

FEUER unter dem WASSER

Der Untergrund der Ozeane ist mit Lava bedeckt, die an submarinen Vulkanen ausgestoßen wurde. Forscher konnten jetzt im Detail klären, woher all das geschmolzene Gestein stammt und wie es aus dem Erdinneren zum Meeresboden gelangt ist.

In Kürze

- ▶ An den **mittelozeanischen Rücken** bildet Magma, das vom Erdmantel aufsteigt, unablässig neuen Meeresboden.
- ▶ Lange war unbekannt, wie das geschmolzene Gestein aus der Tiefe an die Oberfläche gelangt, ohne unterwegs seine Zusammensetzung zu ändern. Nun konnte Herkunft und **Wanderung des Magmas** im Detail geklärt werden.
- ▶ Ausgangspunkt sind mikroskopisch kleine Tröpfchen verflüssigten Gesteins in bis zu **150 Kilometer Tiefe**.
- ▶ Diese Tröpfchen steigen durch **kanalisiertes poröses Fließen** auf, indem sie Teile des umgebenden Gesteins auflösen und sich zu Schmelzfäden vereinigen. Aus den Poren werden so allmählich Kanäle, die sich vereinigen und das Magma schließlich bis dicht unter die Erdkruste führen.

Von Peter B. Kelemen

Im Dunkel der fast unzugänglichen Tiefsee spielen sich 85 Prozent der weltweiten Vulkanausbrüche ab. Zwar merkt praktisch niemand etwas davon; dennoch sind diese Eruptionen keineswegs bedeutungslos. Sie erzeugen jene gewaltigen, etwa sieben Kilometer dicken Gesteinsplatten, die den Boden aller Meeresbecken bilden und ozeanische Kruste genannt werden.

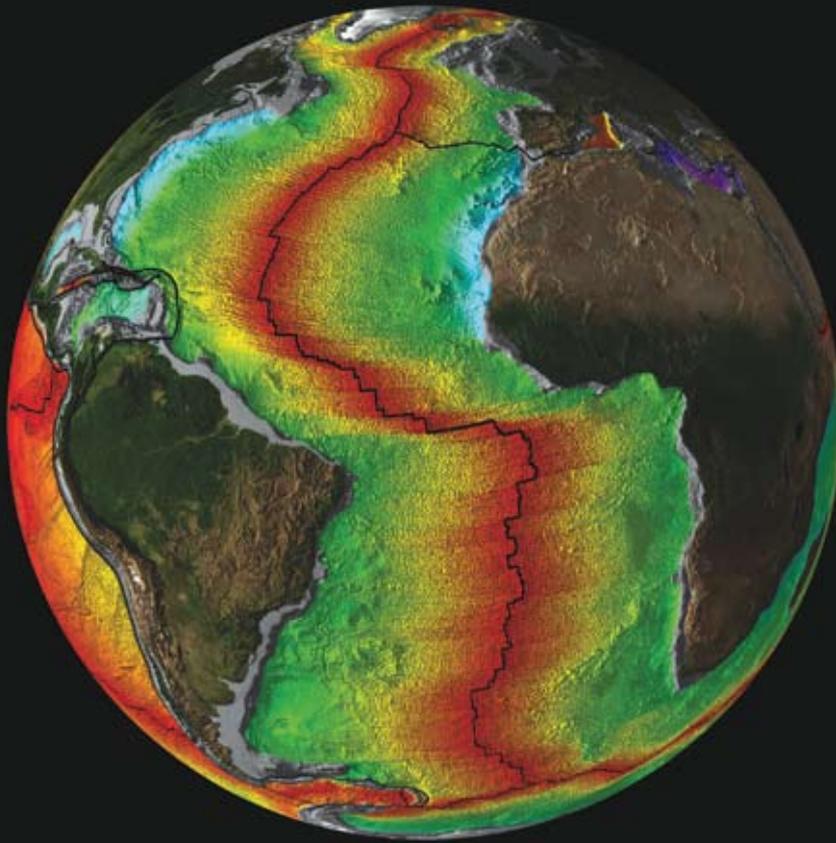
Die Entstehung des Meeresgrunds aus glutflüssigen Gesteinsmassen ist schon seit den 1960er Jahren bekannt. Damals zeigten Sondierungen der Tiefsee mit Sonargeräten, dass sich praktisch ununterbrochene Ketten aus Vulkanen – die mittelozeanischen Rückensysteme – wie die Nähte auf einem Baseball um den Globus winden. Schon bald wurde auch klar, warum dort unablässig Lava austritt. Gemäß der Theorie der Plattentektonik wird die ozeanische Kruste an diesen Vulkanketten auseinandergezogen; in die entstehende Lücke dringt glutflüssiges Magma aus dem Erdinneren ein. Doch aus welcher Tiefe es stammt und wie es zur Oberfläche gelangt, blieb offen.

Inzwischen haben Untersuchungen an Blöcken alten Meeresbodens, die jetzt auf den Kontinenten liegen, sowie mathematische Modelle der Wechselwirkung zwischen geschmolzenem und festem Gestein eine Fülle neuer Erkenntnisse geliefert. Daraus ließ sich

ein detailliertes Bild der Geburt ozeanischer Kruste zusammensetzen. Es hat wenig zu tun mit der populären Vorstellung, wonach sich rot glühende Gesteinsschmelze in einer riesigen Magmakammer unter einem Vulkan sammelt und dann gewaltsam durch eine Spalte den Weg an die Oberfläche bahnt.

Tatsächlich beginnt der Vorgang mehrere dutzend Kilometer unter dem Meeresboden, wo winzige Tropfen geschmolzenen Gesteins durch mikroskopisch kleine Poren zwischen den Mineralkörnern wandern – mit einer Geschwindigkeit von nur etwa zehn Zentimetern pro Jahr; das ist etwa so schnell, wie Fingernägel wachsen. Weiter oben vergrößern sich die Tropfen und zwingen sich durch Ritze und Klüfte. Schließlich vereinigen sie sich zu mächtigen Lavaströmen, die sich so rasend schnell über den Meeresboden ergießen, wie ein Lastwagen über die Autobahn braust. Die jüngsten Erkenntnisse darüber, wie Magma in großen Tiefen festes Gestein durchdringt, erklären aber nicht nur die Entstehung der ozeanischen Kruste, sondern werfen vielleicht auch ein neues Licht auf die Bildung anderer Transportsysteme für Flüssigkeiten wie die Adernetze von Fließgewässern auf dem Festland.

Unter den Vulkanen der mittelozeanischen Rücken und den unzähligen, übereinandergestapelten Lavaströmen, die zu Krustengestein wurden, liegt der Erdmantel. Diese 2850 Kilometer dicke Schicht hoherhitzen Gesteins



Der Mittelatlantische Rücken (schwarze Linie), eine 10 000 Kilometer lange Reihe von Vulkanen am Grund des Atlantischen Ozeans, ist die längste Gebirgskette der Welt. Die Farbe zeigt das Alter der Gesteinskruste unter dem Meer an. Am jüngsten (rot) ist der Meeresboden in der Nähe des Rückens. Zu den Kontinenten hin wird er immer älter.

WIE MITTELOZEANISCHE RÜCKEN ENTSTEHEN

Manchmal schmilzt eine pilzartig aufsteigende Säule aus heißem Mantelgestein – ein so genannter Plume – einen Kontinent von unten an und dünnt ihn aus. Wenn gleichzeitig Strömungen im Erdmantel oder andere tektonische Kräfte eine Zugspannung auf das Gestein an dieser Stelle ausüben, bricht es. Geologen sprechen von kontinentalem Rifting. In seinem Verlauf bildet sich ein Grabenbruch oder Rift Valley. In diese Senke ergießt sich bei Vulkanausbrüchen basische Lava, die zu Basalt erstarrt, aus dem auch der Meeresboden besteht.

Wenn die tektonischen Kräfte die beiden Seiten des Rifts auseinanderziehen, senkt sich der Graben weiter ab und gelangt schließlich unter den Meeresspiegel, so dass er überflutet wird: Ein neuer Ozean ist geboren. Die Vulkane des Grabenbruchs bilden nun einen mittelozeanischen Rücken, an dem fortwährend neue Erdkruste zwischen den beiden auseinanderdriftenden Bruchstücken des alten Kontinents entsteht.

CIRES, UNIVERSITY OF COLORADO AT BOULDER, ELLIOT LIM UND JESSE VARNER, UND NOAA / NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER (WWW.NGDC.NOAA.GOV/MGG); NACH: R. DIETMAR MÜLLER ET AL., »AGE, SPREADING RATES AND SPREADING SYMMETRY OF THE WORLD'S OCEAN CRUST«, IN: GEOCHEMISTRY, GEOPHYSICS, GEOSYSTEMS, VOL. 9, 2008 (DOI:10.1029/2007GC001743)

stellt den mittleren Bereich des Erdinneren dar und umschließt den metallischen Erdkern. An der kühlen Erdoberfläche erscheinen Gesteine, die von dort stammen, dunkelgrün. Könnte man sie an ihrem Entstehungsort betrachten, wären sie dagegen rot oder sogar weiß glühend. An der Oberfläche des Mantels herrscht eine Temperatur von etwa 1300 Grad Celsius. Sie nimmt nach unten pro Kilometer um rund ein Grad zu. Das Gewicht des darüberliegenden Gesteins lässt auch den Druck mit der Tiefe steigen – um etwa 330 Atmosphären (33 Megapascal) pro Kilometer.

Gestein aus großer Tiefe

In Kenntnis dieser Zusammenhänge entwickelten Forscher Ende der 1960er Jahre die Vorstellung, der Ursprung der ozeanischen Kruste liege tief im Erdmantel, wo im Gestein – als ob es schwitzen würde – winzige Magmatröpfchen entstünden. Selbst eine minimale Druckentlastung, verursacht durch den Aufstieg von Material (ohne Abgabe von Wärme), führt dort zur Bildung von Schmelze in mikroskopisch kleinen Poren.

Wie dieses Magma an die Oberfläche gelangt, war allerdings schwieriger zu erklären. Zwar hat Schmelze eine geringere Dichte als festes Gestein gleicher Temperatur und erfährt daher einen Auftrieb: Sie zeigt das Bestreben, in Bereiche niedrigeren Drucks aufzusteigen. Doch Analysen von Gesteinsproben von den

mittelozeanischen Rücken, wo das austretende Magma erstarrt, ergaben eine andere chemische Zusammensetzung, als die Ergebnisse von Laborexperimenten erwarten ließen.

In so genannten Diamantstempelzellen erhitzten und quetschten Forscher Kristalle aus Mantelgestein. Dabei erwies sich, dass die Zusammensetzung des Magmas von der Tiefe abhängt, in der es sich bildet. Mantelgestein besteht vor allem aus zwei Mineralsorten: Olivin und Pyroxen (das in den zwei Formen Ortho- und Klinopyroxen vorkommt). Je höher Druck und Temperatur sind – je tiefer im Erdmantel sich also das schmelzende Gestein befindet –, desto mehr vom Olivin abgeleitetes Material enthält das entstehende Magma. Lavaprobe aus den mittelozeanischen Rücken stammten demnach, wie ihre Analyse ergab, fast alle aus Tiefen unterhalb von 45 Kilometern.

Dieser Befund löste eine lebhafte Debatte darüber aus, wie Schmelze durch eine mehrere dutzend Kilometer dicke Gesteinsschicht aufsteigen und dabei ihre ursprüngliche Zusammensetzung bewahren kann. Unterwegs sollte das Magma nämlich Atome mit dem Gestein austauschen, das es durchquert. Dabei löst es Orthopyroxen auf und scheidet Olivin ab. Würde das Magma langsam durch kleine Poren im Gestein aufwärts wandern, wie die Forscher vermuteten, müsste der daraus gebildete Meeresboden deshalb die Zusammensetzung von Schmelze aus der obersten Mantelzone in

Unterhalb von 45 Kilometern ist der Erdmantel zähplastisch wie Karamell, der in der Sonne gelegen hat

weniger als zehn Kilometer Tiefe widerspiegeln. Doch den Analysen zufolge war das nicht der Fall. Die Ursprungsschmelze der meisten Lavaproben von mittelozeanischen Rücken hatte bei der 45 Kilometer langen Wanderung an die Oberfläche also anscheinend kein Orthopyroxen aus den umliegenden Gesteinen gelöst. Wie konnte das sein?

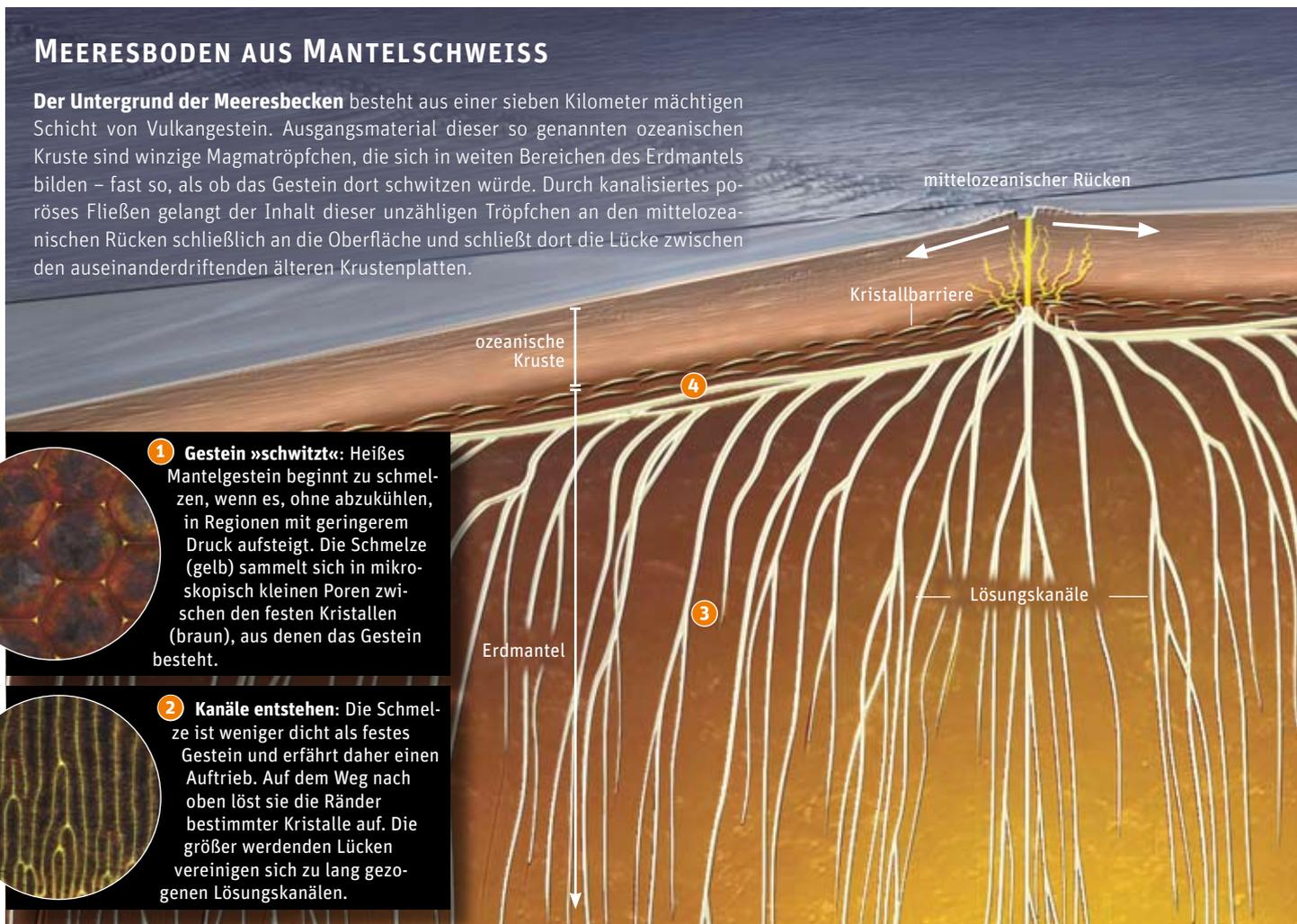
Anfang der 1970er Jahre gaben die Geologen eine Antwort, die der populären Vorstellung von Vulkanen nahekommt: Die Schmelze musste auf dem größten Teil ihrer Wegstrecke rasch durch breite Spalten aufgestiegen sein. Dabei blieb ihr keine Zeit, mit den umgebenden Gesteinen Atome auszutauschen. Außerdem käme Schmelze im Zentrum einer Spalte nicht mit den Rändern in Berührung. Zwar gibt es im oberen Mantel, der bis etwa 700 Kilometer hinabreicht, wegen des hohen

Drucks normalerweise keine offenen Klüfte. Doch könnte die Auftriebskraft der Schmelze, so die Vermutung einiger Forscher, in manchen Fällen ausreichen, um das darüberliegende feste Gestein aufzubrechen – ähnlich wie ein Eisbrecher sich seinen Weg durch das polare Packeis erzwingt.

Tatsächlich fanden Adolphe Nicolas von der Universität de Montpellier (Frankreich) und seine Kollegen Hinweise auf solche Risse, als sie seltene Gesteinsformationen untersuchten, die als Ophiolithe bekannt sind. In der Regel verdichtet sich ozeanische Kruste durch Alterung und fortschreitende Abkühlung so sehr, dass sie an den Subduktionszonen – tiefen Gräben, wie sie den Pazifik säumen – in den Mantel zurücksinkt. Ophiolithe hingegen sind Stücke alten Meeresbodens, die beim Zusammenstoß zweier tektonischer Platten, statt

MEERESBODEN AUS MANTELSCHWEISS

Der Untergrund der Meeresbecken besteht aus einer sieben Kilometer mächtigen Schicht von Vulkangestein. Ausgangsmaterial dieser so genannten ozeanischen Kruste sind winzige Magmatröpfchen, die sich in weiten Bereichen des Erdmantels bilden – fast so, als ob das Gestein dort schwitzen würde. Durch kanalisiertes poröses Fließen gelangt der Inhalt dieser unzähligen Tröpfchen an den mittelozeanischen Rücken schließlich an die Oberfläche und schließt dort die Lücke zwischen den auseinanderdriftenden älteren Krustenplatten.



1 Gestein »schwitzt«: Heißes Mantelgestein beginnt zu schmelzen, wenn es, ohne abzukühlen, in Regionen mit geringerem Druck aufsteigt. Die Schmelze (gelb) sammelt sich in mikroskopisch kleinen Poren zwischen den festen Kristallen (braun), aus denen das Gestein besteht.

2 Kanäle entstehen: Die Schmelze ist weniger dicht als festes Gestein und erfährt daher einen Auftrieb. Auf dem Weg nach oben löst sie die Ränder bestimmter Kristalle auf. Die größer werdenden Lücken vereinigen sich zu lang gezogenen Lösungskanälen.

3 Schmelze kriecht langsam: Die Schmelze steigt nur wenige Zentimeter pro Jahr auf, weil die Lösungskanäle mit Gesteinskörnern verstopft sind, die sie nicht auflösen kann. Allmählich vereinigen sich Millionen von Schmelzfäden zu größeren Kanälen.

4 Hindernisse stoppen Aufstieg: Nahe der Kruste verliert die aufsteigende Schmelze so viel Wärme, dass sie teilweise auskristallisiert und Barrieren bildet. Diese leiten das verbliebene Magma schräg aufwärts zum Rücken hin, weil sie mit zunehmender Entfernung von ihm immer tiefer liegen.

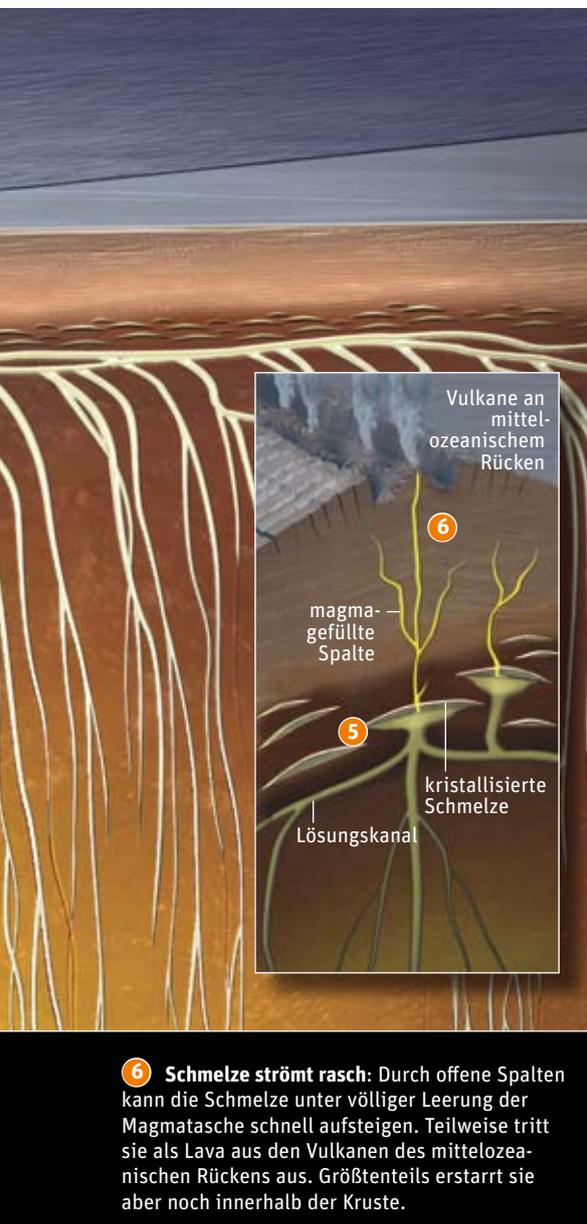
5 Spalten reißen auf: Unter dem mittelozeanischen Rücken blockiert auskristallisierte Schmelze den Aufstrom völlig. Magma sammelt sich in linsenförmigen Taschen, bis der Druck darin so stark angestiegen ist, dass das kältere, spröde Gestein darüber zerbricht.

KEVIN HANB

abzutauchen, aufs Festland geschoben wurden. Sie bestehen aus so genannter Lithosphäre, die außer der Kruste auch noch die oberste, starre Schicht des Mantels enthält.

Ein berühmtes Beispiel für Ophiolithe findet sich im Oman. Dort ist während der noch andauernden Kollision der Arabischen mit der Eurasischen Platte ehemaliger Meeresboden gestrandet. In diesen und anderen Ophiolithen fand das Team von Nicolas ungewöhnliche, helle Gänge. Es interpretierte sie als Risse, in denen Schmelze vor Erreichen des Meeresbodens erstarrte.

Das Problem war nur, dass die Gänge mit Gestein ausgefüllt sind, das aus einer Schmelze kristallisierte, die in den obersten Bereichen des Mantels entstanden war – also nicht unterhalb von 45 Kilometern, woher die meiste Lava an mittelozeanischen Rücken stammt.



6 Schmelze strömt rasch: Durch offene Spalten kann die Schmelze unter völliger Leerung der Magmatasche schnell aufsteigen. Teilweise tritt sie als Lava aus den Vulkanen des mittelozeanischen Rückens aus. Größtenteils erstarrt sie aber noch innerhalb der Kruste.

Zudem dürfte das Eisbrecher-Szenario nicht auf die Schmelzregion an solchen Rücken übertragbar sein: Unterhalb von etwa zehn Kilometern ist der heiße Mantel hier nicht brüchig, sondern zähplastisch wie Karamell, der zu lange in der Sonne gelegen hat.

Magma erzeugt Schmelzkanäle

Das Rätsel bestand also weiter. Um es zu lösen, begann ich an einer alternativen Hypothese für den Lavatransport unter mittelozeanischen Rücken zu arbeiten. Ende der 1980er Jahre entwickelte ich die Theorie, dass aufsteigende Schmelze weniger Olivin abscheidet, als sie Orthopyroxen auflöst. Unter dem Strich sollte ihr Volumen also zunehmen.

In den 1990er Jahren erstellte ich zusammen mit drei Kollegen – Jack Whitehead von der Woods Hole Oceanographic Institution (Massachusetts), Einat Aharonov, heute am Weizmann-Institut für Wissenschaft in Rehovot (Israel), und Marc Spiegelman vom Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia University in New York – ein mathematisches Modell dieses Vorgangs. Es zeigte, wie der Lösungsvorgang allmählich die Zwischenräume der Kristalle erweitert. Dadurch vergrößern sich die Poren und vereinigen sich zu langgezogenen Kanälen, die sich ihrerseits zu dickeren Röhren zusammenschließen. Unseren numerischen Simulationen zufolge sammeln sich so mehr als 90 Prozent des Magmas in weniger als 10 Prozent des verfügbaren Raums. Millionen mikroskopisch kleiner Schmelzfäden münden also letztendlich in nur einige Dutzend hochgradig poröser Kanäle mit Durchmessern von 100 oder mehr Metern.

Selbst in den breitesten von ihnen bleiben zunächst aber noch viele Kristalle des ursprünglichen Mantelgesteins erhalten. Sie verstopfen die Röhren und behindern den Durchfluss. Deshalb kommt die Schmelze nur um wenige Zentimeter pro Jahr voran. Mit der Zeit jedoch passiert genügend Magma die Kanäle, um alle Orthopyroxen-Kristalle aufzulösen. Zurück bleiben nur Kristalle von Olivin und anderen in der Schmelze nicht löslichen Mineralen. Von da an hat das Magma in solchen Kanälen nicht mehr die Zusammensetzung, die der Gleichgewichtssituation unter dem herrschenden Druck entspricht, sondern dokumentiert die Tiefe, in der es zuletzt einem Orthopyroxen-Kristall begegnet ist.

Als eine der wichtigsten Konsequenzen dieses so genannten kanalisiertes porösen Fließens erweist sich, dass nur der Teil der Schmelze, der sich an den Rändern der Kanäle befindet, Orthopyroxen aus dem umliegenden Gestein löst. Magma im Inneren steigt dagegen in unveränderter Zusammensetzung auf. Nume-

GLOSSAR

DUNIT: fast ausschließlich aus dem Mineral Olivin bestehendes Gestein, das ein charakteristisches Netz heller Adern im oberen Mantel bildet

KANALISIERTES PORÖSES FLIEßEN: Bezeichnung für die Art, wie Magma durch die festen Gesteinsschichten im Erdinneren wandert, indem es sich durch langgezogene Poren zwischen einzelnen mikroskopisch kleinen Kristallen zwängt

LAVA: geschmolzenes Gestein, das bei einem Vulkanausbruch an der Erdoberfläche austritt

MAGMA: geschmolzenes Gestein vor dem Austritt an der Erdoberfläche

MITTELOZEANISCHE RÜCKEN: submarine Gebirgsketten, an denen durch Vulkanausbrüche neuer Meeresboden entsteht

MINERALE: Gesteinskomponenten definierter Zusammensetzung und Kristallstruktur. Sie können aus einem oder mehreren Elementen bestehen. Olivin enthält zum Beispiel Silizium, Sauerstoff und Magnesium, das teilweise durch Eisen ersetzt ist

OPHIOLITH: Bruchstück ozeanischer Kruste und der steifen obersten Schicht des Mantels, das bei der Kollision tektonischer Platten auf das Festland geschoben wurde

INTERESSANTE FAKTEN

- Im Mittel dauert es 100 Jahre, bis ein sechs Meter breites Stück neuer ozeanischer Kruste entsteht.
- Das heiße Gestein des Erdmantels setzt sich aus festen Mineralkristallen zusammen. Aber **ähnlich wie ein Gletscher**, der aus festen Eiskristallen besteht, kann Mantelgestein bis zu zehn Zentimeter pro Jahr fließen – etwa so schnell, wie Fingernägel wachsen.
- An mittelozeanischen Rücken ausgetretene Lava strömt mit der enormen Geschwindigkeit von teils mehr als 100 Kilometern pro Stunde über den Meeresboden.

rische Simulationen lieferten somit den entscheidenden Hinweis darauf, dass die Schmelze sich selbst ihren Weg aus großen Tiefen im Mantel nach oben bahnen kann – aber nicht durch Zerbrechen des Gesteins, sondern durch dessen partielle Auflösung. Arbeiten im Gelände erbrachten später auch handfeste Belege für kanalisiertes poröses Fließen in Ophiolithen.

Nur aus der Luft lässt sich der Ophiolith-Block im Oman voll und ganz würdigen. Die mächtige Formation besteht aus einem fast durchgehenden, 500 Kilometer langen und bis zu 100 Kilometer breiten Gesteinsband. Wie bei allen Ophiolithen ist der aus dem Mantel stammende Teil großenteils rostbraun verwittert und auffällig von tausenden Adern gelbbraunen Gesteins durchzogen. Geologen haben schon vor langer Zeit festgestellt, dass es sich dabei um so genannten Dunit handelt.

Außerhalb der Adern ist das Gestein gemäß seiner Herkunft aus dem oberen Mantel reich an Olivin und Orthopyroxen. Der Dunit dagegen besteht zu mehr als 95 Prozent aus Olivin – dem Mineral, das beim Aufstieg der Schmelze durch den Mantel zurückbleibt. Orthopyroxen fehlt völlig – im Einklang mit der

Hypothese, dass es komplett aufgelöst wurde, bevor das Magma den obersten Teil des Mantels erreichte. Dies und andere Befunde machen klar: Bei den Dunitadern handelt es sich um einstige Förderschloten, durch die unter einem mittelozeanischen Rücken Schmelzen aus großer Tiefe im oberen Mantel aufgestiegen waren. Man sieht gleichsam eingefrorene Momentaufnahmen von Kanälen, die sich durch Herauslösen einer Gesteinskomponente und Abscheidung einer anderen gebildet haben.

So aufregend diese Erkenntnisse waren, gaben sie allerdings keine erschöpfende Antwort auf eine zweite Frage, die Geophysiker schon lange beschäftigte. Die mächtigen Lavaströme an mittelozeanischen Rücken stammen aus einem schmalen Streifen mit einem Querschnitt von nur etwa fünf Kilometern. Dagegen zeigen seismische Messungen, die zwischen festem und teilweise geschmolzenem Gestein unterscheiden können, dass Magma in einem hunderte Kilometer breiten Areal bis zu einer Tiefe von mindestens 100 Kilometern vorkommt. Wie wird aufsteigendes Magma aus einem so großen Gebiet in einen schmalen Streifen am Rückenriff kanalisiert?

WASSER IM WATT FLIESST WIE MAGMA IM MANTEL



Wasser bahnt sich beim Fließen über einen Strand ein Kanalnetz ähnlich dem, das geschmolzenes Gestein beim Aufsteigen durch das feste Erdinnere erzeugt. Zwar entstehen diese Netze auf unterschiedliche Weise: Wasser am Strand hebt Sandkörner an und bewegt sie mechanisch, während Schmelze einen Teil des umliegenden Gesteins auflöst. Doch lässt die Ähnlichkeit der gebildeten Strukturen vergleichbare physikalische Gesetzmäßigkeiten dahinter vermuten.

In beiden Fällen entstehen regelmäßige Muster trotz zufälliger Ausgangsbedingungen. Am Strand fließt Grundwasser, das bei Ebbe austritt, rasch auf niedriger gelegene Stellen zu. Dabei reißt es Sandkörner mit und gräbt immer tiefere Kanäle, die auch Wasser aus anderen Rinnalen abführen, die auf sie treffen (a). Auf diese Weise sammelt sich das Grundwasser von zufällig verteilten Austrittsstellen in einer Reihe fast gleich weit voneinander entfernter Abflussrinnen, die sich stromabwärts vereinigen (b). Analog entstehen auch Bäche und Flüsse, die einen großen Strom speisen. Solche Erosionsmuster minimieren den Energieverbrauch. Je tiefer und breiter ein Kanal ist, umso weniger Energie geht durch die Reibung zwischen dem strömenden Wasser und dem Sand darunter verloren.

Das gleiche Prinzip liegt der chemischen Erosion im Erdmantel zu Grunde. Indem Schmelze

das umgebende Gestein auflöst, erweitert sie allmählich die Poren, durch die sie wandert. So entstehen Lösungskanäle, die wachsen und sich vereinigen. So kann das Magma schneller aufsteigen; denn der viskose Widerstand, welcher der Reibung entspricht, verringert sich mit zunehmender Porengröße. Ähnlich wie am Strand speisen viele kleine, aktive Kanäle einige wenige größere. Zum Teil erklärt dieses Muster, warum submarine Vulkanausbrüche fast nur an mittelozeanischen Rücken stattfinden und nicht an zufällig über den Meeresboden verteilten Stellen.

Unter veränderten Bedingungen können Kanäle, die vorher miteinander verschmolzen sind, sich auch wieder verzweigen. Am Strand lädt Wasser seine Sandfracht ab, wenn das Gefälle abnimmt. Dadurch entstehen Hindernisse im Hauptkanal (c). Wie in einem Delta an der Mündung eines Flusses ins Meer sammelt sich Wasser hinter diesen Barrieren. Von Zeit zu Zeit fließt es über und erzeugt neue Rinnen, die wiederum verstopfen und austrocknen. Zu ähnlichen Verzweigungen kommt es in der obersten Mantelzone. Sie ist kühler als der Bereich darunter. Dadurch kristallisiert ein Teil der Schmelze aus und verstopft den Kanal. Doch ab und zu durchbricht Magma diese Kristallbarrieren und dringt auf Wegen, die es sich neu bahnt, weiter vor – manchmal bis zum Meeresboden.

Im Jahr 1991 schlugen David Sparks und Mark Parmentier, damals beide an der Brown University in Providence (Rhode Island), eine Erklärung vor. Sie beruht darauf, dass die älteren Teile der aus ozeanischer Kruste und oberstem Mantel bestehenden Lithosphärenplatten beim Wegdriften vom mittelozeanischen Rücken allmählich erkalten und dabei dichter und schwerer werden, so dass sie immer weiter in den wärmeren, zähplastischen Mantel einsinken. Deshalb liegen der Meeresboden und die Untergrenze der ozeanischen Kruste weitab von ihrem Entstehungsort im Mittel zwei Kilometer tiefer als am Rückenriff. Zudem kühlt die kalte Kruste den oberen Mantel ab, wodurch sich der Teil von ihm, der zur starren Lithosphäre gehört, verbreitert und sein unterer Rand sich weiter nach unten verlagert.

Auf der Grundlage dieser Zusammenhänge schufen Sparks und Parmentier ein Computermodell für das poröse Fließen im Mantel. Ihren Simulationen zufolge verliert die aufsteigende Schmelze so viel Wärme, dass ein Teil davon in der obersten Mantelregion kristallisiert und eine undurchlässige Deckschicht erzeugt. Da sich diese Barriere mit abnehmender Entfernung vom heißen mittelozeanischen Rücken in immer größerer Tiefe befindet, bildet sie ein schräges Dach, an dem entlang die Restschmelze zum Rückenriff hingeleitet wird.

Wieso gibt es Vulkanausbrüche?

Geländebeobachtungen und theoretische Modelle lieferten somit einleuchtende Antworten auf die beiden wichtigsten Fragen. Aufsteigendes Magma behält seine chemische Zusammensetzung bei und tauscht keine Atome mit dem umliegenden Mantelgestein aus, weil es innerhalb breiter Dunitkanäle isoliert bleibt. Diese Kanäle führen zu den mittelozeanischen Rücken hin, da erkaltende Schmelze im obersten Mantel auskristallisiert. Doch schon erhob sich eine dritte Frage: Falls der Aufstieg, wie von uns postuliert, ein kontinuierlicher Prozess ist, warum tritt dann nicht fortwährend geschmolzenes Gestein am Meeresboden aus, sondern nur von Zeit zu Zeit in Form heftiger Vulkanausbrüche?

Wiederum entwickelten wir auf der Basis von Beobachtungen im Gelände eine Theorie. An den Ophiolithen des Oman hatten Nicolas und seine Kollegin Françoise Boudier in Montpellier Mitte der 1990er Jahre gezeigt, dass sich die Schmelze im obersten Mantel, dicht unter der ozeanischen Kruste, in linsenförmigen Taschen sammelt, die einige bis dutzende Meter hoch und dutzende bis hunderte Meter breit sind. Meine Kollegen und ich konnten das damit erklären, dass sich Mantelgesteine in einer bis zu zwei Kilometer dicken



Zone unterhalb der Kruste anders verhalten als in größeren Tiefen. Da sie dort Wärme an den kalten Meeresboden verlieren, kristallisiert ein Teil der Schmelze aus und wirkt als Pfropf, der den weiteren Aufstieg des von unten nachdrängenden Magmas verhindert. Dieses beginnt sich deshalb in linsenförmigen Taschen unter dem auskristallisierten Material zu sammeln, was den Druck dort steigen lässt.

In größeren Tiefen wäre das Gestein wegen der hohen Temperatur plastisch verformbar. Es würde fließen und so für eine Druckentlastung sorgen. Doch hier macht der Wärmeverlust an den darüberliegenden Meeresboden das Gestein steif und spröde. Unter dem zunehmenden Druck zerbricht es deshalb vereinzelt über den Magmataschen. So entstehen Spalten, durch welche Schmelze bis zur Untergrenze der jungen Kruste gelangt. Dort sammelt sie sich großenteils und erstarrt. Dadurch erzeugt sie neues Gestein, ohne an der Oberfläche auszutreten. Manchmal allerdings erzwingt sich die Schmelze den Weg bis ganz hinauf und ergießt sich in bis zu zehn Meter dicken und zehn Kilometer langen Lavaströmen über den Meeresboden.

Diese detaillierten Erkenntnisse über die Transportnetze von Schmelze in großen Tiefen unter dem Meeresboden ähneln in vieler Hinsicht dem, was über Gewässernetze an der Erdoberfläche bekannt ist. Ähnlich wie kleine Flüsse sich in den Untergrund eingraben und zu breiten Strömen vereinigen, erzeugt die chemische Erosion im tieferen Erdmantel ein Netz, in dem viele schmale Schmelzrinnen sich zu größeren Kanälen zusammenschließen. Beim Auskristallisieren im oberen Mantel bildet das Magma »Dämme«, die es umlenken – ähnlich den natürlichen Dämmen, die ein schlammiger Fluss an der Mündung ins Meer ablagert. Beide brechen von Zeit zu Zeit. Dann treten vorübergehend aus einem einzigen Kanal große Mengen an Flüssigkeit aus. Forschungsarbeiten über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die der Bildung von Gewässer- und Magmatransportnetzen zu Grunde liegen, könnten also zu einer einheitlichen Theorie führen, die das Verhalten von beiden erklärt. ◀

Ehemalige ozeanische Kruste wurde im Oman auf die Eurasiatische Platte geschoben. Die Erosion hat den mächtigen Gesteinsblock braun verfärbt – vorher war er überwiegend grünlich schwarz – und in eine zerklüftete Berglandschaft verwandelt.



Peter B. Kelemen ist Professor am Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia University in New York. Als er 1980 im Himalaja Ophiolithe kartierte, fragte er sich zum ersten Mal, wie Magma wohl durch den festen Teil des Erdinneren aufsteigt. Seither hat er mit Feldforschungen im Gelände, mit mathematisch-chemikalischen Modellen am Computer und mit fluiddynamischen Experimenten im Labor nach der Antwort gesucht.

Braun, M. G., Kelemen, P. B.:

Dunite Distribution in the Oman Ophiolite: Implications for Melt Flow through Porous Dunite Conduits. In: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 3(11), 6. November 2002.

Kelemen, P. B. et al.:

Extraction of Mid-Ocean Ridge Basalt from Upwelling Mantle by Focused Flow of Melt in Dunite Channels. In: *Nature* 375, S. 747–753, 29. Juni 1995.

Spiegelman, M. W. et al.:

Causes and Consequences of Flow Organization during Melt Transport: The Reaction Infiltration Instability. In: *Journal of Geophysical Research* 106(82), S. 2061–2077, 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1014875.