemente können ihrerseits selbst radioaktiv sein und zerfallen entsprechend weiter, bis am Ende ein stabiler Kern entstanden ist.

Der Prozess des radioaktiven Zerfalls ist seit über hundert Jahren bekannt. Im Jahre 1896 veröffentlichte Henry Becquerel in den „Comptes rendus de l'Académie des sciences“ die Ergebnisse seiner Versuche „sur les radiations invisible émises par les corps phosphorescents“ (Über die von phosphoreszierenden Körpern ausgesandten unsichtbaren Strahlen, Becquerel 1896). Das Phänomen der spontanen Emission von Strahlung, das Marie Curie „Radioaktivität“ getauft hatte, ist einige Jahre später von Rutherford und Soddy (1902a, 1902b) erklärt worden. Diese Autoren haben auch die Gesetzmäßigkeit des radioaktiven Zerfalls beschrieben und somit die Grundlage geschaffen, Datierungen z. B. an Gesteinen, die radioaktive Elemente enthalten, vorzunehmen. Zunächst widmeten sich die Forscher dem radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium. Dabei fiel es dem amerikanischen Chemiker Richards auf, dass Blei, das durch radioaktiven Zerfall entstanden war, ein anderes Atomgewicht hatte als das des gewöhnlichen Bleis (Richards und Lambert 1914). Dieses Problem wurde durch eine kühne Behauptung Soddys gelöst, indem er sagte, dass ein spezifisches Element mehr als eine Art von Atomen besitzt. Er nannte diese Atome „Isotope“ aus dem griechischen „gleicher Platz“. Diese Theorie wurde 1913 durch die Beobachtungen von Thomson bestätigt, denn er konnte nachweisen, dass Neon aus zwei verschiedenen Atomen mit unterschiedlichem Gewicht besteht.

Die Erdwissenschaftler haben sich seit jeher mit der Frage des Alters der Erde beschäftigt, doch war diese Frage bis Mitte des achtzehnten Jahrhunderts eine Frage der Theologen. Die Erde wurde am 23. Oktober 4004 vor Christus um 9 Uhr vormittags erschaffen. So hatte es James Ussher, anglikanischer Erzbischof von Armagh in Irland, 1654 anhand gründlicher Forschungen in der Bibel berechnet. Laut Bischof Ussher wäre die Erde 6400 Jahre alt, wenn man in Rechnung stellt, dass das Jahr Null in der Zeitrechnung nie existiert hat. Usshers Berechnungen für den Schöpfungszeitpunkt der Welt und andere biblische Ereignisse sind in den Seitenüberschriften der „King James Bible“ angegeben (Ältere jüdische Berechnungen geben als Schöpfungsdatum den 7. Oktober 3761 vor Christus an). Wie Erzbischof Ussher nebst Datum auch auf die Uhrzeit der Schöpfung gekommen ist, bleibt ein Rätsel. Immerhin ist die Sonne laut Bibel erst am vierten Tag erschaffen worden. Es erhebt sich also die Frage, wie lange die ersten drei Tage gedauert haben. Doch nicht nur Bischof Ussher, sondern auch der Theologe Burnet beschäftigte sich mit der Bildung der Erde. In seinem Buch „Telluris theoria sacra“ (Abb. 1) veröffentlichte er sein „Eierschalen-Modell“ für die Entstehung der Gebirge (Burnet 1681). Die Altersabschätzungen von Ussher blieben unumstritten, bis Hutton 1785 in seinem Buch „Theory of the Earth“ die Grundlagen eines modernen geologischen Entwicklungsprozesses publizierte. Er hielt somit als Erster das Alter der Erde auf Grund seiner Überlegungen zur Bildung mächtiger Sedimentformationen für viel älter als bis dahin angenommen.

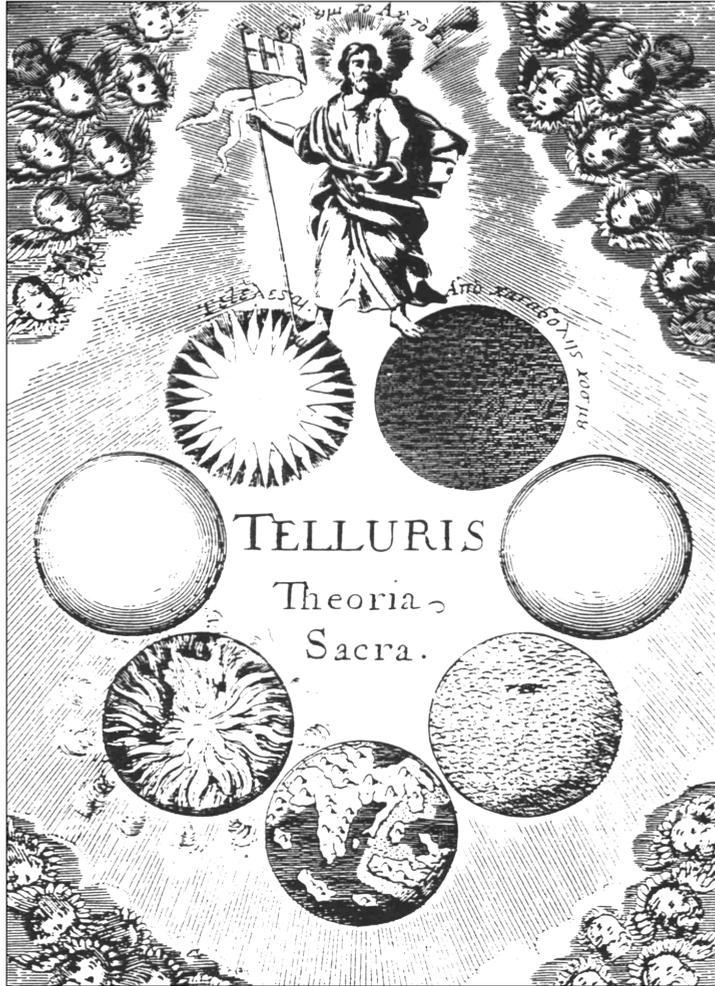


Abb. 1: Burnet (1681), *Telluris theoria sacra*.

Im Jahre 1830 publizierte Charles Lyell seine „Principles of Geology“, damit war die Grundlage für eine neue Generation von Geologen geschaffen, die von nun an nicht mehr verlangten, dass die geologischen Entwicklungstheorien mit den Büchern Moses in Einklang sein müssten und dass die Erdoberfläche durch die Sintflut geschaffen wurde.

Die modernen Isotopenuntersuchungen und somit die ersten Altersbestimmungen an Gesteinen wurden erst nach Entwicklung des modernen Massenspektrometers (Nier 1940) möglich. Nach dem Zweiten Weltkrieg erschienen die ersten Publikationen zur Altersbestimmung an geologischem Material (z. B. Aldrich und Nier 1948).

Der größte Fortschritt entstand im Zusammenhang mit den amerikanischen Apollo-Missionen zum Mond (1969-1972). Diese Herausforderung an die Erdwissenschaftler und Physiker brachte die Technik der Altersdatierung entscheidend nach vorn. Nicht nur die Gesteine des Mondes wurden mit großem Aufwand isotopisch beschrieben und datiert, gleichzeitig versuchten Wissenschaftler, die ältesten Gesteine der Erde zu entdecken, um die Theorien eines gemeinsamen Ursprungs von Erde und Mond zu beweisen. Hierbei wurde zunächst die Arbeitsgruppe aus Oxford bekannt, als es ihr gelang, Gesteine aus West-Grönland mit einem Alter von 3,7 Milliarden Jahren zu datieren (Black et al. 1971). Die Faszination der Geochronologen bei der Suche von Archaischen Gesteinen hat sich bis heute gehalten. Unter Inanspruchnahme von immer ausgereifteren Techniken ist es mit Hilfe einer hochauflösenden Ionensonde gelungen, Orthogneise von der Insel Akilia (SW-Grönland) mit einem Alter von mehr als 3,8 Milliarden Jahren zu datieren (Mojzsis & Harrison 2002). In einem Zirkon aus diesem alten Krustensegment wurde sogar ein Alter von 4,1 Milliarden Jahren gemessen.

Die Isotopenuntersuchungen lassen nicht nur Aussagen über das Alter einer Gesteinsformation zu, sondern tragen auch zur Klärung des tektonischen Aufbaus ganzer Gesteinsformationen bei.

Der dänische Gelehrte Niels Stensen, besser bekannt unter seinem lateinischen Namen Nicolaus Steno (1638-1686) hat sehr früh den Begriff Strata geprägt. Ein wesentlicher Punkt in Stenos Theorie war, dass in einer Gesteinsfolge die jüngsten Gesteine als oberste Schichten zu finden sind und dem zu Folge die Schichten, je tiefer sie liegen, älter werden. Diese Theorie basierte auf der Annahme, dass alle Gesteine sedimentären Ursprungs sind. Diese und viele andere Theorien zu mineralogischen und geologischen Beobachtungen publizierte Steno in seinem legendären Buch „Prodomus“ (1669) kurz nach seiner Konvertierung zum katholischen Glauben (1667). Danach widmete er sich ausschließlich Glaubensfragen. Dennoch blieb das von ihm geprägte „Überlagerungs-Prinzip“ die gängige Interpretation, bis die modernen Datierungsmethoden es ermöglichten, nicht Fossil führende Gesteine zu datieren und somit Gesteinsfolgen mit inversen Altersabfolgen zu erkennen. Ein typisches Beispiel hierfür ist z. B. die Datierung der „Klippe von Omkoi“ in NW-Thailand, wo mit Hilfe von absoluten Altersbestimmungen zwei Überschiebungen von älteren Gesteinspaketen auf die jüngere Unterlage nachgewiesen werden konnte (Ahrendt et al. 1997). Eine typische Anwendung von Altersbestimmungen zum Nachweis von tektonischen Bewegungen in niedrig-metamorphen Gesteinen sind z. B. die Datierungen von großräumigen Überschiebungen in Vietnam (Wemmer et al. 1999).

Wie wir bereits gesehen haben, geben die Isotope nicht nur Auskunft über das Alter, sondern sind auch charakteristisch für die einzelnen Gesteine. Wenn diese Gesteine durch Verwitterung zu Böden umgewandelt werden, wird zwar die Konzentration einzelner Elemente teilweise verändert, aber eine Fraktionierung der Isotopie findet zunächst nicht statt, zumindest ist auch für den Boden die isotopische Zusammensetzung charakteristisch. Die Isotopie des Bodens wird über die Pflanzen aufgenommen und gelangt letztendlich somit in die Nahrungskette.

Da sich die Bevölkerung im Mittelalter ausschließlich mit heimischen Nahrungsmitteln versorgte, wurde die Isotopie der Böden des jeweiligen Lebensraumes letztendlich in den Körpern der dort lebenden Menschen gespeichert. Da die chemischen Eigenschaften (Ionenradius und Ladung) von Calcium denjenigen von Strontium sehr ähnlich sind, wird im menschlichen Hartgewebe anstelle von Calcium Strontium eingebaut. Weit über 90 % des im menschlichen Körper enthaltenen Strontiums ist im Skelett gebunden (Schroeder et al. 1972). Menschlicher Knochen wird ständig regeneriert, sodass ein kompakter Oberschenkelknochen (Femur) z. B. Strontium enthält, das ein Mensch in den letzten fünf bis zehn Lebensjahren aufgenommen hat (Glimscher 1976). Das im menschlichen Femur fixierte Strontium weist daher die lokale Strontium-Isotopensignatur des Lebensraums eines Individuums in den maximal letzten zehn Jahren auf. Der Zahnschmelz eines Menschen stellt nach seiner endgültigen Bildung im Gegensatz zum Knochen nahezu zellfreies und damit nicht stoffwechselaktives Gewebe dar, das im weiteren Lebensverlauf unverändert bleibt. Die Krone eines ersten permanenten Backenzahns (1. Dauermolar) ist im Durchschnitt mit drei Jahren ausgebildet, wobei die Streuung ± 12 Monate beträgt. Der Zahnschmelz eines 1. Dauermolaren enthält Strontium, das ein Individuum in den ersten vier Lebensjahren aufgenommen hat (Grupe et al. 1997). Somit hat es die lokale Strontium-Isotopensignatur der Region gespeichert, in der der betreffende Mensch seine ersten vier Lebensjahre verbracht hat. Durch den Vergleich der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse im Femur und im Zahnschmelz eines Individuums kann unter Umständen ein Ortswechsel zu Lebzeiten überprüft werden. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit zwischen dem Geowissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen, dem Anthropologischen Institut der Universität Göttingen und dem Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität Freiburg wurden Skelettproben von der Ausgrabung „Geißmatte“ bei Sulzburg im Breisgau auf ihre Strontium-Isotopie untersucht. Dieser Friedhof gehörte vermutlich zu einer Siedlung, deren Gründung hauptsächlich auf den in der Region betriebenen Silberbergbau zurückgeführt wird. Damit konnte eine Identifizierung der Individuen erfolgen, die zu Lebzeiten in das Arbeitsgebiet eingewandert waren. Dadurch ist ein Beitrag zur Klärung der Frage geleistet worden, ob im mittelalterlichen Bergbau der Region im 12. und frühen 13. Jahrhundert heimische Bergleute tätig waren, oder ob diese aus anderen Regionen nach Sulzburg eingewandert sind (Wormuth et al. 2000, Schutkowski et al. 2001).

Wie die Isotopensignaturen in den menschlichen Körper bzw. in das Hartgewebe des Menschen gelangen, so werden auch die entsprechenden Signaturen über die Nahrungsaufnahme von Kühen letztlich in die Milch und somit in die Butter gelangen. Diese Tatsache verhilft heute Zollfahndern dazu, falsch deklarierte Butter und die damit erschwindelten EU-Subventionen zu entlarven, denn schließlich besitzt Butter aus der Alpenregion eine andere Isotopensignatur als Butter aus Polen oder Neuseeland (Rossmann et al. 2000).

Ebenfalls verhilft diese Technik auch zur Identifikation der Herkunft von Weinen bzw. ob diese durch Verschnitt verfälscht wurden (Horn et al. 1998).

Da es mit Hilfe moderner Isotopenanalytik wie gezeigt möglich ist, Wirtschaftskriminellen ihre Vergehen nachzuweisen, war es nahe liegend, den Versuch zu unternehmen, auch historische Kriminalfälle mit Messungen von Isotopenverhältnissen zu lösen. Der schwedische König Karl XII. (1682-1718) wurde 1718 in der Schlacht bei Fredrikshald in Norwegen aus dem Hinterhalt erschossen. Seitdem wird gerätselt, ob der König von einem norwegischen Feind erschossen wurde oder ob nicht vielmehr von einem Soldaten aus den eigenen Reihen, da die Angehörigen der schwedischen Armee des neunzehn Jahre andauernden Krieges längst müde waren. Um die These zu untersuchen, wurde die vermeintliche Kugel (ein mit Blei gefüllter Uniformknopf) auf ihre Blei-Isotopie untersucht. Dieser Knopf befindet sich zusammen mit der Uniform, die der König bei seiner Ermordung trug, im Museum von Varberg (Schweden). Man erhoffte sich aus der Zusammensetzung der Blei-Isotope Informationen über die Herkunft des Bleis und somit, ob es sich um norwegische oder schwedische Munition gehandelt hatte. Die Isotopenverhältnisse stimmen zwar recht gut überein mit denen des Erzes aus dem sogenannten Oslofeld in Norwegen, sind aber dem des Bleis aus nord-europäischem Kupferschiefer noch ähnlicher (Wedepohl et al. 1978). Somit kann eine Herkunft durch Import entweder nach Norwegen oder nach Schweden nicht ausgeschlossen werden. Damit bleibt die Frage nach der Nationalität des Schützen ungelöst.

Die Frage nach der Blei-Isotopenzusammensetzung in Munition ist heute nach wie vor bei der Aufklärung von Verbrechen von großer Bedeutung. Die Firma Winchester lässt täglich ihre Produktion auf Blei-Isotopie untersuchen (Andrasko et al. 1993) und anhand der Auslieferungslisten können somit am Tatort sicher gestellte Projektile zum Verkäufer zurückverfolgt werden.

Nicht nur die Bleizusammensetzung in Projektilen dient zur Überführung von Kriminellen, auch andere Isotope wie z. B. Sauerstoff hinterlassen deutliche „Fingerabdrücke“.

Zwischen Dezember 1993 und Dezember 1996 sorgten in Österreich und Deutschland vier Serien von Briefbomben an Prominente, darunter den damaligen Bürgermeister Helmut Zilk, für Aufregung. Da der Täter äußerst geschickt seine Spuren verwischte, hatten die ermittelnden Behörden lange Zeit keine Anhaltspunkte. Durch einen Artikel in „Der Spiegel“ wurde das deutsche Bundeskriminalamt auf die Arbeitsgruppe um Dr. H. Förstel am Forschungszentrum Jülich aufmerksam. In seiner Arbeitsgruppe werden die Isotopenverhältnisse von Sauerstoff in Wasserproben analysiert. Diese Daten erlauben es flächendeckend die regionale Herkunft von Wasser zu bestimmen. Da solche Analysen auch für Österreich verfügbar waren, war es nun möglich, den Täter regional einzugrenzen. Das Wasser wurde aus dem Gipsfuß einer Rohrbombe gewonnen, die aus dem Anschlag auf eine Roma-Siedlung im österreichischen Oberwart, bei der vier Menschen getötet wurden, stammte. Die Untersuchungen der Jülicher Gruppe bestätigten die Vermutung der österreichischen Behörden, dass der Täter aus dem Süden Österreichs, höchstwahrscheinlich aus dem südlichen Burgenland oder der Süd-Steiermark kam, konnten dagegen Wien und alle Gebiete nördlich der Alpen

ausschließen (Messer Griesheim 2002). Hiermit wurde ein wesentlicher Beitrag zur Überführung des Bombenlegers Franz Fuchs mit Hilfe der Isotopenanalytik geleistet.

Als der Meteorologe Henrik Mohn (1835-1916) aus der Anlandung von sibirischem Treibgut an der Küste von Südwest-Grönland auf eine von Landmassen nicht gestörte Westdrift im Polarmeer schloss, fühlte der norwegische Polarforscher Fridtjof Nansen (1861-1930) sich herausgefordert, diese These zu untermauern.

Mit der finanziellen Unterstützung des norwegischen Parlaments, des Königs und privaten Spendern ließ er in Larvik von dem Schiffsbauer Collin Archer ein dem Packeis besonders angepasstes Schiff bauen, die 307 t große „Fram“ („Vorwärts“). Das Schiff hatte eine Wasserverdrängung von 800 Tonnen, eine Länge von 39 m, eine Breite von 11 m und einen Tiefgang von 5 m. Der Rumpf war so stark gebaut und so geschickt geformt, dass er, eingefroren im Packeis, nicht wie viele andere Schiffe vorher von den Eismassen zerdrückt wurde.



Abb. 2: Der Weg der „Fram“ während der Drift 1893-1896.

Am Mittsommertag 1893 brach er mit zwölf Begleitern von Tromsø zur Insel Nowaja Semlja auf. Kapitän war Otto Neumann Sverdrup, der später selber Entdeckungsfahrten leitete. Im Polarmeer angekommen, musste er die „Fram“ der Eisdrift überlassen. Die Zeit wurde für konsequente Messungen der Meeres- und Eisverhältnisse genutzt. Als nach anderthalb Jahren deutlich wurde, dass die Drift weit südlich des Pols vorbeiführte und damit die Hoffnung zunichte machte, ihn auf diese Weise zu erreichen, versuchte Fridtjof Nansen mit seinem Begleiter

Hjalmar Johansen am 14.03.1895 von der „Fram“ aus per Ski und Hundeschlitten den Pol zu erreichen. Er gelangte bis $86^{\circ} 14'$ nördlicher Breite, so nah wie nie ein Mensch zuvor dem Pol gewesen war. Unter schwersten Strapazen schlugen sie sich nach Franz-Josef-Land durch, wo sie überwinteren. Am 17. Juni 1896 stießen sie zufällig auf eine britische Expedition. Mit deren Hilfe gelangten sie nach Tromsø zurück. Eine Woche später traf dort auch die als verschollen geltende „Fram“ ein, die kurz zuvor nordwestlich von Spitzbergen vom Packeis freigegeben worden war.

Wenn auch das eigentliche Expeditionsziel nicht vollkommen erreicht wurde, so war die wissenschaftliche Ausbeute außerordentlich groß. Das Schiff, das später auch von Otto Neumann Sverdrup und Roald Amundsen für Polarfahrten genutzt wurde, liegt seit 1936 auf der Halbinsel Bygdøy in Oslo im „Fram Museum“.

Die These über die nicht gestörte Westdrift im Polarmeer konnte 2002 in einer Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus Göttingen und Kiel mit Hilfe von modernen isotopengeochemischen Analysen gelöst werden. Altersdatierungen an einem Sedimentkern aus dem Arktischen Meer und Sedimentproben der umrandenden Schelfgebiete zeigten nicht nur die Klimaschwankungen im Arktischen Ozean, sondern auch, dass die Meeresströmungen und somit die vom Treibeis verfrachteten Sedimente den von Nansen empirisch nachgewiesenen Weg der Eisdrift genommen hatten (Tütken et al. 2002).

Basierend auf Liefergebietsanalysen können Aussagen über globale Klimaschwankungen gemacht werden. In allen Klimamodellen ist die Oberflächentemperatur des Ozeans (SST, Standard Surface Temperature) eine wichtige Größe, da diese die Bedingungen an der Grenzschicht „Ozean-Atmosphäre“ kontrolliert (Beck et al. 1992). Es besteht daher ein starkes Interesse, die SST der Vergangenheit, insbesondere der Tropen, zu rekonstruieren. Als SST-Thermometer dienen die sogenannten Proxys, das sind von der Temperatur abhängige Isotopen- ($\delta^{18}\text{O}$) oder Element-Verhältnisse (Sr/Ca, U/Ca, Mg/Ca oder F/Ca) in kalzitischen und aragonitischen Foraminiferen und gebänderten aragonitischen Korallen. Die moderne Isotopenanalytik bietet die Möglichkeit, solche Elementverhältnisse sehr genau zu bestimmen. An einem Beispiel ist in Abb. 3 dargestellt, wie durch Sr/Ca- und U/Ca- Thermometrie an Korallen (*Porites lutea*) im Indischen Ozean vor der Westküste Australiens Temperaturschwankungen mit einer Genauigkeit von ca. 1°C bestimmt werden können.

Der Ausbruch des Pinatubo 1991 ist in den Korallen des Ningaloo Reefs durch einen SST-Abfall gegenüber dem Langzeitmittelwert um ca. 1°C im Jahr 1992 und $1,9^{\circ}\text{C}$ im Jahr 1993 aufgezeichnet. Durch den asiatischen Monsun verursachte SST-Anomalien scheinen sich ebenfalls an der westaustralischen Küste auszuwirken.

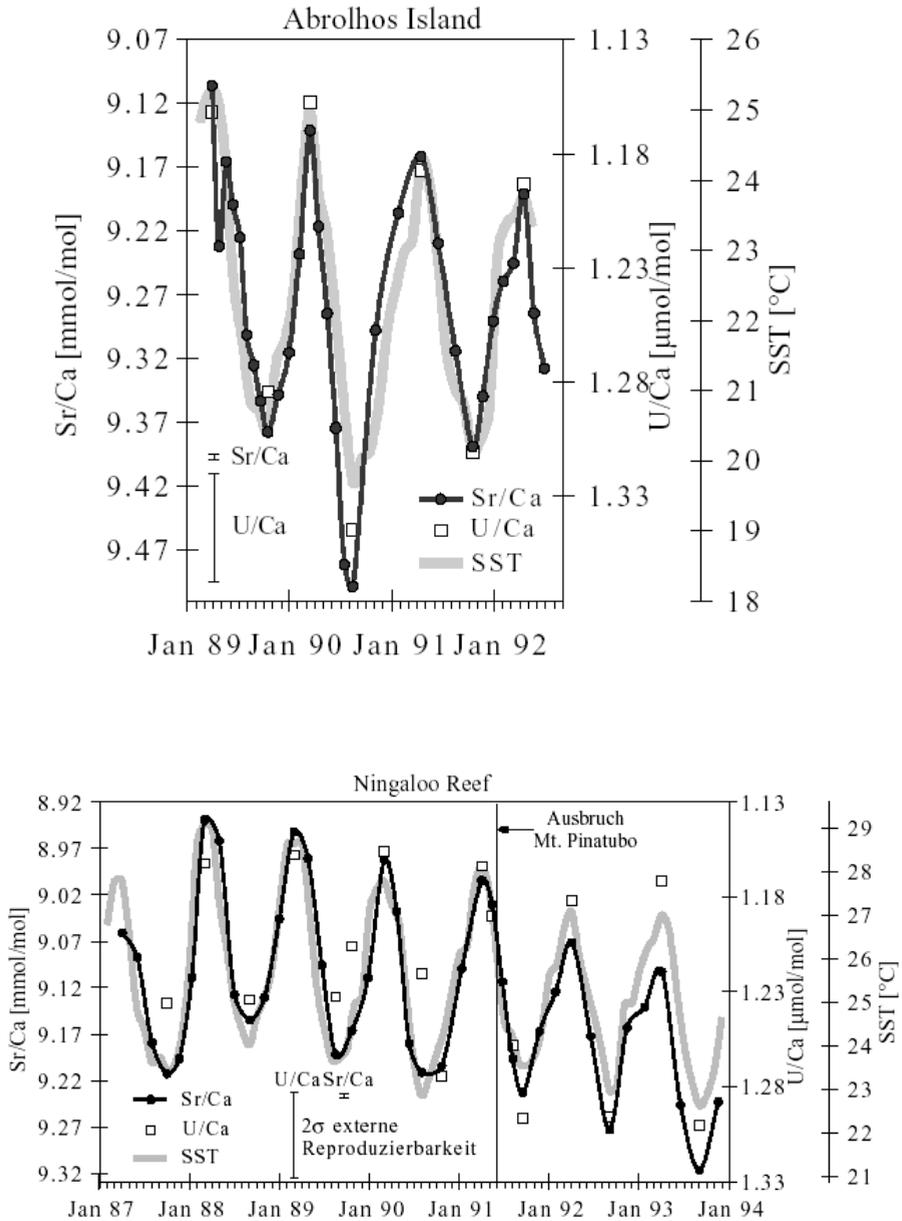


Abb. 3: Vergleich zwischen SST-Daten, Sr/Ca- und U/Ca-Verhältnissen in *Porites lutea*, Lokalität Abrolhos Island und Ningaloo Reef (Wischow 1999).

Damit die zukünftige klimatische Entwicklung in engen Grenzen vorausgesagt werden kann, ist die Gewinnung von SST-Daten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung von entscheidender Bedeutung, um damit die computergestützten Klimamodelle zu überprüfen und zu eichen.

Neben den Vorhersagen zur Klimaentwicklung wird in Zukunft vor allem auch die Verfügbarkeit des Wassers eine entscheidende Rolle spielen. Für diese Fragestellung können wir wiederum auf unsere Isotopensysteme zurückgreifen, in erster Linie auf die des Strontiums. Variationen der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse im Grundwasser zeigen eine Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren, unter denen die mineralogisch-geochemische Zusammensetzung des Aquifers bzw. des Einzugsgebietes dominieren. Die Sr-Isotopenverhältnisse in natürlichen Wässern werden über Wechselwirkungen zwischen Wasser und Mineralen kontrolliert. Für die Isotopensignatur des Wassers spielen unterschiedliche Löslichkeiten der verwitternden Minerale die entscheidende Rolle, aber auch anthropogene Quellen müssen berücksichtigt werden. Die Strontium-Isotopensystematik kann somit als „Tracer“ zur Berechnung von Mischungen zweier unterschiedlicher Wässer eingesetzt werden.

Zur Trinkwasserversorgung der Stadt Göttingen wird seit 1980 eine kontrollierte Mischung von Grundwässern der Eigenförderung mit Oberflächenwässern der Sösetalsperre (Harz) im Verhältnis von etwa 1:4 vorgenommen. Die Untersuchungen (Wiegand et al. 1998) zeigen, dass die beprobten Göttinger Wasserwerke Mischungsverhältnisse von 76,5 % bis 86,4 % aufweisen und diese mit den von den Wasserwerken angegebenen Werten übereinstimmen. Die Strontium-Isotopie erlaubt uns nicht nur, Mischungsverhältnisse zu berechnen, sondern gibt aus den oben genannten Gründen auch Aufschluss über die Aquifere und somit schließlich über die Fließwege des Wassers. Diese Technik wurde im Rahmen einer Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe Isotopengeologie am GZG und der Harzwasserwerke GmbH eingesetzt, um ein Modell der Grundwasserfließwege im Aquifer von Liebenau II (NW Deutschland) zu entwickeln.

Basierend auf den Unterschieden der Sr-Isotopensignaturen in den Grundwässern konnten für das Einzugsgebiet des Wasserwerkes Liebenau II vier Grundwasserhorizonte in den quartären Lockersedimenten unterschieden werden (Abb. 4). Der Vergleich zwischen Sr-Isotopenverteilung und Zusammensetzung der Hauptkomponenten der Grundwässer zeigt gute Übereinstimmungen für die unterschiedlichen Grundwasserhorizonte und bestätigt, dass dieselben Prozesse für die chemischen und isotopechemischen Variationen der Grundwässer verantwortlich sind. Über charakteristische Unterschiede in den $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen konnte zwischen Silikat- und Karbonatauflösung unterschieden werden (Wiegand et al. 2001).

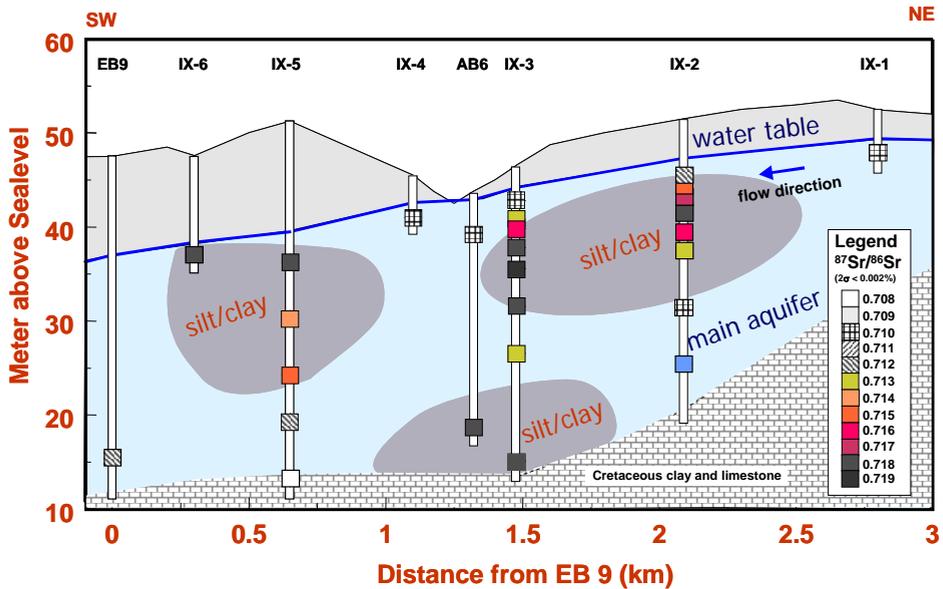


Abb. 4: Modell der Grundwasserfließwege im Aquifer von Liebenau II, dargestellt anhand der Brunnengalerie 9 (nach Wiegand et al. 2001).

Der Großraum Bangkok leidet wie viele Ballungsgebiete unter Landabsenkung wegen des enorm hohen Verbrauchs an Grundwasser. Die Entnahme von bis zu 1,4 Millionen Kubikmeter pro Tag führt zu Landabsenkungsraten bis zur 10 Zentimeter pro Jahr (Ramnarong & Buapeng 1992). Diese Absenkungen haben zu nicht unerheblichen Schäden an der Infrastruktur dieser Region beigetragen. Eine mögliche Maßnahme zur Eindämmung dieser Absenkung wäre die Reinjektion von gereinigtem Oberflächenwasser. Damit die Fließwege des reinjizierten Wassers verfolgt werden können, müssen Parameter analysiert werden, die ohne künstliche chemische Zusätze bestimmt werden können. Basierend auf Erkenntnissen der Studie für das Wasserwerk Liebenau II, wurden in einer Langzeitstudie mehrere Entnahmehäuser aus drei unterschiedlichen Aquifern im Großraum Bangkok auf ihre Strontium-Isotopie untersucht, um die Konstanz der Zusammensetzung zu überprüfen. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass ausreichende Unterschiede in den $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnissen zwischen Grund- und Oberflächenwasser vorhanden sind und dass diese über Jahre konstant sind (Hansen et al. 2002). Damit wäre ein Monitoring des reinjizierten Wassers möglich. Sollte aber die Entscheidung zugunsten der Versorgung ausschließlich mit Oberflächenwasser erfolgen, könnte jederzeit eine illegale Wasserentnahme aus den Aquifern nachgewiesen werden.

Nach diesem Exkurs durch einige der Anwendungen der modernen Isotopenanalytik möchte ich zu der Anfangs gestellten Frage nach dem Alter der Erde zurückkehren. Die bis heute beste Bestimmung für das Alter der Formation der festen Erde beruht auf $^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$ -Messungen von Kleine et al. (2002). Diese Autoren geben das Alter der Erde mit $4,53 \pm 0,002$ Milliarden Jahre an, für die Formation unseres Sonnensystems wird ein Alter von $5,566 \pm 0,002$ Milliarden Jahren errechnet. Auch wenn diese Bestimmungen nahe an dem eigentlichen Erdalter liegen, wird die Suche nach noch genaueren Datierungen weitergehen. Eine Suche, die Arthur Holmes (1913) in folgendem Satz formulierte:

„It is perhaps a little indelicate to ask our Mother Earth her age, but Science acknowledges no Shame and from time to time has boldly attempted to wrest from her a secret which is proverbially well guarded.“

Literatur

- Ahrendt, H., Hansen, B. T., Lumjuan, A., Mickein, A. and Wemmer, K. (1997): Tectonometamorphic evolution of NW-Thailand deduced from U/Pb-, Rb/Sr-, Sm/Nd- and K/Ar-isotope investigations. In: IGCP 359 and IGCP 383 Proc. Of the Internat. Conference on Stratigraphy and Tectonic Evolution of Southeast Asia and the South Pacific, 19-24 August 1997, Bangkok, 314-319
- Aldrich, L. T. and Nier, A. O. (1948): Argon 40 in potassium minerals, Phys. Rev., 74, 876- 877
- Andrasko, J., Kopp, I., Åbrink, Å. and Skjöld, T. (1993): Lead Isotope Ratios in Lead Smears and Bullet Fragments and Application in Firearm Investigations, Journal of Forensic Sciences, JFSCA, Vol. 38, No 5, 1161-1171
- Beck, J. W., Edwards, R. L., Ito, E., Taylor, F. W., Recy, J., Rougerie, F., Joannot, P. and Henin, C. (1992): Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios, Science 257, 644-647
- Becquerel, H. (1896) : Sur les radiations invisibles émises par phosphorescence ; Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents ; Sur les radiations invisibles émises par les sels d'uranium, Compt. Rend., 122, 420, 501, 689
- Black, L. P., Gale, N. H., Moorbath, S., Pankhurst, R. J. and McGregor, V. R. (1971): Isotope dating of very early Precambrian amphibolite facies gneisses from the Godthaab District, West Greenland, Earth Planet. Sci. Lett. 12, 245-259

- Burnet, T. (1681): *Telluris theoria sacra: Orbis nostril originem & mutationes generales, quas aut jam subiit, aut olim subiturus est, complectens. Libri duo priores de diluvio & paradiso*, London: Typis R. N., Impensis G. Kettilby, 306 p.
- Eisenhauer, A., Wischow, D., Heiss, G., Dullo, W.-C. and Hansen, B. (1999): Sr/Ca and U/Ca Thermometry on *Porites Lutea* Corals from the Indian Ocean, *Journal of Conference Abstracts* 4/1, Cambridge Publications, 198
- Glimscher, M. J. (1976): Composition, structure, and organisation of bone and other mineralised tissues and the mechanism of calcification. In: *Handbook of physiology - Endocrinology*, Chapter 7, Williams and Wilkins, Baltimore
- Grupe, G., Price, T. D., Schröter, P., Söllner, F., Johnson, C. and Beard, B. L. (1997): 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
- Hansen, B. T., Pawlig, S., Chusanathas, S. and Buapeng, S. (2002): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Ratios: A natural Tracer to Characterize Aquifers and Groundwater Flow Paths: Examples from the Area, NE of Bangkok, *The Symposium on Geology of Thailand* 26-31 August 2002, Bangkok, Thailand
- Holmes, A. (1913): *The age of the Earth*, Harper and Brothers, London, 194 p.
- Horn, P., Hölzl, S., Todt, W. and Matthies, D. (1998): 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 Environ. Health Stud.* 34, 31-42
- Hutton, J. (1785): *Theory of the Earth*, Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1788, Vol. I
- Johansson, Å. (1992): En Blyisotopstudie av Karl XIIIs kulknapp, *Varbergs Museum-Årsbok*, 15-23
- Kleine, T., Münker, C., Mezger, K. and Palme H. (2002): Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry, *Nature* 418, 952-955
- Lyell, C. (1830): *Principles of Geology*, Vol. I-III, John Murray, London, 1830-1833
- Messer Griesheim (2002): Isotope überführen Briefbombenleger, *Gas Aktuell* 24, 1
- Mendelejew, D. (1869): Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente, *Zeitschrift für Chemie* 12, 405-406

- Mojzsis, S. J. and Harrison (2002): Establishment of a 3.83-Ga magmatic age for the Akilia tonalite (southern West Greenland), *Earth. Planet. Sci. Lett.* 202, 563-576
- Nier, A. O. (1940): A mass spectrometer for routine isotope abundance measurements, *Rev. Sci. Instrum.*, 11, 212-216
- Ramnarong, V. & Buapeng, S: (1992): Groundwater Resources of Bangkok and its Vicinity: Impact and Management. In: *Proc. National Conf. Geol. Res. Thailand: Potential for future Development*, Dept. Min. Res., Bangkok, 172-184
- Richards, T. W., and Lemberg, M. E. (1914): Atomic weight of lead of radioactive origin, *J. Am. Chem. Soc.*, 36, 1329-1344
- Rossmann, A., Haberhauer, G., Hölzl, S., Horn, P., Pichlmayer, F. and Voerkelius, S. (2000): The potential of multielement stable analyses for regional origin assignment of butter, *Eur. Food Technol.* 21, 32-40
- Rutherford, E. and Soddy, F. (1902a): The cause and nature of radioactivity, Pt. I. *Phil. Mag.*, ser. 6, 4, 370-396
- Rutherford, E. and Soddy, F. (1902b): The cause and nature of radioactivity, Pt. II. *Phil. Mag.*, ser. 6, 4, 569-585
- Schroeder, H., Tipton, I. and Nason, I. (1972): Trace metals in man: Strontium and barium, *Journal of Chronic Diseases* 25, 491-517
- Schutkowski, H., Hansen, B., Wormuth, M. and Herrmann, B. (2001): Signaturen Stabiler Strontium-Isotope in menschlichen Hartgeweben- Möglichkeiten für die osteologische Identifikation. In: Oehmichen, M. Geserick, G. (Hrsg.): *Osteologische Identifikation und Altersschätzung*, *Research in Legal Medicine*, 26, Schmidt-Römhild, Lübeck, 31-40
- Steno, N. (1669): *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus*. In: White, G. W. (Ed.): *Contributions to the History of Geology*, Hafner, New York, Vol. 4, 1968
- Tütken, T., Eisenhauer, A., Wiegand, B. and Hansen, B. T. (2002): Glacial-interglacial cycles in Sr and Nd isotopic composition of Arctic marine sediments triggered by the Svalbard/Barents Sea ice sheet, *Marine Geology*, 182, 351-372
- Wedepohl, K. H., Delevaux, M. H. and Doe, B. R. (1978): The potential source of lead in the Permian Kupferschiefer bed of Europe and some selected Paleozoic mineral deposits in the Federal Republic of Germany, *Contrib. to Min. and Petr.* 65, 273-271

- Wemmer, K., Sievers, H., Ta Trong Thzang; Phan Trong Trinh (1999): New hints for nappe tectonics in Northern Viet Nam by K/Ar dating of very low grade sediments, *Journal of Geology, Series B* 13-14, 107-109
- Wiegand, B., Dietzel, M., Bielert, U., Groth, P. and Hansen, B. T. (2001): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse als Tracer für geochemische Prozesse in einem Lockergesteinsaquifer (Libenau, NW-Deutschland), *Acta hydrochim. Hydrobiol.* 29, 2-3, 139-152
- Wischow, D. (1999): Sr/Ca- und U/Ca-Thermometrie an Korallen (*Porites lutea*) aus dem Indischen Ozean, Diss. Univer. Göttingen. 78 p.
- Wormuth, M. Hansen, B. T. and Schutkowski, H. (2000): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse in menschlichem Knochen und Zahnschmelz als Indikator für Ortswechsel zu Lebzeiten, Beihefte zum *Eur. Jour. of Mineralogy*, 12, 238

Der Planet Erde ist ein nur wenig verstandenes System von geologischen, biologischen und kosmischen Prozessen und somit ein interessantes und vielseitiges Forschungsobjekt. Die hier vorgestellten Beiträge waren Teil einer öffentlichen Ringvorlesung der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen und der Georg-August-Universität Göttingen im WS 2002/2003, organisiert von den Herausgebern dieses Buches. Den Herausgebern ist es ein Anliegen, einige wichtige und interessante Aspekte der Geowissenschaften einer breiteren Öffentlichkeit zu vermitteln. Es besteht nicht der Anspruch auf Vollständigkeit dieses Themenkomplexes. Die Herausgeber wollen jedoch Anstöße geben, sich intensiver mit dem Themenfeld Geowissenschaften zu beschäftigen. Die ausgewählten Beiträge sollen dem Leser helfen, sich in der Vielfalt der Facetten dieses Forschungsreiches zurechtzufinden.



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

ISBN 3-938616-07-5

Universitätsverlag Göttingen