

- Aufschlüsse auf vulkanischen Inseln sind rar und meist stark verwittert, zu erkennen an den braunen Rändern des Gesteins.

WAS ISOTOPISCHE BAUSTEINE ÜBER OZEANISCHE INSELN VERRATEN

27. PETERSEN EXZELLENZ-PROFESSUR 02/2023

Werner Petersen Stiftung

PROF. DR. OLIVER NEBEL

Position:

Associate Professor, Leiter des Isotopia Laboratory, Monash University, Melbourne, Australien

Forschungsinteresse:

Interaktion der Erdkruste mit dem Erdmantel im ozeanischen Bereich



Ozeanische Inseln sind in vielerlei Hinsicht exotisch. Nicht nur aufgrund ihrer Palmen und weißen Strände, oder weil sie im weiten Ozean für Jahrtausende schier unberührte Vegetation beherbergen. Diese isolierten Inseln sind auch fast ausschließlich vulkanischen Ursprungs und verbergen geologische Geheimnisse, die Rückschlüsse auf den Ursprung unseres Planeten zulassen. Vulkanische Ausbrüche inmitten des Ozeans machen oftmals Schlagzeilen mit teils atemberaubenden Bildern von heißen Lavaströmen, die Berghänge hinunter fließen, oder gigantischen Explosionen die sogar aus dem All zu beobachten sind. Viele ozeanische Inseln sind, ähnlich wie Eisberge, die im Meer schwimmen, nur die Spitze von gewaltigen Vulkanen, die aus dem Ozean herausragen.

Was jedoch auffällt ist, dass sich nicht alle Vulkanausbrüche gleichen, sondern sehr unterschiedliche physikalische Merkmale zeigen, die charakteristisch für einzelne Vulkane sind. Explosionen ereignen sich hauptsächlich entlang der tektonischen Strukturen der Platten, die unsere Erdkruste ausmachen, zum Beispiel entlang des Pazifischen Feuerrings. Vulkane mit massiven Lavaströmen sind jedoch eher willkürlich im Ozean verteilt, treten häufig als Gruppe von Inseln auf und passen somit nicht in das klassische Bild der Platten-tettonik. Diese Vulkane bilden sich inmitten der tektonischen Platten und einige scheinen aufgereiht einer unsichtbaren Linie zu folgen. Kombiniert mit den tektonischen Plattenbewegungen wird jedoch klar, dass es sich bei dem Ursprung dieser Linie von gewaltigen Feuerbergen um punktuelle Phänomene handeln muss. Die Platten schieben sich nur darüber hinweg, sodass sich Magma einen Weg durch die basaltische Erdkruste schneidet und wie Perlen aufgereichte Vulkane auf der Erdoberfläche zurücklässt.

Dieser recht simplen, systematischen Einteilung in zwei Gruppen

von Vulkanen liegt das Prinzip der Petrologie zu Grunde, welche Prozesse beschreibt, die sich im Erdinneren ereignen. Die Rückschlüsse auf den Ursprung des Materials, das an der Oberfläche als Lava oder Asche austritt, und somit die Prozesse, die die Vulkane steuern, lassen sich aus der chemischen Zusammensetzung der Laven gewinnen. Die generelle Gesteinschemie deutet hier bereits auf die Schlüsselrolle von Wasser und anderen Volatilen, wie zum Beispiel Kohlendioxid, hin. Diese kontrollieren unter anderem die Explosivität der Vulkane. Der Ursprung des Magmas liegt jedoch im obersten Erdmantel und die Quelle des heißen Gesteins liegen oftmals noch viel tiefer innerhalb der Erde.

Konventionelle geochemische Methoden stoßen hier an ihre Grenzen. Die isotopische Zusammensetzung von spezifischen Elementen lässt jedoch detaillierte Einblicke in den Ursprung der Vulkane zu. Einzelne Isotope, oder die Kombination von mehreren Isotopensystemen, „sehen“ durch die komplexen sub-vulkanischen Prozesse hindurch. Als quasi „Gesteins-DNS“ lassen sich so Gruppen von Komponenten innerhalb von Vulkanen

identifizieren. Was sich zeigt, ist ein komplexes Bild von Zyklen innerhalb der Erde, das Rückschlüsse auf einstige Kontinente zulässt und bis an den Anfang unseres Planeten zurückreicht.



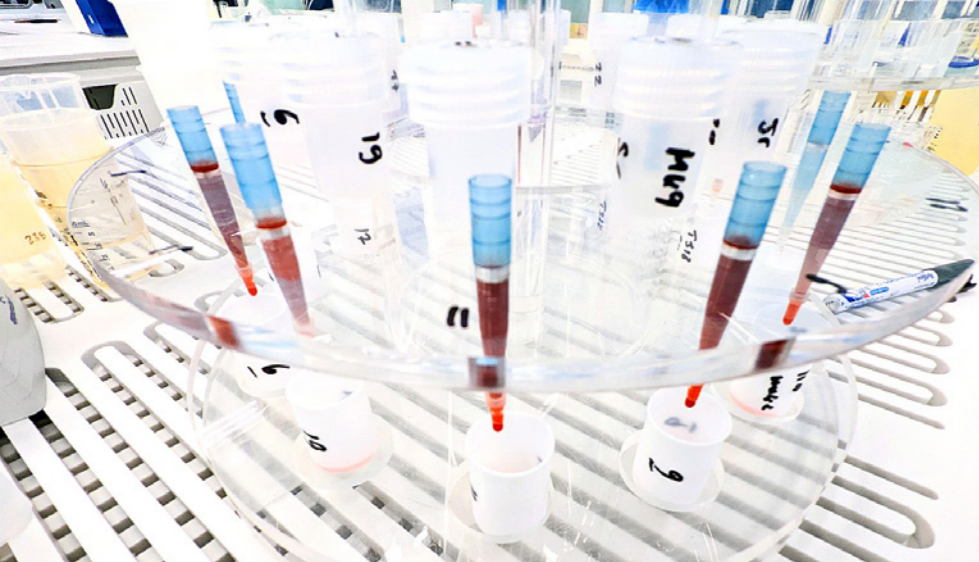
- Vulkanoklastische Ablagerungen mit einer eingeschlossenen vulkanischen Bombe (siehe Kreis). Durch Interaktion mit Meerwasser können auch Intraplatten-Vulkane explosive Ausbrüche zeigen.



- Mantel-Xenolith innerhalb eines Basalts (siehe Kreis). Der Einschluss wurde aus einer Tiefe von ungefähr 60 Kilometern zu Tage gefördert.

Oliver Nebel studierte Geologie/Paläontologie in Münster und promovierte dort anschließend über Hochpräzisionsmessungen von radiogenen und stabilen Isotopen in Hochtemperaturgesteinen. Nach drei Jahren Postdoc an der Vrije Universiteit in Amsterdam wechselte Nebel als Reseach Fellow an die Australian National University in Canberra.

Seit 2015 ist Oliver Nebel als Associate Professor an der Monash University in Melbourne tätig, wo er das Isotopia Laboratory gründete und leitet. Nebel hat grundlegende Arbeiten zur isotopischen Entwicklung von Vulkanquellen erstellt und forscht an der Interaktion der Erdkruste mit dem Erdmantel, insbesondere im ozeanischen Bereich.



LABORANALYSE VON VULKANISCHEM GESTEIN

Sequenzielle Abtrennung von einzelnen Elementen von der Gesteinsmatrix nach Hochdruck-Aufschlüssen mit starken Säuren. Die isotopische Zusammensetzung der separierten Elemente wird anschließend im Massenspektrometer gemessen.

Ozean-Insel Basalte und Isotope

Intraplatten-Vulkane sind aus sogenannte Ozean-Insel Basalten aufgebaut (OIB), obwohl nicht alle Laven tatsächlich basaltisch sind, sondern anders klassifiziert werden. Diese Variation ist eine Funktion des Gesteinschemismus und zumeist auf zwei Faktoren zurück zu führen. Zum einen, wie sich die Schmelze auf dem Weg zur Oberfläche verändert. Während Lava abkühlt, kristallisieren Minerale in verschiedenen Proportionen und Kombinationen, sodass sich die Restschmelze um eben diese Mineralzusammensetzung ändert; meist wird die Schmelze siliziumreicher und auch dickflüssiger. Der andere kritische Faktor verbirgt sich in der Art und Weise, wie Schmelze sich im Erdmantel bildet und in welcher Tiefe. Die Mineralzusammensetzung des Mantels ändert sich mit steigendem Druck und somit auch die partielle Schmelze, die hier entsteht. Durch Spurenelementanalysen ist bekannt, wie Schmelze sich bilden sollte. So lässt sich ein bestimmter Elementcocktail einer Tiefe zuordnen. Tatsächlich passt die Gesteinschemie vieler OIB jedoch nicht in dieses simple Schema. Wenn beide Faktoren also ausgeschlossen werden können, bleibt nur eine Alternative: Was schmilzt, ist nicht normaler Erdmantel. Nur woher kommt dieser ungewöhnliche Mantel?

Isotope sind hier des Rätsels Lösung. Isotope sind nichts anderes als Atome eines Elementes mit unterschiedlicher Masse. Die Anteile dieser unterschiedlichen Massen eines Elementes können mittels modernster Technik hochpräzise gemessen werden. In der Gesteinschemie unterscheiden wir grundsätzlich zwei verschiedene Arten von Isotopenanalysen.



Das Aitutaki Atoll, eine ozeanische Insel vulkanischen Ursprungs im zentralen Südpazifik mit einer Höhe von ungefähr 4.000 Meter über dem Meeresboden.

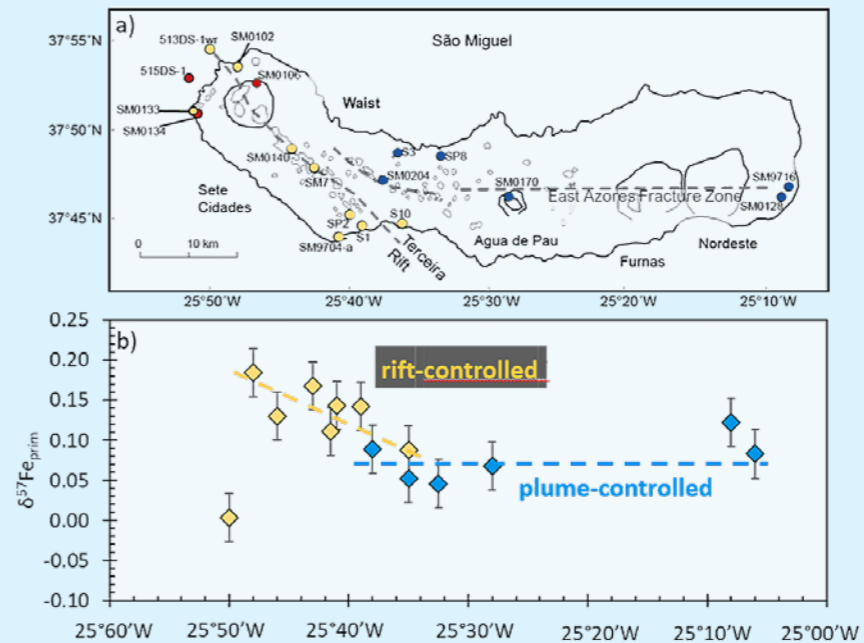
Radiogene Isotope sind das Produkt radioaktiven Zerfalls. Das Verhältnis von Mutterisotop zu Tochterisotop, die Zerfallsrate sowie die Zeitspanne, in der Isotope zerfallen, sorgen so für einen Fingerabdruck, der es erlaubt, spezifische Reservoirs auf der Erde zu klassifizieren. Dies basiert vor allem auf Isotopensystemen, die eine extrem lange Halbwertszeit haben und so zum Beispiel das Aufschmelzen des Mantels und die Bildung von neuer Kruste aufzeichnen, die unter Umständen Milliarden von Jahren in der Vergangenheit liegen.

Stabile Isotope sind die zweite, wichtige Gruppe der Isotopenstudien. Die „Fraktionierung“ dieser Isotope resultiert hauptsächlich aus Massenbewegungen während unterschiedlicher geologischer Prozesse. Dies kann die Kristallisation von Mineralen aus einer Schmelze sein oder aber das Aufschmelzen von Gestein in der Tiefe. Kombiniert man beide Methoden miteinander in einer Reihe von Gesteinen einer einzelnen Insel, so lassen sich die Quelle, als auch der Aufschmelzprozess, sowie die Evolution der Schmelze en route zur Oberfläche rekonstruieren.

Verschollene Kontinente mitten im Ozean

In einer Reihe von Studien an OIB konnte mittels stabiler und radiogener Isotope gezeigt werden, dass sich Komponenten im Mantel befinden, die einst an der Erdoberfläche waren. Durch den Prozess der Subduktion wurden diese an aktiven Plattengrenzen in den Mantel gebracht und dort über hunderte von Millionen von Jahren aufbewahrt, um dann mittels Auftrieb im Mantel wieder an die Oberfläche zu gelangen.

Ein Beispiel für diesen Prozess zeigt sich an der Insel Mangaia. Dieses Atoll gehört zu den Cook Inseln im südlichen Pazifik und ist gerade mal etwas grösser als 50 Quadratkilometer, also knapp halb so groß wie das Kieler Stadtgebiet. Der Schein trügt jedoch: Mangaia ist nur die Spitze eines 4.750 Meter hohen Vulkans. Isotopenanalysen von Blei und Hafnium, beides radiogene Elemente, die sich aus dem Zerfall von Uran und Lutetium speisen, zeigen, dass eine archaische Komponente in der Quelle der Insel seit mehr als 2,5 Milliarden Jahren im Mantel verweilt. Die Insel selbst ist jedoch um den Faktor 1.000 jünger. Diese Quelle liegt in der Übergangszone zwischen oberem und unterem Mantel in zirka 400 bis 600 Kilometer Tiefe. Des Weiteren haben Eisen-Isotopenanalysen gezeigt, dass dieses Mate-



EISEN-ISOTOPEN VON BASALTEN VON SÃO MIGUEL

Die Eisen-Isotopen von Basalten von São Miguel spiegeln die Struktur der Azoren-Insel wider und damit die petrologischen Prozesse, die im Untergrund während der Schmelzgenese agieren. Quelle: Ruttort et al., GCA, 2022

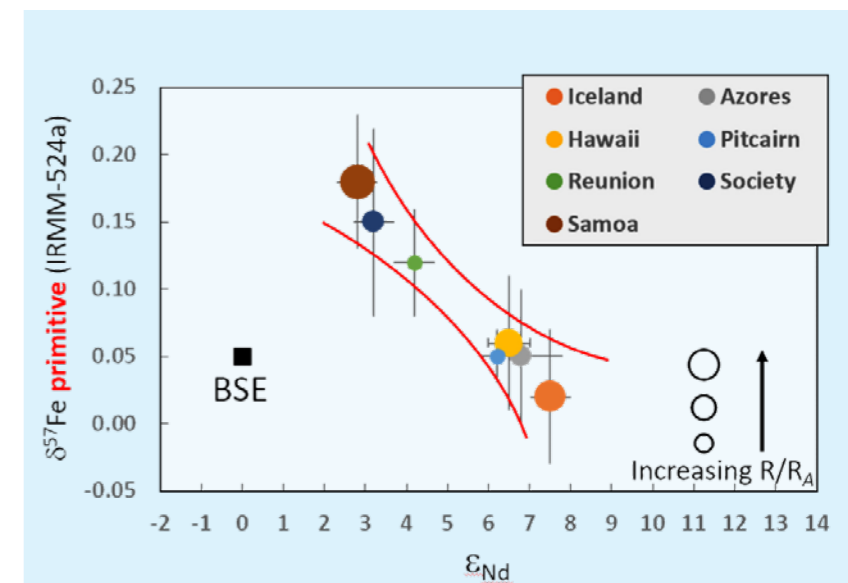
rial kohlendioxidreich sein muss. So wissen wir, dass Ozeanische Kruste im Archaikum, wie immer diese auch ausgesehen hat, bereits CO₂ gespeichert hatte.

Primordiale Überbleibsel

Eine der Besonderheiten von OIBs ist die zuvor erwähnte Rückkehr von kristallinen Komponenten an die Erdoberfläche. Hierbei stellt sich jedoch die Frage, wie genau diese Komponenten an die Oberfläche gelangen. In einer Studie an der Insel Pitcairn konnten wir dies mittels Eisen- und Neodymium-Isotopen eindrucksvoll zeigen. Eine Reihe von Basalten von Pitcairn Island zeigt eine direkte Mischungslinie zwischen der häufigsten kristallinen Komponente (sogenannter enriched mantle 1) und einer anderen, die im globalen Vergleich scheinbar Teil eines jeden OIB Vulkans ist. Diese wird gemeinhin als „Matrix“ bezeichnet. Die Mischung beweist, dass beide Komponenten zum basaltischen Vulkanismus beitragen und zeichnet ein komplexes Netzwerk auf, das tief bis an den Erdkern reicht.

Durch komplexe Vergleiche von Elementhäufigkeiten in verschiedenen Gesteinen von OIBs weltweit und ihrer radiogenen und stabilen

Isotope zeichnet sich ein Bild, in dem Material bis zum Erdkern subduziert wird, sich mit umgebendem Mantel mischt, erhitzt wird und an die Erdoberfläche zurückkehrt. Dies passiert in schlauchartigen Röhren nicht unähnlich eines Atompilz, jedoch aus heißem, solidem Gestein. Dieses schmilzt kurz vor der Erdoberfläche und lässt neue



KO-VARIATION VON NEODYMIUM- UND EISEN-ISOTOPEN

Ko-Variation in Gesteinen von ozeanischen Basalten mit der jeweils höchsten Helium-Isotopie (3He/4He oder R/Ra) der Inselgruppe. Letzteres ist vermutlich eine Signatur des Erdkerns. Die Grafik zeigt, dass die Erde vermutlich nicht chondritisch in ihren seltenen Erden ist und dass der unterste Mantel zum Teil kristalline Komponenten trägt (zum Beispiel beprobt auf Samoa).

vulkanische Inseln entstehen. Die Analysen von Helium- und Wolfram-Isotopen in den Matrixkomponenten von Hawaii, Samoa, Pitcairn oder den Galapagos-Inseln zeigen, dass diese Matrix entweder primordialer Mantel ist oder Teile des Erdkerns in sich trägt. Wolfram-Isotope entstehen aus dem Zerfall von Hf-182, das nur in den ersten 35 Millionen Jahren des Planeten, also noch vor der Entstehung des Erdmondes, aktiv war. Da der Erdkern siderophile Elemente wie Wolfram anzieht, jedoch lithophile Elemente wie Hafnium und Uran abstößt, ist es anzunehmen, dass das Wolfram-Signal sowie Teile des Heliums aus dem Erdkern stammen und diese sich mit dem unteren Mantel mischen.

Ein Überleben von primordialem Mantel während des gigantischen Einschlags, in dem sich die moderne Erde und unser Mond gebildet haben, scheint eher unwahrscheinlich. Kombinationen von Eisen- und Neodymium-Isotopen in globalen OIB favorisieren keines der Szenarien, zeigen jedoch ein weiteres Stadium in der Evolution der tiefen Erde irgendwann zwischen ihrem Anfang und heute.