A vertical strip on the left side of the cover shows a satellite view of Earth's surface, featuring clouds, landmasses, and oceans.

Das Innere unseres Planeten

DYNAMISCHE ERDE

Phlegräische Felder

Europas gefährlicher
Supervulkan

Geophysik

Das Kernproblem
der Erde

Kontinentaldrift

Im Sog der
Tiefseegräben



Daniel Lingenhöhl
E-Mail: lingenhoehl@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,
wo rohe Kräfte walten – sind Planeten noch quickeleben-dig. Denn ohne die innere Dynamik der Erde wäre wohl kein Leben mehr möglich, wie wir es heute kennen. Ohne die Plattentektonik gäbe es zwar keine verheerenden Erdbeben, es bliebe jedoch auch wenig von unseren Kontinenten übrig, und das Klima würde sich völlig verändern. Und ohne das von unserem Geodynamo erzeugte Erdmagnetfeld könnte der Sonnenwind die lebensnotwendige Ozonschicht zerstören oder uns gar die Atmosphäre kosten, wie es für den Mars vermutet wird. Unser neues Kompakt widmet sich daher diesen meist nützlichen inneren Kräften der Erde und zeigt, wie sie das Antlitz unserer Heimat prägen.

Eine spannende Lektüre wünscht

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Daniel Lingenhöhl".

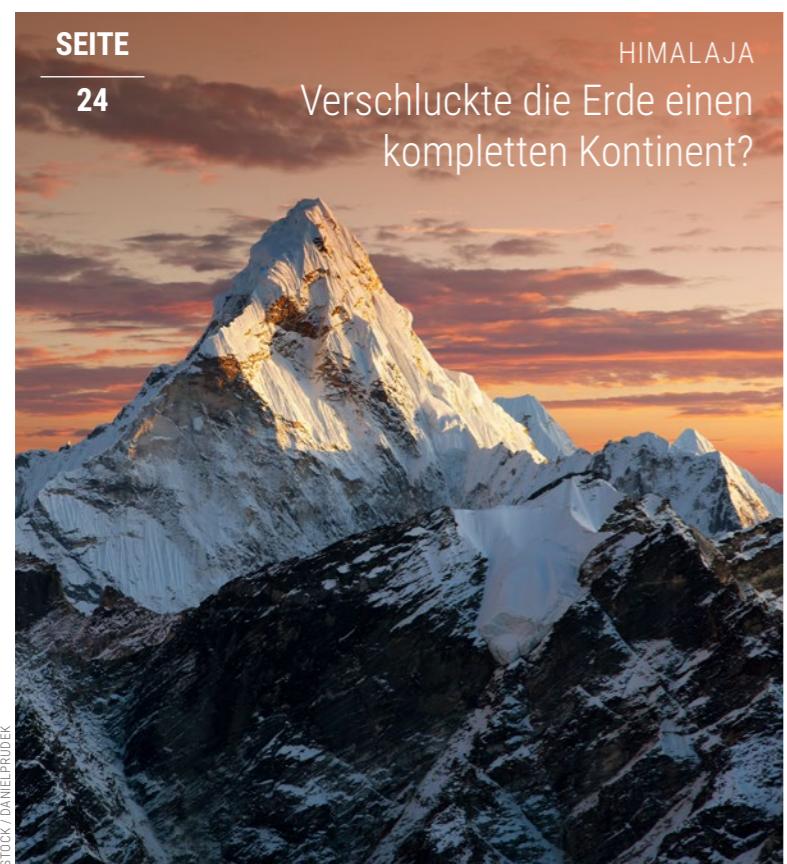
Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 28.11.2016

CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert
REDAKTIONSLINTER: Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGERIN DIGITAL: Antje Findeklee
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE147514638
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.



- 06 GEOPHYSIK
Das Kernproblem der Erde
- 10 ERDMAGNETFELD
Störung von unten
- 13 UNGEWÖHNLICHER DIAMANTENFUND
Wasser in Massen im Erdmantel?
- 16 TURBO-KONTINENTALDRIFT
Im Sog der Tiefseegräben
- 19 MANTELPLUMES
Heiße Magmaströme schaffen neue Ozeane
- 22 GRABENBRÜCHE
Kontinente zerreißen wie Brotteig
- 37 MIDCONTINENT RIFT
Nordamerikas gebrochenes Herz
- 45 PLATTENTEKTONIK
Vom Werden und Vergehen der Superkontinente
- 51 PHLEGRÄISCHE FELDER
Europas Supervulkan kann ohne Vorwarnung explodieren
- 59 BILDERGALERIE
Blick in die Tiefe



ERDGESCHICHTE

ALTER DES INNEREN **ERDKERNS** NÄHER BESTIMMT

von Marie-Theresa Kaufmann

Unser Planet besitzt ein Herz aus extrem heißem, aber festem Metall. Das war jedoch nicht immer so. Wann erstarrte das Innere der Erde?

Unser Blauer Planet besitzt wohl erst seit 1 bis 1,5 Milliarden Jahren seinen massiven, wenngleich überaus heißen inneren Kern. Das zeigt eine Untersuchung von Andrew Biggin von der University of Liverpool und Kollegen. Die Wissenschaftler haben dazu zahlreiche bereits veröffentlichte Studien neu ausgewertet und berechnet, wie sich das Erdmagnetfeld im Lauf der Erdgeschichte veränderte.

Die Daten belegen, dass das Erdmagnetfeld über lange Zeit kontinuierlich abnahm, bis es schließlich vor 1,3 Milliarden Jahren plötzlich heftig zunahm. Folglich muss es damals zu einer gravierenden Veränderung gekommen sein, meinen die Forscher – vermutlich dem »Gefrieren« des Erdkerns. Das Magnetfeld der Erde gibt Auskunft über ihr Inneres, weil es maßgeblich durch das flüssige Material des Erdkerns erzeugt wird. Wie es sich im Lauf der Zeit veränderte, lässt sich mit Hilfe von Vulkangestein ermitteln: Frische Lava wird mitunter beim Erstarren magnetisiert und konserviert so für die kommenden Jahrtausenden Informationen über das Magnetfeld zu ihrem Entstehungszeitpunkt. Je

nachdem, aus welchem Erdzeitalter ein Felsbrocken stammt, weist er einen anderen Restmagnetismus auf, der sich mit Methoden des Paläomagnetismus auslesen lässt. Solche Daten aus insgesamt 36 Studien hat das Team um Biggin nun statistisch analysiert.

Allerdings sei immer noch nicht völlig verstanden, wie sich der Zustand des Erdkerns auf das Magnetfeld auswirkt, erklären die Forscher. Das von ihnen ermittelte Alter des Erdkerns von 1 bis 1,5 Milliarden Jahren ist daher noch mit einem Fragezeichen zu versehen. Bisherige Altersschätzungen für den Eisen-Nickel-Koloss im Innern unserer Erde reichten von einer halben bis hin zu 2 Milliarden Jahren. Bei einem Gesamtaal der Erde von rund 4,5 Milliarden Jahren rotierte der Blaue Planet folglich die allermeiste Zeit seiner Existenz ohne festen Kern durch das All. ↵

(Spektrum.de, 9. Oktober 2015)

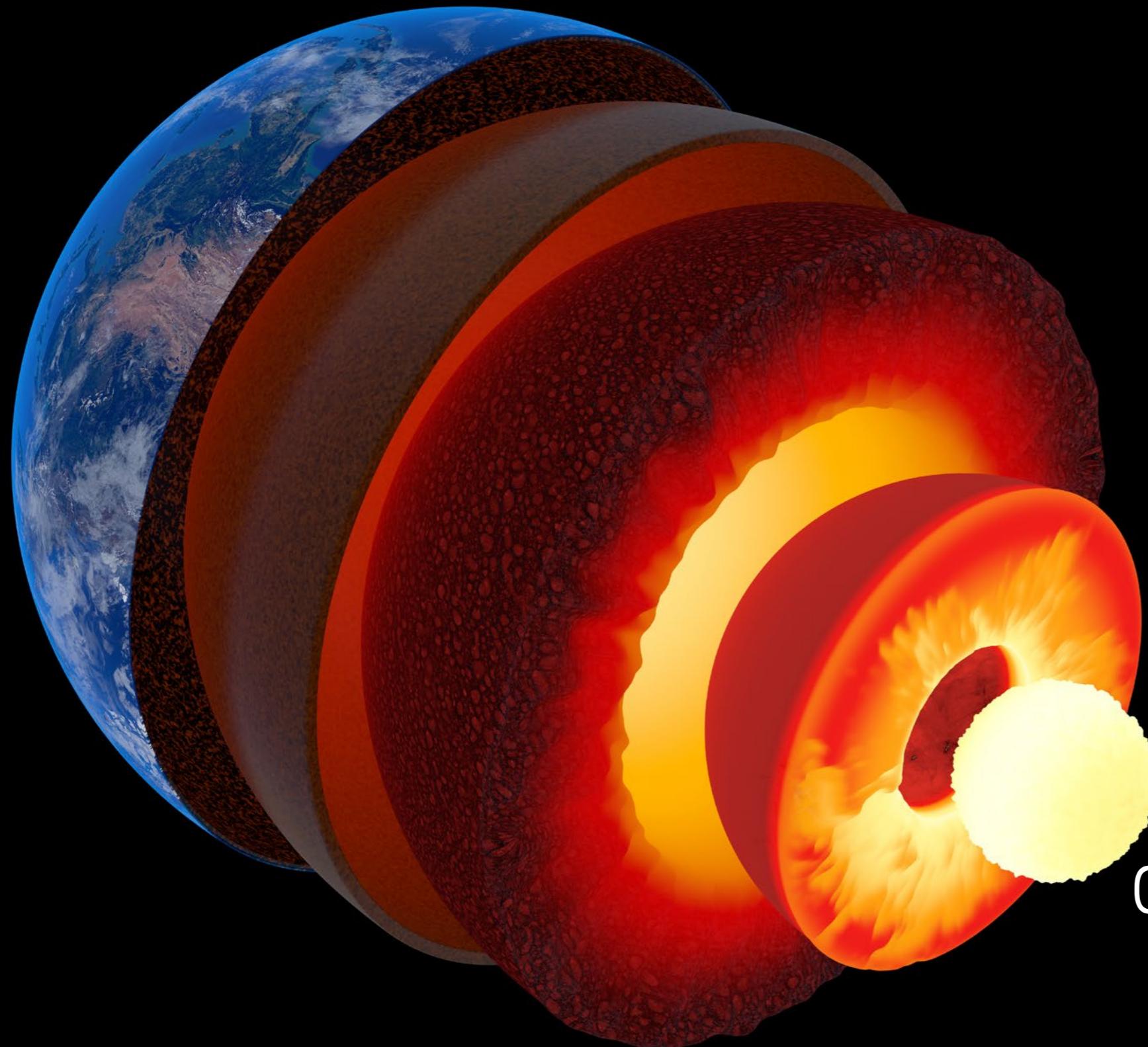
Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

ENTSTEHUNG DES LEBENS

Vom Molekül zur
komplexen Zelle

FÜR NUR
€ 4,99



Das
Kernproblem
der Erde

GEOPHYSIK

von David Dobson

Messungen der Wärmeleitfähigkeit von Eisen bei extremen Drücken und Temperaturen werfen ein neues Licht auf die Eigenschaften des Erdkerns – und auf seine Vergangenheit.

Ein wenig funktioniert der Erdkern wie ein Nachspeicherofen: Kristallisiert das flüssige Eisen aus dem riesigen äußeren Erdkern und reichert sich im festen inneren Teil an, wird Energie frei. Sie erwärmt unseren Planeten und wirkt so dem langsamen Auskühlen im eisigen Weltall entgegen. Eine weitere Konsequenz der inneren Dynamik ist das magnetische Feld der Erde. Es entsteht durch Konvektionsvorgänge im äußeren Erdkern. Wie viel Energie dafür zur Verfügung steht, hängt entscheidend davon ab, wie gut das Erdinnere die Wärme direkt leitet und bis in den Erdmantel überträgt.

2012 lieferten numerische Simulationen dieser Vorgänge sehr hohe theoretische Werte für die Leitfähigkeit vom flüssigen Eisen im äußeren Kern. In dieser Region würde die Hitze also schnell nach außen transportiert. Das löste eine große Kontroverse aus, denn es hätte zur Folge, dass alle

bis dahin akzeptierten Modelle für die Entstehung und das Verhalten des irdischen Magnetfelds falsch wären. Der daran beteiligte feste Erdkern wäre weniger als eine Milliarde Jahre alt und damit wesentlich jünger, als man annahm. Nun präsentierten zwei Forschergruppen um Kenji Ohta vom Tokyo Institute of Technology und Zuzana Konôpková vom Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg Ergebnisse von Experimenten, bei denen sie das Verhalten von heißem Eisen unter solch extremen Bedingungen erstmals direkt untersuchten. Beide Forscherteams haben die Gültigkeit der 2012 simulierten Werte mit unterschiedlichen Methoden überprüft – und erhielten verschiedene Resultate.

Die zwei Gruppen verwendeten so genannte Diamantstempelzellen, mit denen sich äußerst hohe Drücke erreichen lassen, sowie Laserstrahlen, mit denen sie ihre Proben zusätzlich erhitzten. So stellten sie

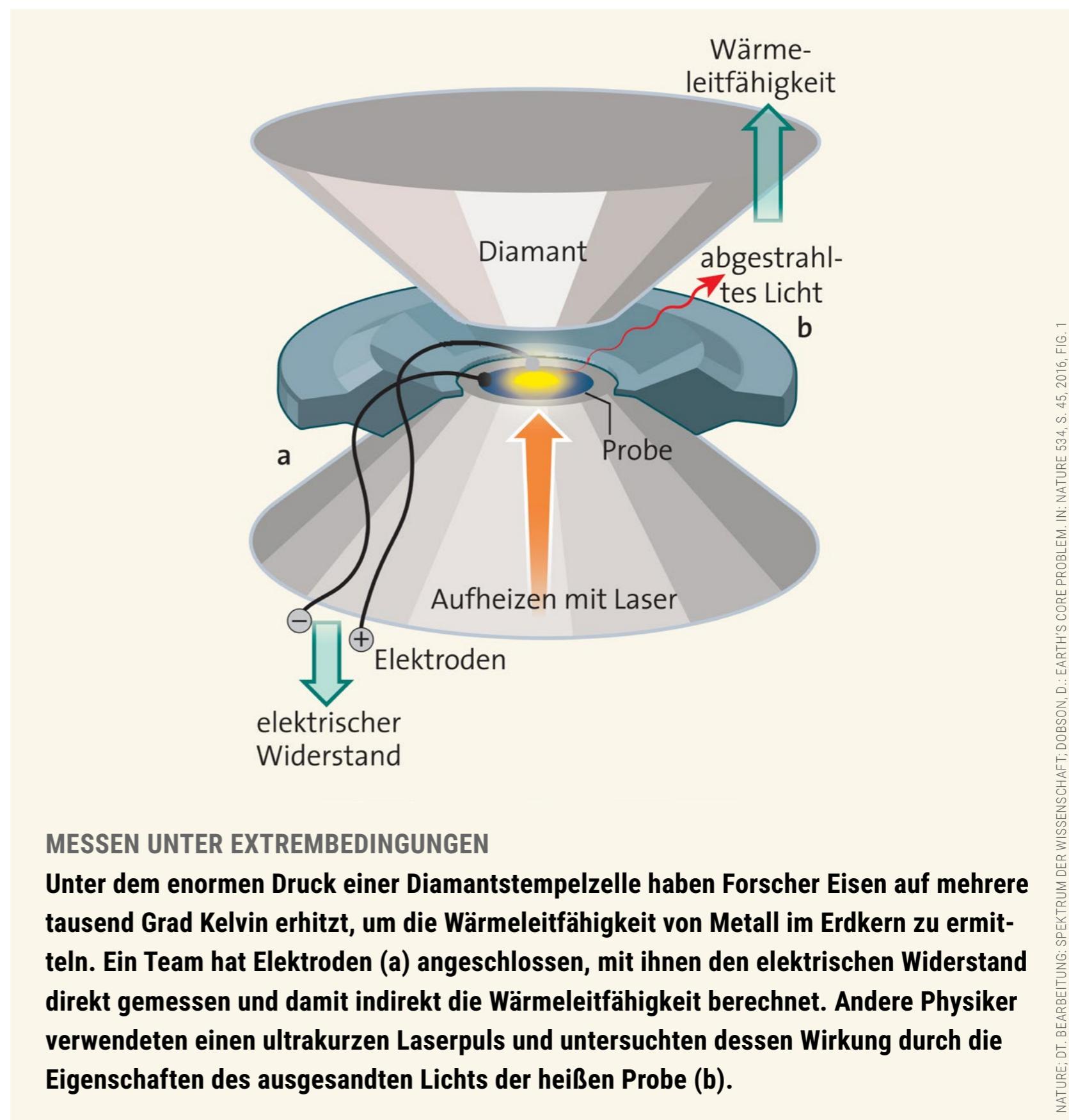
die Verhältnisse im Erdkern nach. Hier enden die Ähnlichkeiten allerdings bereits.

Die Wissenschaftler um Ohta bestimmten den elektrischen Widerstand von Eisenstäben. Um ihre Messung in einen Wert für die Wärmeleitfähigkeit des flüssigen Eisens im äußeren Erdkern umzurechnen, wendeten die Autoren auf ihre Daten ein theoretisches Modell an, die »Widerstandssättigung«. Diese besagt, dass der elektrische Widerstand bei hohen Temperaturen ein Plateau erreicht. Das wiederum erlaubte ihnen, das so genannte Wiedemann-Franz-Gesetz anzuwenden. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen thermischer und elektrischer Leitfähigkeit bei Metallen, der näherungsweise proportional zur Temperatur ist. Die beiden getroffenen Annahmen fußen auf einer soliden theoretischen Grundlage und haben sich zumindest bei niedrigen Drücken auch experimentell bewährt. Die Forschergruppe um Ohta erhielt nun hohe Werte

für die elektrische Leitfähigkeit, welche die Wissenschaftler in eine Wärmeleitfähigkeit von etwa 90 Watt pro Meter und Kelvin übersetzten. Sie stimmt recht gut mit den Ergebnissen der Simulationen von 2012 überein.

Andere Methode, anderes Resultat

Konôpková und ihr Team maßen die Wärmeleitfähigkeit hingegen direkt, indem die Physiker einen Hitzeimpuls dabei beobachteten, wie er eine feste Eisenprobe durchquerte. Dazu hatten sie diese auf einer Seite mit einem nur wenige Nanosekunden kurzen Laserpuls auf hohe Temperaturen gebracht. Sowohl die Zeit, welche der Impuls zum Durchqueren der Probe benötigt, als auch seine Abschwächung hängen einerseits von der Wärmeleitfähigkeit des Eisens ab, andererseits von derjenigen des festen umgebenden Mediums, das den Druck von der Diamantstempelzelle auf die Probe überträgt und diese zugleich nach außen thermisch isoliert. Dafür mussten die Forscher die Temperaturverteilung in der Stempelzelle sorgfältig mathematisch modellieren. Anschließend konnten sie die Wärmeleitfähigkeit der Eisenprobe bestimmen, indem sie die Hellig-



MESSEN UNTER EXTREMBEDINGUNGEN

Unter dem enormen Druck einer Diamantstempelzelle haben Forscher Eisen auf mehrere tausend Grad Kelvin erhitzt, um die Wärmeleitfähigkeit von Metall im Erdkern zu ermitteln. Ein Team hat Elektroden (a) angeschlossen, mit ihnen den elektrischen Widerstand direkt gemessen und damit indirekt die Wärmeleitfähigkeit berechnet. Andere Physiker verwendeten einen ultrakurzen Laserpuls und untersuchten dessen Wirkung durch die Eigenschaften des ausgesandten Lichts der heißen Probe (b).

keit und die Wellenlänge des Leuchtens des weiß glühenden Mediums vermaßen. Sie erhielten einen Wert von rund 30 Watt pro Meter und Kelvin. Er passt zu den Vorhersagen, die vor den Simulationen von 2012 gemacht worden waren, liegt jedoch erheblich unter den Ergebnissen von Ohta.

Das stellt uns vor die Frage, wie die widersprüchlichen Resultate in Einklang zu bringen sind. Gab es vielleicht unerkannte Probleme? Die extrem kurzen Laserpulse von Konôpkovás Team könnten beispielsweise die Eisenprobe einen kurzen Moment lang aufgeschmolzen haben, ohne dass dies im Experiment hätte auffallen müssen. Dann würde die für den Phasenübergang notwendige Energie als eine Art thermischer Puffer wirken (analog zum eingangs erwähnten Kristallisationseffekt, der unsere Erde warm hält). Man würde eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit messen. Das könnte erklären, warum die von Konôpková bestimmten Werte für die Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur und insbesondere nahe der Schmelztemperatur so stark absinken.

Oder aber Ohta hat möglicherweise den Wärmeverlust in seinen Elektroden unterschätzt, wodurch die tatsächliche Proben-

temperatur größer gewesen wäre, als das Team ermittelt hat. Dann hätte der elektrische Widerstand nur scheinbar ein Plateau erreicht, während er in Wirklichkeit weiter anstieg. Alternativ könnte die Proportionalitätskonstante, welche das Verhältnis zwischen thermischer und elektrischer Leitfähigkeit angibt, bei derart extremen Verhältnissen ungeahnt stark von der Temperatur abhängen. Das wäre eine besonders spannende Erklärung, denn dann wären zuvor nicht beobachtete, fundamental neue physikalische Effekte am Werk.

Von dieser Diskrepanz abgesehen sind beide Untersuchungen für sich genommen herausragende experimentelle Leistungen. Die Wissenschaftler haben grundlegende Eigenschaften von Proben vermessen, die unter mehr als einer Million Atmosphären Druck stehen, kleiner als ein Stecknadelkopf und heißer als 4000 Kelvin sind. Obendrein unterscheiden sich die Methoden stark. Dennoch weichen die Ergebnisse nur um den Faktor drei voneinander ab!

Aber der Teufel steckt im Detail. Bereits diese Differenz hat dramatische Konsequenzen für unser Verständnis von der Dynamik der Erde und insbesondere den Zeit-

punkt, an dem unser Planet einen festen Kern und damit vermutlich auch ein stabiles Magnetfeld entwickelte. Folgt man den Simulationen von 2012 und den Messungen von Ohta, dürfte das erst vor 700 Millionen Jahren geschehen sein. Das fiele etwa mit dem Auftreten der ersten komplexen Lebensformen zusammen. Mit den Werten von Konôpková wäre bereits vor drei Milliarden Jahren ein fester Kern möglich gewesen. Auf jeden Fall sind aber weitere experimentelle und theoretische Anstrengungen nötig, um diese Diskrepanz zu beseitigen und mehr über die physikalischen Verhältnisse zu lernen, die im Inneren der Erde herrschen.

↗
(Spektrum der Wissenschaft, 8/2016)

Ohta, K. et al.: Experimental Determination of the Electrical Resistivity of Iron at Earth's Core Conditions. In: *Nature* 534, S. 95-98, 2016

Konôpková, Z. et al.: Direct Measurement of Thermal Conductivity in Solid Iron at Planetary Core Conditions. In: *Nature* 534, S. 99-101, 2016



N

ERDMAGNETFELD

STÖRUNG VON NIGHTEN

von Lars Fischer

S

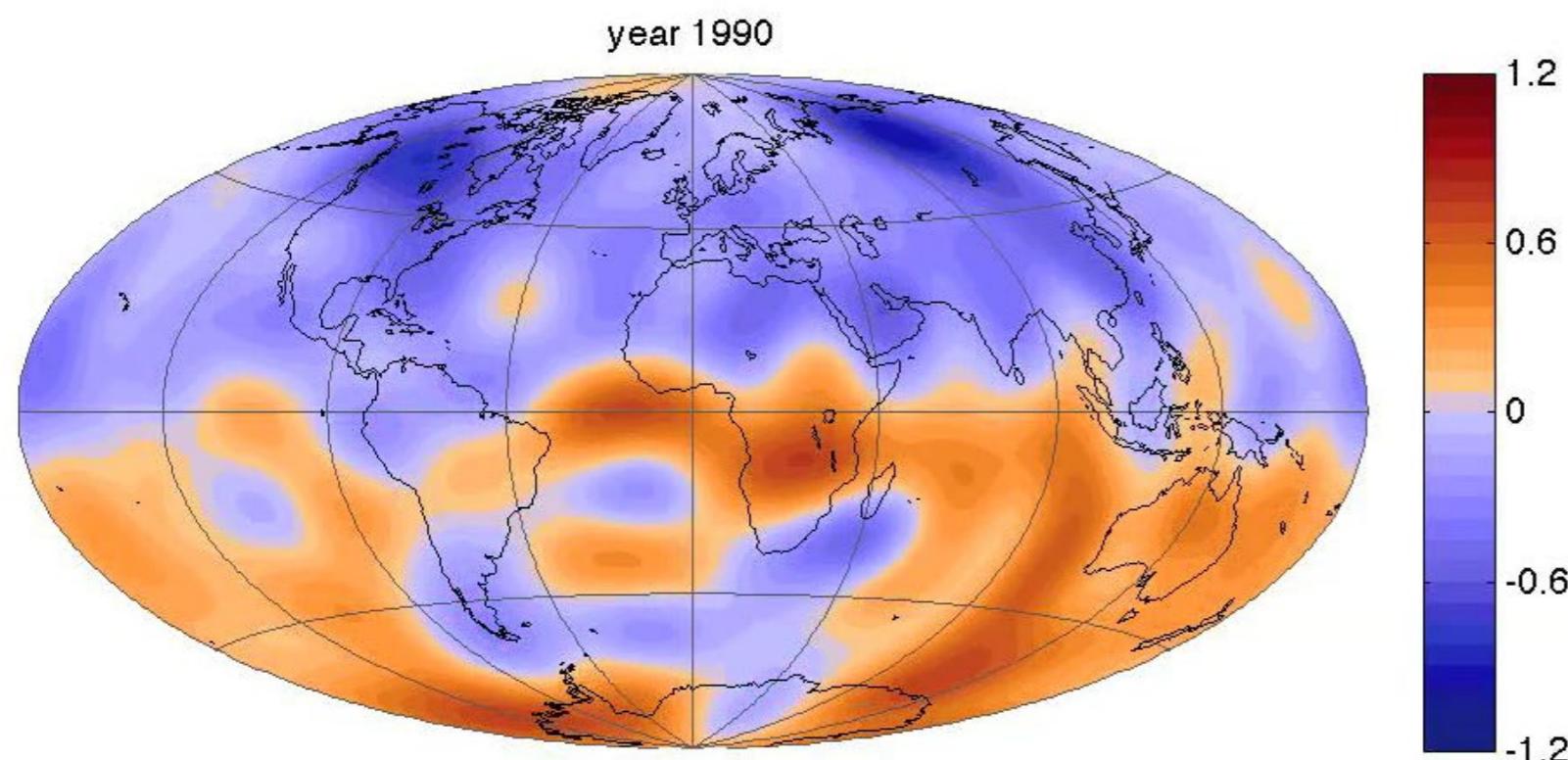
Wohin das Erdmagnetfeld kommt und auch seine grobe Form können Wissenschaftler mit Verweis auf Konvektionsströme im Erdkern bereits gut erklären – rätselhaft allerdings sind noch seine kleinräumigen Strukturen, die sich auf Zeitskalen von Monaten oder Jahren verändern. Diese Schwankungen gehen auf Veränderungen im Erdinneren zurück. Besonders intensiv sind sie in niedrigen Breiten, eine Beobachtung, die in krassem Gegensatz zu theoretischen Vorhersagen steht: Nach dem klassischen Modell des Geody-

namos, nach dem Konvektionsströmungen im aus flüssigen Eisen bestehenden äußeren Erdkern das Magnetfeld erzeugen, sollten die stärksten derartigen Oszillationen nahe den Polen auftreten.

Insgesamt ist ihre Verteilung auf dem Globus kurios ungleichförmig: In der Region des Pazifiks sind sie schwach und driften mal in die eine, mal in die andere Richtung, während sie im Atlantikbereich ausgeprägt sind und mit im Mittel etwa 17 Kilometern pro Jahr Richtung Westen wandern – wiederum im Gegensatz zur Theorie, nach der sie eine Tendenz nach Osten zeigen müssten. Drei Forscher stellen nun

ein Modell vor, das diese Widersprüche auflösen soll. Wie Julien Aubert, Christopher Finlay und Alexandre Fournier schreiben, verwenden sie eine gängige Computersimulation des Geodynamo, die sie um einige Interaktionen zwischen Erdkern und Mantel ergänzt haben.

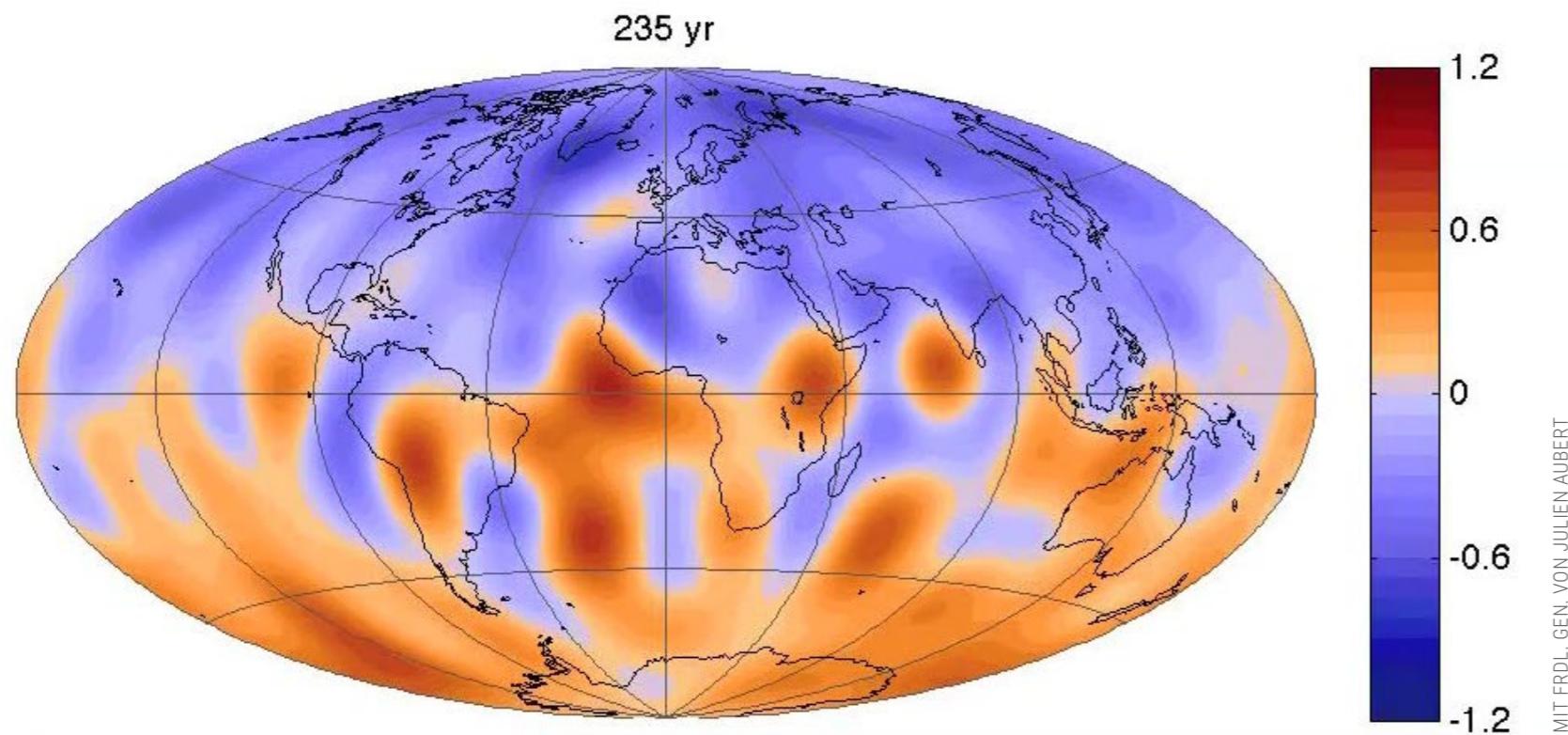
Eine wesentliche Ursache der kleinräumigen Schwankungen ist nach dem neuen Modell, dass der aus festem Eisen bestehende innere Erdkern durch die Schwerkraft an den Erdmantel gekoppelt ist: Dichteanomalien und Buckel an den Grenzflächen zum flüssigen äußeren Kern ziehen sich gegenseitig an. Der innere Kern wiede-



VARIATIONEN DES MAGNETFELDS IN DEN LETZTEN 400 JAHREN

Dieses Modell zeigt die kleinräumige Struktur des Erdmagnetfelds, basierend auf Messdaten, die seit dem 16. Jahrhundert unter anderem aus Schiffslogbüchern gewonnen wurden. Die Westdrift ist erst in den letzten Jahrzehnten sichtbar, als Satellitenmessungen erstmals das Magnetfeld mit hoher Auflösung beobachteten.

 [video online ansehen](#)



SIMULATION DES MAGNETFELDS ÜBER 3000 JAHRE

Die neue Simulation zeigt die kleinräumigen Schwankungen im magnetischen Fluss an der Oberfläche des Erdkerns. Die beobachteten Strukturen gehen vor allem auf den Einfluss des inneren Erdkerns zurück.

[VIDEO ONLINE ANSEHEN](#)

rum wird von Konvektionsströmen im äußeren Kern konstant nach Osten abgelenkt – und zieht durch seine Schwerkraft den Erdmantel mit. Weil der Drehimpuls des Planeten insgesamt gleich bleibt, muss ein Teil des flüssigen äußeren Erdkerns nach Westen strömen. Diese Strömung, die sich im Äquatorbereich des Erdmantels konzentriert, erzeugt nach Ansicht der Wissenschaftler den ersten unerwarteten Befund, dass sich die Unregelmäßigkeiten des Magnetfelds in der Nähe des Äquators konzentrieren. Dass gerade die Atlantikregion magnetisch so aktiv ist, führt das Team ebenfalls auf räumliche Variationen

an der Grenzfläche des inneren Kerns zurück. Unter Indonesien liegt ein Bereich des Erdkerns, an dem das flüssige Eisen des äußeren Erdkerns besonders schnell austrocknert – die freigesetzte Energie treibt heftige Konvektion an, die eine halbe Erdumdrehung nach Westen dann die Grenze zum Erdmantel erreicht und dort das Magnetfeld in Wallung bringt. Kühlere Bereiche an der unteren Grenze des Mantels – womöglich einst subduzierte ozeanische Platten – schwächen dagegen die Variationen im Pazifikraum ab.

Das neue Modell reproduziert nach Ansicht des Forscherteams die wesentlichen

Unregelmäßigkeiten des Erdmagnetfelds auf Zeitskalen von Monaten und Jahren recht gut. Auch die vom Modell vorausgesetzten Strömungsverhältnisse im Erdkern passen zu den mit seismischen Methoden erhobenen Beobachtungsdaten. Die Simulation deutet außerdem darauf hin, dass die kleinskaligen Veränderungen im Magnetfeld einem jahrhundertelangen Zyklus unterliegen – ob sich das bewahrheitet, werden allerdings zukünftige Messungen erst noch zeigen müssen. ↗

(Spektrum.de, 9. Oktober 2013)

Nature 10.1038/nature12574, 2013



UNGEWÖHNLICHER DIAMANTENFUND

Wasser in Massen im Erdmantel?

von Antje Findeklée

Ein höchst ungewöhnlicher Diamantenfund gibt der Diskussion um Wasser im Erdmantel neue Nahrung: Er enthält auch Spuren von Ringwoodit, einem Mineral aus großer Tiefe, das als Wasserspeicher bekannt ist.

Ein kommerziell uninteressanter, nur drei Millimeter großer Diamant aus Brasilien entpuppt sich als Glücksfund: In seinem Inneren entdeckten Forscher erstmals das Mineral Ringwoodit aus der Übergangszone zwischen Oberem und Unterem Erdmantel. Aus dem Wassergehalt des winzigen Ringwoodit-Einschlusses errechnet sich, dass in der Übergangszone ähnlich viel Wasser vorhanden sein könnte, wie in allen Weltmeeren zusammen.

Ringwoodit entsteht unter extrem hohem Druck aus dem Mineral Olivin, dem Hauptbestandteil des Oberen Mantels. Zusammen mit Wadsleyit, einer weiteren Hochdruckvariante des Olivin, gilt Ringwoodit als das wichtigste Mineral der Übergangszone zwischen 410 und 660 Kilometern Tiefe. Bisher war natürliches Ringwoodit jedoch nur aus Meteoriten bekannt. Künstlich hergestellte Ringwoodit-Mineraile verblüfften durch ihre hohen Wassergehalte von bis zu 2,5 Volumenprozent, denn ihre Kristallstruktur schien dafür nicht ge-

eignet. Spezifische »Lücken« in der Kristallstruktur führen jedoch dazu, dass »Wasser« darin chemisch gebunden ist.

Wasser spektroskopisch nachgewiesen

Mit aufwändigen spektroskopischen Untersuchungen stellten [Graham Pearson von der University of Alberta](#) und seine Kollegen zunächst sicher, dass es sich bei dem winzigen, mit bloßem Auge nicht erkennbaren Einschluss wirklich um Ringwoodit handelt [1]. Mittels Infrarotspektroskopie schlossen sie schließlich auf den Wassergehalt von etwa 1,4 Volumenprozent. Sollte der Ringwoodit in der gefundenen Form tatsächlich typisch für die untere Übergangszone sein, so gebe es dort zumindest stellenweise große Wassermengen, erklären die Forscher. Dies wird bereits ver-



RICHARD SIEMENS, UNIVERSITY OF ALBERTA

DIAMANT AUS JUÍNA

Der drei Millimeter kleine Diamant aus Juína in Brasilien enthält einen mit bloßem Auge nicht zu erkennenden Einschluss des Minerals Ringwoodit. Diese Variante von Olivin kommt nur unter hohem Druck wie im tiefen Erdmantel vor und war bislang natürlicherweise nur aus Meteoriten bekannt.

mutet, doch waren die experimentellen Beweise dafür bislang widersprüchlich.

Erstaunlich ist auch, dass sich das Hochdruckmineral in dem Diamant überhaupt erhalten hat – eigentlich hätte es sich mit abnehmendem Druck beim Transport an die Oberfläche wieder in Olivin zurückverwandeln müssen. Dies sei ein Hinweis, dass der Transport sehr schnell ging, meint [Hans Keppler vom Bayerischen Geoinstitut der Universität Bayreuth](#) in einem begleitenden Kommentar [2]. Wahrscheinlich sei der Diamant im Rahmen eines heftigen Vulkanausbruchs nach oben gerissen worden – für Diamanten ist das durchaus üblich: Sie finden sich häufig in Kimberliten, einem vulkanischen Gestein, dessen Magma aus großer Tiefe des Oberen Erdmantels stammt. An der Oberfläche legt Erosion schließlich die kostbaren Rohdiamanten frei, die sich dann beispielsweise entlang von Flussläufen in so genannten Seifenlagerstätten finden. ↵

(Spektrum.de, 12. März 2014)

[1] Nature 507, S. 221-224, 2014

[2] Nature 507, S. 174-175, 2014

Alles, was Sie wissen müssen.
Auf Ihrem Bildschirm.



DAS SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT **DIGITALABO**

Wissenschaftler berichten über die aktuellen
Erkenntnisse ihrer Fachgebiete.

Jahrespreis (12 × im Jahr) € 60,–; ermäßigt (auf Nachweis) € 48,–

HIER ABONNIEREN



TURBO-KONTINENTALDRIFT

Im Sog der Tiefseegräben

von Lars Fischer

Vor seiner Kollision mit der eurasischen Platte legte der indische Subkontinent einen erstaunlichen Zwischenspurt hin. Ursache war eine ungewöhnliche Kombination von Plattengrenzen.

Der indische Subkontinent ist in geologischen Kreisen für seine Raserei berüchtigt. Nach seiner Trennung vom Superkontinent Gondwana und dem Krustensplitter Madagaskar dauerte es kaum 50 Millionen Jahre, bis die kleine Platte quer über den Tethys-Ozean gewandert und mit Eurasien kollidiert war. Das ist die schnellste bekannte Plattenbewegung. Warum so eilig?

Diese Frage ist bis heute nicht zufriedenstellend beantwortet – Hauptverdächtiger war bisher der Réunion-Hotspot zwischen Indien und Afrika. Eine Arbeitsgruppe um Oliver Jagoutz vom MIT in Cambridge stellt jetzt eine interessante Idee vor: Demnach muss man keineswegs auf exotische Theorien zurückgreifen, um die schnelle Drift zu erklären. **Die Indische Platte hatte lediglich für 20 Millionen Jahre einen zusätzlichen Antrieb.** Wie das Team um Jagoutz einer Simulation der Plattendrift der letzten 100 Millionen Jahre entnimmt, beschleu-

nigten zwei Tiefseegräben den Minikontinent auf seiner Reise nach Norden auf über 14 Zentimeter pro Jahr – fast viermal so schnell wie die schnellste Plattenbewegung heute.

Gezogen von abtauchendem Meeresboden

Als Alfred Wegener seine Hypothese der Kontinentalverschiebung vorstellte, **lehnten seine Kollegen die Idee mehrheitlich ab** – unter anderem, weil kein Mechanismus für eine solche Bewegung ersichtlich war. Heute wissen wir, dass unter anderem die Tiefseegräben eine entscheidende Rolle spielen. Dort taucht ozeanische Kruste in den Erdmantel ab und zieht den Rest der Platte hinter sich her, ein Subduktion genannter Vorgang. Im Fall der indischen Plattenbewegung mutmaßen Jagoutz und sein Team, dass während der frühen Kreidezeit zwischen Indien und Eurasien nicht nur eine Subduktionszone an Indien zog, sondern gleich zwei hintereinander. Geophysikalische Verfahren **zeigen Reste zweier ab-**

getauchter Platten unter Indien – ebenso wie sich in einem langen Gürtel von der Türkei bis nach Südostasien Spuren beider Subduktionszonen finden lassen, die zu einem frühen Zeitpunkt mehrere tausend Kilometer voneinander entfernt waren. Zwei gleich gerichtete Subduktionszonen wie in diesem Modell gibt es heute nur noch an einem Ort der Welt: im Westpazifik. Dort liegen die Izu-Bonin-Marianen-Subduktionszone und der Ryukyugraben nördlich von Taiwan direkt hintereinander. Allerdings liegt zwischen beiden noch ein untermeerischer Rücken, so dass sie voneinander entkoppelt sind und nicht gemeinsam ziehen – im Gegensatz zu jenen, die Indien beschleunigten.

Ganz so einfach ist es dann allerdings doch nicht, denn es gibt dabei eine Schwierigkeit: Von jeder der beiden Subduktionszonen sinkt ozeanische Kruste schräg in den Erdmantel, hunderte Kilometer tief. Damit diese beiden Wälle aus festem Gestein aufeinander zubewegen können, muss das zähe

ANTHROPOZÄN

Ein Erdzeitalter für
den Menschen?

Mantelmaterial zwischen ihnen weichen – und das geht nur zur Seite. Ob zwei Subduktionszonen einen Kontinent auch doppelt so schnell ziehen, hängt davon ab, wie schnell der Erdmantel Platz macht. Damit die Gräben sich aufeinander zubewegen können, muss dieses zähe Gestein zur Seite ausweichen – wie schnell es das kann, bestimmt auch die Geschwindigkeit, mit der sich die Gräben aufeinander zubewegen. Das ist der Grund, weshalb Indien auf dem ersten Abschnitt seiner Reise mit normaler Geschwindigkeit driftete: Die beiden aufeinander folgenden Subduktionszonen nördlich des damaligen Inselkontinents reichten über etwa 10 000 Kilometer vom heutigen Spanien entlang der Unterseite von Eurasien – entsprechend langsam nur entkam das Mantelmaterial zur Seite.

Der Fluchtweg wird frei

Erst als die hintere Subduktionszone im Westen von der heranrückenden arabischen Platte gekappt wurde und im Osten auf einen Inselbogen traf, änderte sich die Situation. Nun schrumpfte der Gürtel eingeschlossenen Mantelmaterials um mehr als zwei Drittel, und damit sank der Druck, der gegen die Plattenbewegung wirkte,

drastisch ab. Die Wirkung auf Indien war, als hätte jemand die Handbremse gelöst.

Das neue Modell erklärt vor allem gut, weshalb die Phase der beschleunigten Bewegung so lange dauerte – denn viele als Ursache diskutierte Einflüsse halten nicht lange genug an, um einen ganzen Kontinent mehr als 20 Millionen Jahre lang auf Touren zu bringen. Der oft zitierte Réunion-Hotspot zum Beispiel sei zwar möglicherweise dafür verantwortlich, dass die Drift vor 66 Millionen Jahren ihr Maximum von 18 Zentimetern im Jahr erreichte, sein Einfluss sei allerdings insgesamt gering gewesen, schreibt die Gruppe um Jagoutz.

Seine höchste Geschwindigkeit behielt Indien nur etwas mehr als 20 Millionen Jahre bei, dann traf der Kontinent auf die erste Subduktionszone und verschmolz mit dem Inselbogen dahinter. Auf diese Weise seines zusätzlichen Antriebs beraubt, bewegte sich Indien danach mit vergleichsweise gemächlichen fünf Zentimetern pro Jahr gen Norden – ungefähr jener Geschwindigkeit, mit der es heute noch mit Eurasien kollidiert. ↵

(Spektrum.de, 4. Mai 2015)





MANTELPLUMES

Heiße Magmaströme schaffen
neue Ozeane

von Lars Fischer

Geowissenschaftler streiten seit Langem über die Bedeutung so genannter Mantelplumes, Aufströmungen heißen Gesteins tief aus dem Erdinneren. Computersimulationen deuten nun darauf hin, dass sie die Erdoberfläche stärker formen als gedacht.

Wenn die Erdkruste in spektakuläre Schollen und Gräben zerbricht und sich neue Ozeane bilden, dann wirkt dahinter die Dynamik der Erdplatten. Dachte man bisher. Doch einen anderen, ebenso wichtigen Einfluss haben Geologen bisher anscheinend unterschätzt – einfach weil er so gemächlich daherkommt: heißes Gestein im Erdmantel, das millionenfach zäher fließt als Honig. Doch wie Evgueni Burov und Taras Gerya von der Universität Sorbonne und der ETH Zürich schreiben, haben dessen Bewegungen ähnlich dramatische Folgen an der Erdoberfläche wie plattentektonische Vorgänge – bis hin zum Zerreißen ganzer Kontinente.

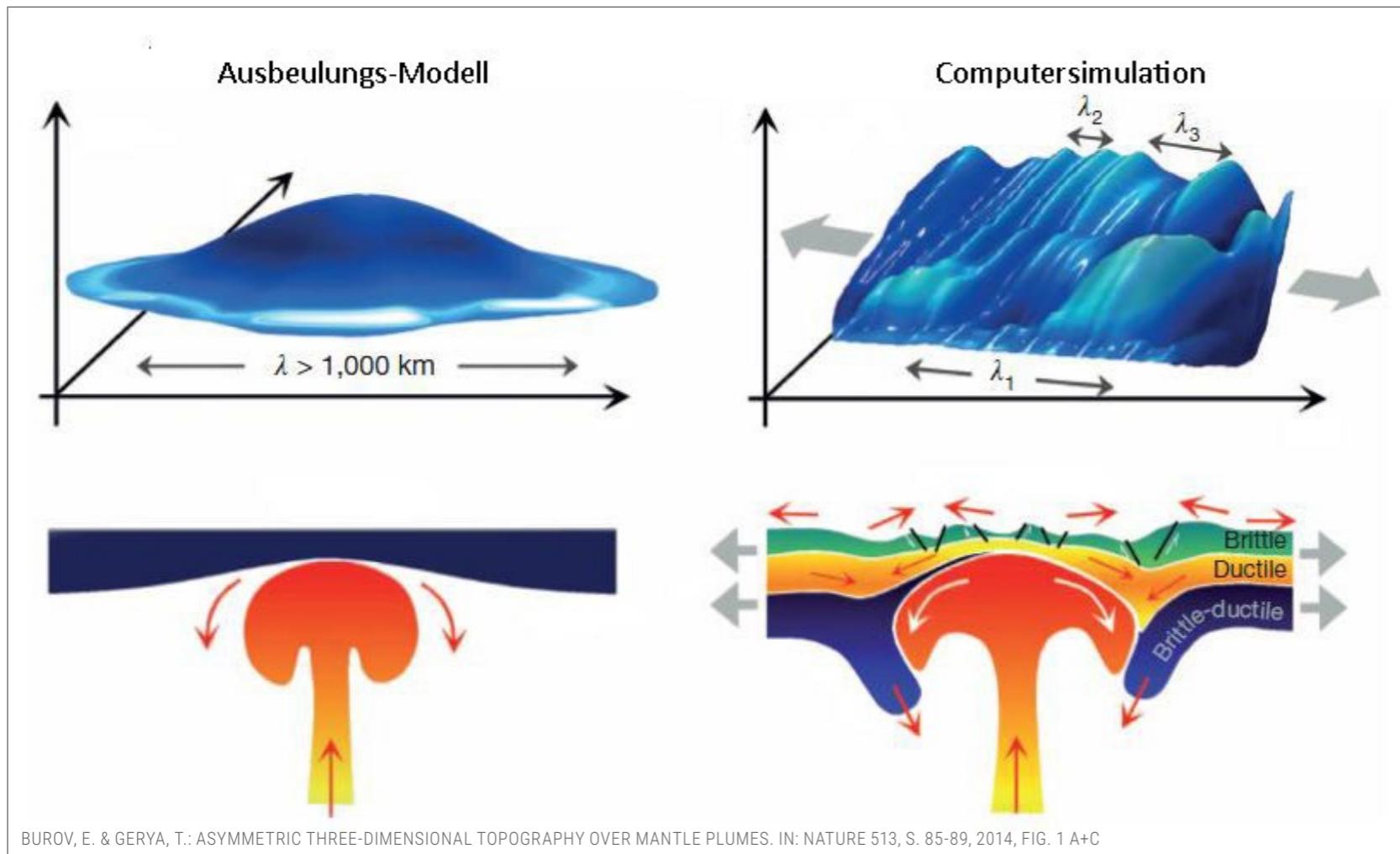
Bei ihrer Forschung geht es um Mantelplumes, pilzförmige Blasen heißen Gesteins, die über lange Zeiträume im Erdmantel aufsteigen und von unten auf die Erdkruste treffen. Diese Aufströmungen,

die ihren Ursprung tief im Erdmantel haben, sind bis heute rätselhaft und umstritten. Bisher ging man davon aus, dass diese aufsteigenden Plumes Kontinente auf Skalen von tausenden Kilometern sanft aufwölben, ohne kleinere topografische Details an der Oberfläche merklich zu beeinflussen. Um solche Ströme im Erdmantel zu finden, rechnet man deswegen aus der Topografie der Erdoberfläche die kleinräumigen Veränderungen heraus. Doch das funktioniert nicht besonders gut: Die Fachwelt tut sich schwer, die vorhergesagten Ausbeulungen zu finden.

Mit Hilfe von aufwändigen Computersimulationen sind Burov und Gerya nun möglicherweise der Lösung des Rätsels auf die Spur gekommen: Demnach gibt es die sanften Ausbeulungen gar nicht – die Mantelplumes beeinflussen die Oberfläche weit stärker als gedacht. Die kontinentalen Platten nämlich bestehen aus Schichten unterschiedlicher Stärke und Elastizität, die au-

ßerdem fast überall unter gerichteter Spannung stehen. Dadurch ändert sich das Bild ganz erheblich: Drückt ein Mantelplume von unten gegen diesen Schichtkuchen, entsteht keine Beule, sondern ein Riss, aus dem womöglich sogar neue Ozeane entstehen.

Dass die Erdkruste kompliziert aufgebaut ist und sich zum Teil spröde, teilweise aber auch plastisch verhält, ist natürlich keine neue Erkenntnis. Bisher war es allerdings nicht möglich, entsprechende Modelle zu entwickeln – es fehlte schlicht die Rechenkraft. Das Modell von Burov und Gerya macht nun realistische Simulationen möglich. Einerseits modelliert es die Erdkruste auf größeren Skalen als 1000 mal 1000 Kilometern, auf denen sich die Mantelplumes abspielen, sowie 650 Kilometer in den Erdmantel hinein. Andererseits erfasst die Computersimulation spröde Strukturen der Erdkruste bis hinab zu zwei Kilometer Auflösung.



Insgesamt 114 Jahre Rechenzeit auf den Supercomputern der beteiligten Institute waren nötig, um die nun veröffentlichten Ergebnisse zu erhalten. Für ihren Aufwand bekamen die beiden Wissenschaftler jedoch bemerkenswerte Ergebnisse. Sie deuten darauf hin, dass Mantelplumes eine wichtige Rolle bei der Entstehung neuer Ozeane spielen. Wenn das heiße Material aus dem Mantel die kontinentale Kruste von unten trifft, beult sie sich in der Com-

putersimulation keineswegs gleichmäßig aus, sondern zerreißt auf hunderten Kilometer Länge entlang einer linearen Naht.

Es entsteht ein Grabenbruch – eine langgezogene Senkungszone, an der Kontinente auseinander brechen. Das bekannteste Beispiel ist der Ostafrikanische Grabenbruch, der nach Ansicht vieler Experten dereinst Afrika spalten und einen neuen Ozean bilden wird. Nach den neuen Simulationen steigt das Material im Erdmantel

COMPUTERSIMULATION EINES MANTELPLUMES

Links: Klassisches Bild eines Mantelplumes unter der Kruste. Das aufsteigende Gestein erzeugt eine flache Beule, die wenige hundert Meter hoch ist und tausend oder mehr Kilometer Durchmesser hat. Rechts: Computersimulation der komplexen Erdkruste unter Spannung. Der Mantelplume erzeugt parallele Verwerfungen und andere kleinräumige Strukturen, die einen langgestreckten Grabenbruch ergeben.

nicht, wie bisher vermutet, als Folge der Grabenbildung auf, sondern ist ihre Ursache: Es sind die Mantelplumes, so die vorläufige Schlussfolgerung, die Kontinente spalten und Ozeane entstehen lassen. Damit geht die Diskussion, was bei tektonischen Vorgängen Ursache und was Wirkung ist, in eine neue Runde: Der Einfluss des tiefen Erdmantels auf die Erdoberfläche ist möglicherweise weit direkter, als man ihm bisher zugestand. ↗

(Spektrum.de, 4. September 2014)
Nature 513, S. 85–89, 2014



Kontinente
Zerreißen
GRABBENBRÜCHE
wie Brotteig
von Lars Fischer

Die Erdplatten driften nicht majestätisch auseinander – ab einem bestimmten Punkt zerreißt das Gestein mit Urgewalt.

Driftende Kontinente sind nicht eben als Sprinter bekannt. Sie treiben gleichmäßig auf den gemächlichen Strömungen, die das zähflüssige Gestein des Erdmantels umwälzen. Doch schon seit Jahrzehnten sindrätselhafte Ausnahmen von dieser Regel bekannt: Teile zerbrechender Superkontinente vervielfachten ihre Geschwindigkeit binnen weniger Millionen Jahre – weit schneller, als dass Veränderungen der Mantelströmungen dafür verantwortlich sein könnten. Eine Arbeitsgruppe um Sascha Brune vom GFZ in Potsdam und Dietmar Müller von der University of Sydney [hat nun eine mögliche Erklärung des Phänomens vorgelegt](#). Demnach entspricht die schnelle Plattenwanderung einer bisher unbekannten zweiten Phase bei der Bildung eines neuen Ozeans.

In der ersten Phase bildet sich durch Dehnung der Kruste ein Grabenbruch, vergleichbar jenem in Ostafrika, der sich mit einer Rate von unter einem Zentimeter pro

Jahr weitet. Diese Spreizung schwächt, so Brune und Müller, die Erdkruste im Lauf der Zeit so sehr, dass sie an einem bestimmten Punkt recht plötzlich nachgibt. Das entspreche einem Brotteig, der erst zäh nachgibt, bis er zu dünn wird und zerreißt. Auch Kontinente haben demnach einen Punkt, an dem sie schwach werden: Etwa zehn Millionen Jahre vor der endgültigen Trennung beschleunigt sich das Auseinanderdriften deswegen drastisch. So stieg die Spreizungsrate während des Zerbrechens des [Superkontinents Pangäa](#) zwischen Afrika und Südamerika vor etwa 120 Millionen Jahren von 10 bis 20 Millimetern pro Jahr auf bis zu 55 Millimeter pro Jahr.

Die Kruste wird dabei mit enormer Gewalt zerstückelt und verdünnt, und große Teile des äußeren Kontinentrands fallen in dieser relativ kurzen Phase der Grabenentwicklung quasi ins Meer oder werden von großen Mengen vulkanischer Gesteine bedeckt, bevor sich die Kontinente trennen und sich neuer Meeresboden zu bilden beginnt. Dieses Modell erklärt einige bisher

rätselhafte Eigenschaften dieser so genannten passiven Kontinentränder. Zum Beispiel erscheint die Erdkruste in vielen solchen Gegenden vergleichsweise wenig gedehnt, gemessen an den Kräften, die einst die Kontinente zerrissen. Das neue Modell erklärt diesen Befund einfach dadurch, dass Fachleute bisher vor allem die schwache Dehnung der ersten Phase untersuchten – wenn die Kontinente jedoch später zum Spurt ansetzen, verfrachten sie die Zeugnisse der gewaltigen Spaltung weit vor die Küste und in die Tiefe. ↗

(Spektrum.de, 19. Juli 2016)



HIMALAJA

Verschluckte die Erde einen kompletten Kontinent?

von Daniel Lingenhöhl

Eigentlich sollte die Kruste von Kontinenten nicht im Erdinneren verschwinden. Sie ist zu leicht. Dennoch verschwand ein riesiges Stück davon unter dem Himalaja.

Vor 40 bis 50 Millionen Jahren schob sich die Indische gegen die Eurasische Platte und sorgte dafür, dass sich die Gebirge Süd- und Zentralasiens aufzutürmen begannen – darunter mit dem Himalaja und dem Karakorum die höchsten Höhen der Erde. **Doch zur Überraschung von Miquela Ingalls von der University of Chicago und ihrem Team ging dabei ein großes Volumen an kontinentaler Erdkruste verloren und verschwand im Erdmantel.** Das läuft bisherigen Thesen zur Plattentektonik zuwider. Bislang gingen die Geologen davon aus, dass bei der Kollision von Kontinenten keine größeren Mengen an Gesteinsmaterial in die Tiefe sinken und aufgeschmolzen werden. Kontinentale Kruste ist im Gegensatz zu ihrem ozeanischen Gegenstück relativ leicht und hat eine geringere Dichte. Wird also ozeanische Kruste von kontinentaler in einer Subduktionszone überfah-

ren, so sinkt sie in die Tiefe und wird dort recycelt. Beim Aufeinandertreffen zweier Kontinente sollte dies dagegen nicht passieren, stattdessen verformt und verbiegt sich das Gestein, und es bilden sich Gebirge wie der Himalaja aus: Die Massenbilanz bliebe also gleich.

Das scheint jedoch auf den Zusammenstoß zwischen Indien und Asien nicht zuzutreffen, wie die Geowissenschaftler anhand ihrer Computermodelle festgestellt haben: Damit berechneten sie, welche Masse vor, während und nach dem Höhepunkt der Kollision vorhanden gewesen sein muss. Gigantische 500 Billionen Tonnen Gestein verschwanden demnach während des Prozesses, so Ingalls und Co – das entspricht etwa der Hälfte der damals vorhandenen kontinentalen Kruste. Es wurde durch die extremen plattentektonischen Kräfte in die Tiefe gedrückt, bis es durch die Hitze und den Druck im Erdmantel schmolz. Ein Teil der damals »verloren« ge-

gangenen Kruste wurde zwischenzeitlich durch Vulkanismus nach oben gefördert und erklärt, warum sich geochemische Signaturen kontinentaler Gesteine in ozeanischen Krustenabschnitten oder abgelegenen Vulkaninseln finden. ↗

(Spektrum.de, 14. Oktober 2016)



GEOLOGIE

Gesteine, fast so alt wie die Erde?

von Carl Zimmer

Nach Ansicht einer Gruppe von Geologen erlauben 4,4 Milliarden Jahre alte Gesteine im Norden Kanadas einen Blick auf die Anfänge der Erde und den Ursprung des Lebens. Andere Forscher bezweifeln jedoch die Datierung und gehen von einem wesentlich geringeren Alter aus.

Der Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel wirkt äußerlich nicht wie ein Schlachtfeld. Friedlich und abgeschieden liegt er inmitten einer unzugänglichen Region am Nordostrand der Hudson Bay in Kanada. Gute 30 Kilometer trennen ihn von Inukjuaq, der nächstgelegenen Siedlung. Abseits der Küste geht das offene Gelände in eine wellige Landschaft über, in der manche Hügel von Flechten überzogen, andere von eiszeitlichen Gletschern blank geschliffen sind. Die nackten Felsen wirken malerisch mit ihrem komplizierten Gefüge, das durch Streckung und Faltung geprägt ist. Einige sind grau bis schwarz und von hellen Adern durchzogen, andere blassrosa und mit dunkelroten Granaten gesprenkelt. Normalerweise verschlägt es außer Karibus und Stechmücken kein lebendes Wesen hierher.

Und doch ist diese verschlafene Gegend der Schauplatz einer erbitterten wissenschaftlichen Auseinandersetzung. Fast ein Jahrzehnt lang reisten rivalisierende Geologengruppen nach Inukjuaq, um dort Kanus mit Campingausrüstung und Labgeräten zu beladen und entlang der Küste der

Hudson Bay zu dem Gesteinsgürtel zu paddeln. Ihre Absicht war, das Alter der Felsen zu ermitteln. Eines dieser Teams unter der Leitung von Stephen J. Mojzsis von der University of Colorado in Boulder datiert sie auf 3,8 Milliarden Jahre. Das ist recht alt, aber nicht rekordverdächtig.

Jonathan O’Neil an der Spitze der konkurrierenden Forschergruppe von der University of Ottawa (Kanada) schreibt den Felsen hingegen ein Alter von 4,4 Milliarden Jahren zu. Damit wären sie die weitaus ältesten Gesteine, die je auf der Erde gefunden wurden. Sie hätten sich bereits rund 150 Millionen Jahre nach der Entstehung unseres Planeten vor 4,568 Milliarden Jahren gebildet und könnten davon erzählen, wie sich die Erdoberfläche in dieser frühen, turbulenten Epoche entwickelte und wie lange es dauerte, bis Leben entstand. All das lag bislang außerhalb der Reichweite jeglicher Forschung.

Während der ersten 500 Millionen Jahre nach der Geburt der Erde erstarrte ihre anfangs glutflüssige Oberfläche zu einer festen Gesteinskruste, die schon bald komplett von Wasser bedeckt war. Aus diesem Urozean erhob sich schließlich das erste trockene Land und bildete frühe Kontinen-

AUF EINEN BLICK

Fenster in die Frühzeit unseres Planeten

- 1 Bei **Gesteinen** vom Nordostrand der Hudson Bay in Kanada könnte es sich um die **ältesten handeln, die jemals gefunden wurden**. Doch die Wissenschaftler streiten darüber, ob sie vor 3,8 oder 4,4 Milliarden Jahren entstanden. Der frühere Wert würde die Gesteine in die Nähe der **Entstehungszeit der Erde** rücken.
- 2 Der Ausgang der Debatte hängt davon ab, ob es gelingt, die **Methoden zur Datierung von Atomen** in kleinen Gesteinsproben aus der Frühgeschichte der Erde zu verbessern.
- 3 Bei einem Alter von 4,4 Milliarden Jahren könnten die Gesteine **handfeste Hinweise** darauf liefern, wie die Erdoberfläche Ge- stalt angenommen hat, wann die ersten Ozeane entstanden sind und **wie schnell sich das Leben entwickelte**.

te. Es war eine Zeit, in der massenhaft Kometen und Asteroiden auf der Erde einschlugen. Vermutlich stieß damals auch ein Planet von der Größe des Mars mit ihr zusammen; aus den Trümmern dieser Kollision – als »giant impact« (riesiger Einschlag) bekannt – ging der Mond hervor.

Allerdings existieren nur wenige Hinweise darauf, wann die geschilderten Ereignisse genau stattfanden. So lassen einige Mineralkörper vermuten, dass sich der Urozean vor dem Mond gebildet hat. Die Geologen befinden sich hier in derselben misslichen Lage wie die Biografen altgriechischer Philosophen, die vereinzelten Pergamentfetzen und Erzählungen aus zweiter Hand möglichst viele Informationen zu entlocken versuchen.

In den Nuvvuagittuq-Gesteinen dagegen wird man wie in einem Buch lesen können – sofern O’Neil Recht hat und sie wirklich 4,4 Milliarden Jahre alt sind. Auf einer Fläche von mehreren tausend Morgen warten Minerale darauf, unter sucht zu werden. Vielleicht halten sie Antworten auf lange gestellte Fragen bereit. Setzte die Plattentektonik schon sehr früh ein, oder dauerte es Hunderte von Jahrmillionen, bis die Kontinente mit ihrer Wanderung be-

gannen? Wie sah damals die chemische Zusammensetzung der Ozeane und der Atmosphäre aus? Und wie bald nach der Geburt der Erde entstand das Leben?

Bei einem Alter von 4,4 Milliarden Jahren könnte sich die Nuvvuagittuq-Formation somit als einer der wertvollsten Schätze der Geologie erweisen. Sollte Mojzsis dagegen Recht behalten, und die Felsen zählen nur 3,8 Milliarden Jahre, blieben die ersten Kapitel der Erdgeschichte vorerst – oder vielleicht sogar für immer – zugeschlagen.

Warum alte Gesteine so selten sind

Die meisten Gesteine der Erdkruste sind auf eine von zwei Arten entstanden. Entweder setzten sich feine Partikel auf dem Boden von Ozeanen ab und wurden dort allmählich zu Schichten von Sedimentgestein zusammengepresst, oder glutflüssiges Material stieg aus dem Erdmantel empor, kühlte dabei ab und erstarnte zu magmatischem Gestein.

Nur winzige Teile alter Kruste haben sich bis heute erhalten, der Rest ist verschwunden. Einige Gesteine sind allmählich verwittert und wurden durch Regen und Wind abgetragen. Letztlich landeten

sie so zur (erneuten) Sedimentation in den Ozeanen. Viele andere gelangten beim Absinken tektonischer Platten (zurück) in den heißen Mantel, wo sie schmolzen. Dabei wurde ihre Identität ausgelöscht – so wie die eines Eiswürfels, der sich in einem warmen Teich auflöst. Ihre Atome verteilten sich in dem vorhandenen Magma, aus dem sich beim Aufstieg neues, jüngeres Gestein bildete. Auch der Aufprall riesiger Asteroiden auf der frühen Erde wirkte zerstörerisch, indem er große Abschnitte der Kruste zum Schmelzen brachte.

Deshalb sind alte Gesteine ausgesprochen selten, was die Formation von Nuvvuagittuq so wertvoll macht – und so heiß umstritten. Nur an wenigen anderen Stellen rings um den Erdball fanden sich Gesteinsproben, die vor mehr als 3,8 Milliarden Jahren entstanden sind. Die ältesten stammen aus der Tundra in den Nordwestterritorien Kanadas und wurden auf 3,92 Milliarden Jahre datiert.

Weil frühe Gesteine so rar sind, haben sich Geologen nach anderen Zeugnissen aus der ersten halben Jahrmilliard unseres Planeten umgesehen. Als solche erwiesen sich bestimmte Minerale: die Zirkone. Es handelt sich um mikroskopisch kleine,

robuste Kristalle aus Zirkoniumdioxid, die sich manchmal in abkühlendem Magma bilden und in den daraus entstandenen Gesteinen vorkommen. Bei deren Erosion bleiben sie gewöhnlich erhalten und können mit anderen Verwitterungsprodukten ins Meer gelangen. Dort setzen sie sich auf dem Ozeanboden ab und werden in jüngere Sedimentgesteine eingebettet.

Zu den häufigen Verunreinigungen in Zirkonen gehören auch radioaktive Stoffe

wie Uran. Deren Zerfall gleicht einer Uhr, die Geologen zur Altersbestimmung heranziehen können. Die Kristalle enthalten zudem andere Substanzen, die Hinweise auf den Zustand der Erde zu ihrer Bildungszeit liefern. »Das Tolle an Zirkonen ist, dass sie echte Zeitkapseln sind«, erklärt Mojzsis. Geologen haben 2001 im australischen Outback sehr alte Exemplare in jüngeren Sedimentgesteinen entdeckt. Einige wurden auf 4,4 Milliarden Jahre datiert, womit

sie die ältesten jemals gefundenen Zeugen der Erdgeschichte sind. Die winzig kleinen Kristalle haben bemerkenswerte Informationen geliefert. So lässt sich aus ihrer Struktur schließen, dass ihr Ursprungsgestein etwa sechs bis sieben Kilometer unter der Erdoberfläche erstarrte. Mojzsis und seine Kollegen fanden teils auch chemische Fingerabdrücke von Wasser.

Das sind wertvolle Erkenntnisse. Doch das Originalgestein, zu dem die Zirkone



JAMES ST. JOHN / GARNET PARAGNEISS (NUVVUAGITTUQ GREENSTONE BELT, EOARCHEAN, 4.28 GA; WESTERN UNGAVA PENINSULA, EASTERN SIDE OF HUDSON BAY, QUEBEC, CANADA) / CC BY 2.0 (CC BY 2.0)

NUVVUAGITTUQ-GESTEIN
Stein des Anstoßes: Hat er sich schon 150 Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde gebildet und stellt damit den ältesten bekannten Überrest kontinentaler Kruste dar, oder ist er wesentlich jünger? Das letzte Urteil steht noch aus.

einst gehörten, wäre noch viel aufschlussreicher. Es würde zahlreiche weitere Minerale enthalten, die weitaus mehr über die Erde kurz nach deren Geburt verraten könnten. Das führt uns nach Nuvvuagittuq zurück.

Pures Finderglück

Ende der 1990er Jahre finanzierte die Regierung von Quebec eine große geologische Expedition, um die ersten detaillierten Karten von den nördlichen Arealen der Provinz zu erstellen. In der Region sind alte Kerne kontinentaler Kruste in Schichten jüngeren Gesteins eingebettet. Die Datierungen ergaben großenteils ein Alter von ungefähr 2,8 Milliarden Jahren. Doch eine der Proben erwies sich als 3,8 Milliarden Jahre alt. Gesammelt hatte sie Pierre Nadeau, damals Doktorand an der Simon Fraser University in British Columbia (Kanada), der rein zufällig zum Grünsteingürtel von Nuvvuagittuq geschickt worden war. »So etwas zu entdecken ist, als würde einem ein Juwel in den Schoß fallen«, sagte Nadeaus Kollege Ross Stevenson 2002 der BBC nach der Veröffentlichung der Ergebnisse. Auch andere Geologen machten sich nun auf den beschwerlichen Weg nach

Nuvvuagittuq – darunter O’Neil, der an der McGill University promovierte. Ihm fiel die Ähnlichkeit in der chemischen Zusammensetzung zwischen den Nuvvuagittuq-Proben und den ebenfalls 3,8 Milliarden Jahre alten Gesteinen der Isua-Formation in Grönland auf. Vielleicht gehörten sie zu derselben alten Landmasse.

Um diese Frage zu klären, tat sich O’Neil mit Richard W. Carlson zusammen, einem Experten für präzise Datierungen alter Gesteine an der Carnegie Institution in der US-Hauptstadt Washington. Bei der Altersbestimmung messen die Wissenschaftler den Gehalt an radioaktiven Isotopen in einer Gesteinsprobe. Das sind Varianten von Atomen, welche die gleiche Zahl von Protonen, aber unterschiedlich viele Neutronen in ihrem Kern enthalten. Sie befanden sich einst in der Staubwolke, aus der unser Sonnensystem hervorging, und wurden so Bestandteil der sich zusammenballenden Planeten und Meteoriten. Damit gelangten sie auch in die Gesteine, die auf der Erde auskristallisierten. Die Isotope zerfielen dann ganz allmählich mit gleich bleibender Geschwindigkeit: Nach einer bestimmten Zeitspanne, der so genannten Halbwertszeit, war ihre Konzentration jeweils

auf die Hälfte gesunken. Durch Messung ihres noch vorhandenen Restgehalts lässt sich daher das Alter eines Gesteins bestimmen.

In einem Labor der Carnegie Institution ermittelten O’Neil und Carlson die Konzentrationen verschiedener radioaktiver Isotope und ihrer Zerfallsprodukte, darunter Samarium-147 und Neodym-143. Dabei machten sie eine seltsame Entdeckung. Das Gestein enthielt auch Neodym-142, das beim Zerfall von Samarium-146 entsteht. Auf der Erde gibt es jedoch längst kein natürliches Samarium-146 mehr, weil seine Halbwertszeit ziemlich kurz ist; neuesten Untersuchungen zufolge beträgt sie nur 68 Millionen Jahre. »Samarium-146 war anfangs auf der Erde vorhanden, weil es bei der Supernova-Explosion ausgestoßen wurde, welche die Bildung des Sonnensystems auslöste«, sagt Carlson. »Doch dann zerfiel es innerhalb von 500 Millionen Jahren vollständig.«

Alt oder am ältesten?

Carlson und seine Mitarbeiter fanden in diversen Nuvvuagittuq-Gesteinen unterschiedliche Mengenverhältnisse zwischen Neodym-142 und anderen Neodym-Isoto-

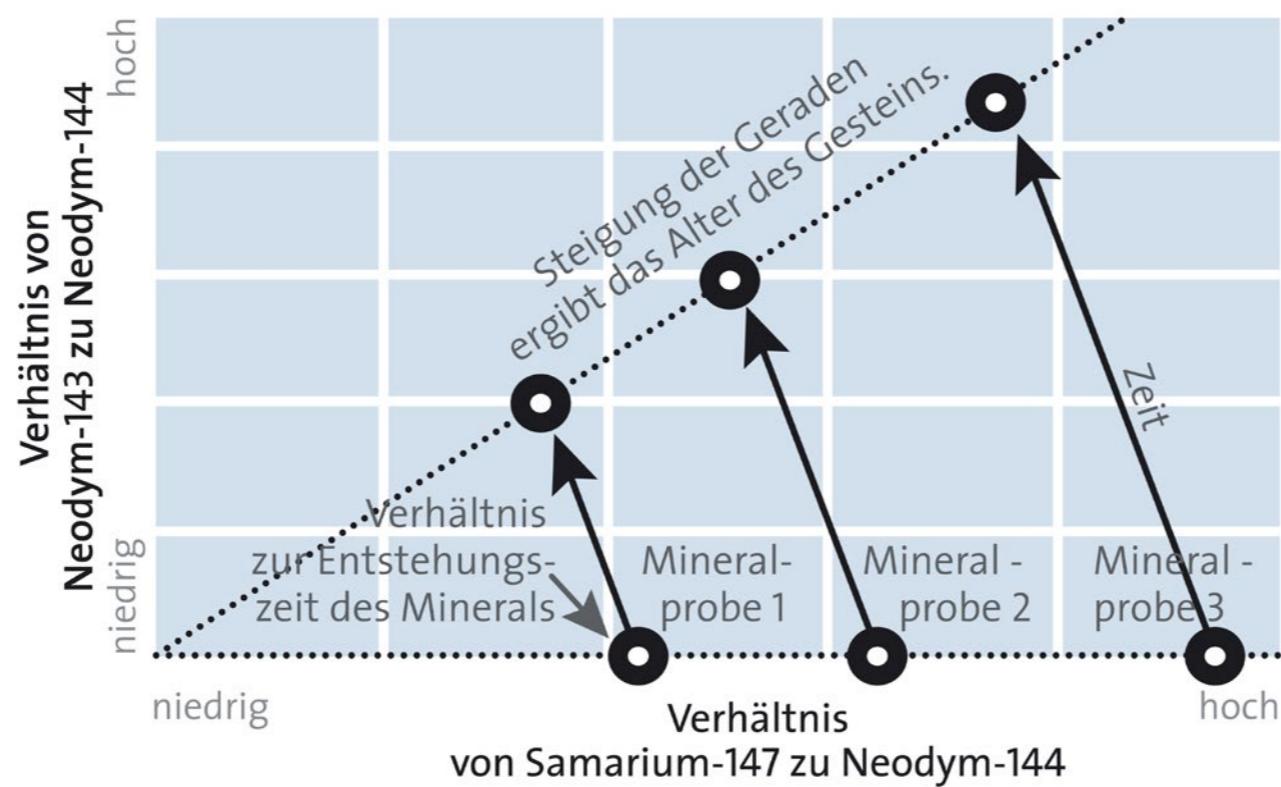
Wie man ein Gestein datiert

Wenn Magma erstarrt, werden in dem resultierenden Gestein auch radioaktive Elemente eingeschlossen. Von diesen existieren meist mehrere Sorten mit unterschiedlichem Atomgewicht – so genannte Isotope. Über Jahrmillionen hinweg zerfällt jedes radioaktive Isotop mit gleich bleibender, unverwechselbarer Geschwindigkeit in ein anderes. Zum Beispiel entsteht aus Samarium-147 (dem »Mutterisotop«) Neodym-143 (das »Tochterisotop«). Die Anzahl der Mutterisotope nimmt allmählich ab, während die der Tochterisotope steigt. Beide können also wie eine Uhr als Zeitmesser dienen. Allerdings müssen die Anfangskonzentrationen bekannt sein.

Diese Bedingung entfällt, wenn im Gestein noch ein anderes Isotop des Tochterelements vorkommt, das wie Neodym-144 selbst stabil und kein radioaktives Zerfallsprodukt ist. Sein Anteil bleibt daher über die

Zeit konstant und dient als Bezugswert. Trägt man nun die Konzentrationen des Mutter- und Tochterisotops im Verhältnis zur Menge des stabilen, nicht radiogenen Vergleichsisotops gegeneinander auf, ergibt sich eine Gerade (unten). Je steiler diese so genannte Isochrone ansteigt, desto mehr radioaktive Atome sind zerfallen und desto älter ist das Gestein.

Forscher haben verschiedene solcher Paare von Mutter- und Tochterisotopen zur Datierung der Proben vom Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel in Kanada herangezogen. Leider gibt es immer einen gewissen Fehlerbereich. Die Wissenschaftler hoffen jetzt darauf, mit einer komplexeren Datierungsmethode Klarheit zu erlangen. Sie ist noch genauer, weil zwei verschiedene Uhren miteinander kombiniert werden können: die Verhältnisse von Uran-238 zu Blei-206 und von Uran-235 zu Blei-207.



pen. Solche Differenzen waren nur zu erklären, wenn noch Samarium-146 auf der Erde existierte, als sich die Gesteine bildeten und sie unterschiedlich viel davon aufnahmen. Durch Vergleich der Isotopenverhältnisse schätzten O’Neil, Carlson und ihre Mitarbeiter ab, wann die betreffenden Gesteine entstanden waren. Mit dem Ergebnis hatte keiner von ihnen gerechnet: 4,28 Milliarden Jahre. Demnach handelte es sich um die ältesten Gesteine der Erde. Nach der Veröffentlichung dieser Entdeckung im Jahr 2008 analysierte das Team weitere Proben und schätzt das Alter der Nuvvuagittuq-Formation jetzt sogar auf 4,4 Milliarden Jahre.

O’Neil und seine Mitarbeiter gaben ihre Ergebnisse erstmals auf einer Geologentagung in Vancouver bekannt. Mojzsis erinnert sich noch, wie verblüfft er war. »Meine Kinnlade fiel herunter. Ich sah mich um und blickte in lauter staunende Gesichter. Ich dachte: ‚Das ist kurios.‘«

Mojzsis hatte allen Grund, perplex zu sein. Er gehörte zu den wenigen Geologen, die zum Nuvvuagittuq-Gürtel gereist waren, um Nadeaus Forschungen weiterzuverfolgen. Er und sein Team fanden einen magmatischen Gesteinssgang, der die For-

mation durchstoßen hatte, nachdem sie entstanden war. Wie sich zeigte, enthielt er Zirkone. Zurück in Colorado, datierte Mojzsis die Minerale auf 3,75 Milliarden Jahre – ein Ergebnis, das gut zu Nadeaus ursprünglichem Alterswert von 3,8 Milliarden Jahren passte. Und jetzt stand O’Neil vor ihm und der versammelten Geologenschar und erklärte, die Nuvvuagittuq-Gesteine seien eine halbe Milliarde Jahre älter!

Einer der Mitarbeiter von Mojzsis war Bernard Bourdon von der École normale supérieure in Lyon (Frankreich). Dieser bat O’Neil um einige Proben und untersuchte sie erneut. Die Messwerte für Neodym erwiesen sich als korrekt. Dennoch »ergab das alles für mich keinen Sinn«, sagt Mojzsis.

Er kehrte daher mit seinem Team 2011 nach Nuvvuagittuq zurück, um weitere Untersuchungen anzustellen. Sie kartierten das Gelände und die Gesteinsschichten rund um die Stellen, an denen O’Neil die von ihm datierten Proben entnommen hatte. In den angeblich 4,4 Milliarden Jahre alten Gesteinen sahen sie hellgrüne Bänder aus dem Mineral Quarzit. Das bot nach Überzeugung von Mojzsis eine Möglichkeit, zu überprüfen, ob die Gesteine wirklich die ältesten der Erde waren.

4 280 000 000

»Mit dem Ergebnis hatte keiner gerechnet: 4,28 Milliarden Jahre. Also war es das älteste Gestein der Erde«

Ähnliche Quarzitbänder gibt es auch in wesentlich jüngeren Formationen. Sie entstehen, wenn sich aus Unterwasservulkanen Gesteinsschmelze über den Meeresboden ergießt. Kommt es danach zu einer längeren Ruhephase, setzen sich terrestrische Sedimente über der Lava ab. Sobald die Vulkane wieder ausbrechen, werden diese Ablagerungen unter einer neuen Schicht von magmatischem Gestein begraben, wo sie sich bei hohen Temperaturen und Drücken mit der Zeit in Quarzit verwandeln.

Falls es sich in Nuvvuagittuq so verhielt, würden die Quarzitbänder aus erodiertem Material von einer älteren Landmasse stammen, das sich während einer dieser vulkanischen Ruhephasen abgesetzt hatte. Und darin enthaltene Zirkone müssten älter sein als das umgebende Vulkangestein, da sie auf eine viel längere Geschichte zurückblicken könnten.

»Wir krochen auf Händen und Knien über unzählige Stellen, wo der Quarzit zu Tage trat«, erzählt Mojzsis. An zwei solchen Ausbissen stießen sie schließlich auf die ersehnten Zirkone. Einer der Fundorte lieferte Tausende der winzigen Minerale. In seinem Labor in Colorado bestimmte Mojzsis dann das Alter der Kristalle – und erhielt

MIT FRDL. GEN. VON JONATHAN O'NEIL, UNIVERSITY OF OTTAWA



einen Wert von 3,8 Milliarden Jahren. Damit konnte das umgebende Gestein unmöglich schon vor 4,4 Milliarden Jahren entstanden sein.

Das Team von Mojzsis erkundete das Alter von Nuvvuagittuq auch mit anderen Methoden. So unternahm es eine Datierung, die auf dem Zerfall von Lutetium zu Hafnium beruht. Wiederum kam ein Alter von 3,8 Milliarden Jahren heraus.

Alle diese Befunde setzte Mojzsis zu einer neuen Geschichte von Nuvvuagittuq zusammen. Demnach stieg vor rund 4,4 Milliarden Jahren geschmolzenes Gestein zur Erdoberfläche auf und erstarrte. Beim Auskristallisieren schloss es etwas kurzlebiges, radioaktives Samarium-146 ein, das auf der frühen Erde noch vorhanden war. Nach dessen Zerfall wurde die alte Kruste zurück in den Mantel gezogen und aufgeschmolzen. Aber ihr Gestein vermischtete sich nicht gänzlich mit dem umgebenden Mantelmaterial. In abgegrenzten Bezirken blieb das beim Zerfall von Samarium zuvor gebildete Neodym eingeschlossen. Vor 3,8 Milliarden Jahren gelangte das ehemalige Krustenmaterial durch vulkanische Aktivität schließlich zurück an die Oberfläche. Das daraus gebildete Gestein stammte

zum Teil aus den unvermischten, abgegrenzten Bereichen und wies deren 4,4 Milliarden Jahre alte Signatur auf. »Die Schmelze kann eine Erinnerung an ein vorangegangenes Stadium bewahrt haben«, erläutert Mojzsis. So ist es möglich, dass ein vor nur 3,8 Milliarden Jahren entstandenes Gestein ein Alter von 4,4 Milliarden Jahren vortäuscht.

Mojzsis und seine Mitarbeiter stellten diese Ergebnisse auf Geologentagungen vor – manchmal in denselben Sitzungen, in denen O’Neil die gegenteilige Ansicht vertrat, wonach die Gesteine vor 4,4 Milliarden Jahren entstanden und seither einfach in der Erdkruste verblieben seien. Auch er kehrte mit seinem Team nach Nuvvuagittuq zurück und erweiterte seine Sammlung alter Gesteinsproben von 10 auf rund 50. Die neuen Messwerte standen sämtlich in Einklang mit der ursprünglichen Altersschätzung für den Fundort. O’Neil widerspricht auch der Argumentation, mit der Mojzsis und seine Mitarbeiter bewiesen haben wollen, dass Nuvvuagittuq nur 3,8 Milliarden Jahre alt sein könne. »Wir sind völlig unterschiedlicher Meinung über die Geologie der Region«, sagt er. Das betrifft insbesondere die Quarzit-

schicht, in der Mojzsis seine Zirkone gefunden hat. Bei so alten Formationen wie derjenigen von Nuvvuagittuq ist es nicht einfach, festzustellen, aus welcher Art von Gestein sie aufgebaut sind; denn sie wurden über die Jahrtausende hinweg stark deformiert. O’Neil hält das Quarzitband gar nicht für Quarzit. Stattdessen behauptet er, es handle sich um einen magmatischen Gesteinsgang, der vor 3,8 Milliarden Jahren in das alte Gestein eingedrungen wäre. Das Alter seiner Zirkone habe demnach mit dem des umgebenden Materials nicht das Geringste zu tun. An den Gesteinen sei »nichts bizarr oder seltsam«, betont O’Neil. »Sie sind einfach nur wirklich alt.«

Larry Heaman von der University of Alberta in Edmonton (Kanada) bescheinigt ihm und seinen Kollegen gute Arbeit. »Sie sind mit der gebührenden Sorgfalt vorgegangen, und ich halte ihre Argumentation für schlüssig«, meint er. Doch er glaubt auch, dass eine gewisse Unsicherheit bleiben wird, bis es gelingt, einen anderen Weg zur Datierung der Formation zu finden. Möglicherweise enthalten einige Minerale in den untersuchten Gesteinen von Nuvvuagittuq selbst – und nicht nur die

darin eingeschlossenen Zirkonkristalle – Uran und Blei. Die Uran-Blei-Datierung ist die verlässlichste Bestimmungsmethode bei sehr alten Gesteinen, da die Wissenschaftler über große Erfahrung mit ihr verfügen. »Fände jemand dort draußen das richtige Material und würde es mit diesem Verfahren datieren, dann wäre die Sache entschieden«, sagt Heaman.

Einblick in die Entstehung des Lebens?

Sollten die Nuvvuagittuq-Gesteine tatsächlich 4,4 Milliarden Jahre alt sein, könnten sie laut O’Neil ein breites Fenster zur Frühgeschichte der Erde aufstoßen. Dann wären sie nämlich kurz nach dem »giant impact« entstanden, der den Mond hervorbrachte. Die australischen Zirkone haben sich ebenfalls um diese Zeit gebildet, allerdings etliche Kilometer tief im Erdmantel. Die Nuvvuagittuq-Gesteine seien dagegen an der Oberfläche entstanden, so O’Neil. »Ihre Geochemie scheint derjenigen eines Ozeanbodens zu entsprechen«, bemerkt er.

Demnach hätte die Erde schon bald nach dem »giant impact« einen Ozean bekommen. Nach Einschätzung von O’Neil bestehe zudem eine bemerkenswerte Ähnlich-

keit zwischen der Chemie der Nuvvuagittuq-Gesteine und derjenigen von deutlich jüngeren Meeresböden. Das hieße, dass sich die ältesten Ozeane nicht wesentlich von den heutigen unterschieden. O’Neil meint sogar in den Gesteinen Anzeichen für Plattentektonik zu erkennen. Schon sehr früh in der Erdgeschichte hätte die Erdkruste dann aus einem Mosaik einzelner Schollen bestanden, die sich gegeneinander bewegten.

Bei einem Alter von 4,4 Milliarden Jahren könnten die Nuvvuagittuq-Gesteine auch neues Licht auf den Ursprung des Lebens werfen. Derzeit verliert sich die Spur der Fossilien vor rund 3,5 Milliarden Jahren. In jüngeren Gesteinen haben sich Bakterien erhalten, älteres Material ist dagegen steril.

Doch Fossilien sind nicht die einzigen Spuren, die Lebewesen hinterlassen. Da Bakterien sich von Kohlenstoff ernähren und dabei das leichtere Isotop C-12 bevorzugen, verändern sie in ihrer Umgebung das Mengenverhältnis zum schwereren C-13. In Karbonatgesteinen sollte diese Signatur erhalten geblieben sein. Einige Forscher glauben in der 3,8 Milliarden Jahre alten grönlandischen Isua-Formation dieses

Ungleichgewicht entdeckt zu haben.

Über die 700 Millionen Jahre davor gibt es dagegen bisher keinerlei Informationen. Niemand kann also sagen, ob das Leben schon kurz nach der Entstehung des Planeten oder erst mit einer Verzögerung von mehreren hundert Jahrmillionen auftrat. Auch ist unklar, wo auf dem Globus es sich entwickelte. Nach Ansicht einiger Forscher bildeten sich die ersten Biomoleküle in Wüsten oder Gezeitentümpeln. Andere dagegen halten hydrothermale Schloten in der Tiefsee für den Schauplatz der Urzeugung.

Falls die Nuvvuagittuq-Gesteine vor 4,4 Milliarden Jahren am Ozeanboden entstanden sind, versprechen sie einen Beitrag zur Klärung dieser Fragen. O’Neil hofft auf die Kooperation mit anderen Forschern, um herauszufinden, ob sich die Gesteine in hydrothermalen Schloten gebildet haben könnten. Tiefseevulkane seien der ideale Ort für die Entstehung des Lebens, meint er.

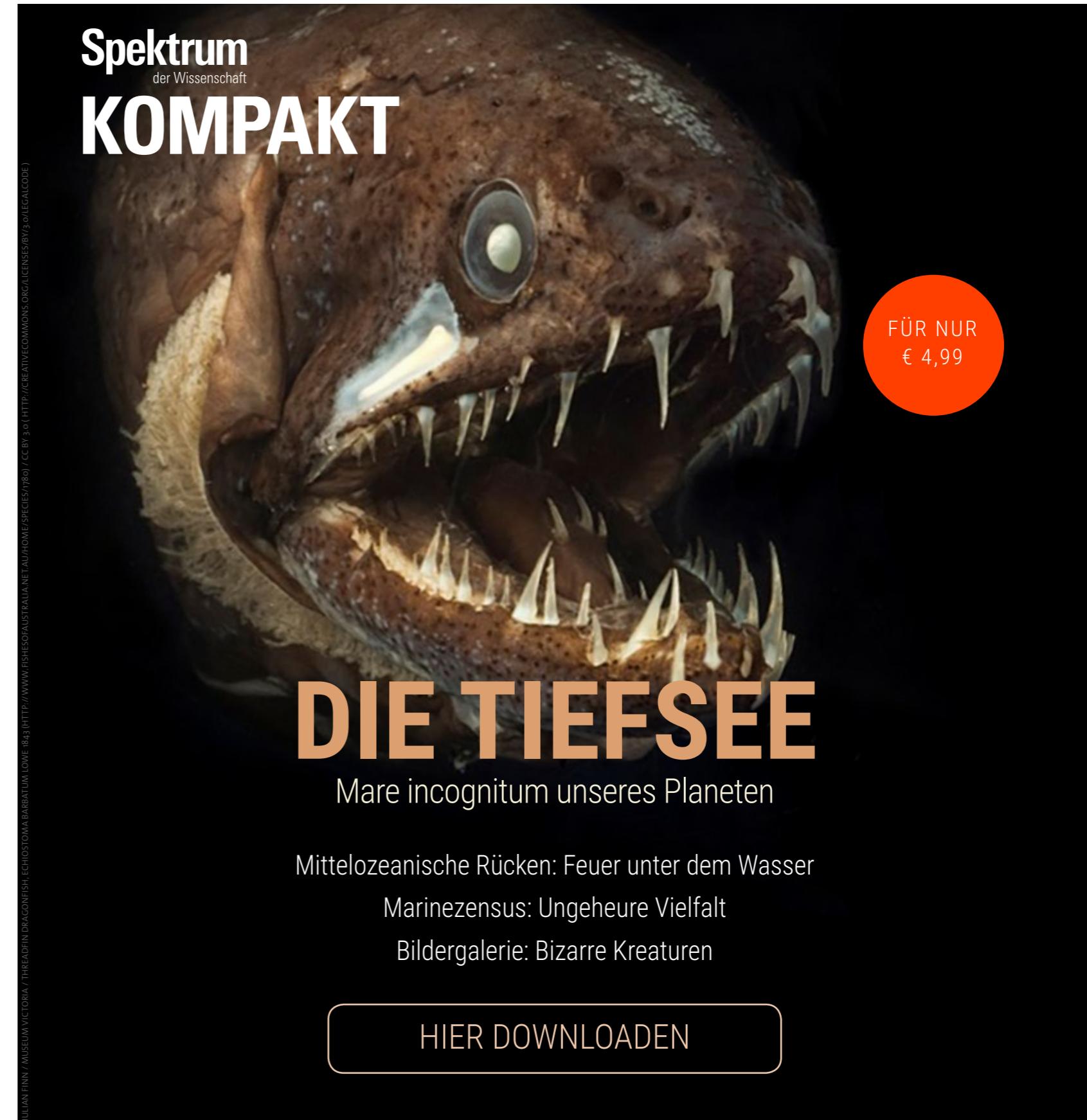
Auch Mojzsis ist versessen auf das Aufspüren frühester Lebensspuren, doch er will nicht in Nuvvuagittuq danach suchen. »Ich werde nicht den Rest meiner Karriere mit diesem Quatsch verschwenden«, sagt er. Im Übrigen kann er der Auseinanderset-

zung mit O'Neil auch etwas Positives abgewinnen. Vermutlich bringe sie bessere Methoden zur Datierung sehr alter Gesteine hervor, die es künftigen Geologengenerationen erlauben dürften, endlich den Vorhang vor der Bühne der frühen Erde aufzuziehen. Und in diesem Punkt zumindest ist O'Neil mit ihm einer Meinung. »Inseln uralten Gesteins finden sich wahrscheinlich überall«, sagt er. »Man übersieht sie nur allzu leicht.«



(Spektrum der Wissenschaft, 10/2014)

Cates, N. L. et al.: Reduced, Reused and Recycled: Detrital Zircons Define a Maximum Age for the Eoarchean (ca. 3750 – 3780 Ma) Nuvvuagittuq Supracrustal Belt, Québec (Canada).
In: Earth and Planetary Science Letters 362, S. 283–293, 2013
Hazen, R.: The Story of Earth. Viking, New York 2012
O'Neil, J. et al.: Half a Billion Years of Reworking of Hadean Mafic Crust to Produce the Nuvvuagittuq Eoarchean Felsic Crust.
In: Earth and Planetary Science Letters 379, S. 13–25, 2013



Spektrum
der Wissenschaft
KOMPAKT

JULIAN FINN / MUSEUM VICTORIA / THREADFIN DRAGONFISH, ECHIOSTOMA BARBATUM, LIONE 1843 (HTTP://WWW.FISHESOFAUSTRALIA.NET/AUTHOME/SPECIES/1780) / CC BY 3.0 (HTTP://WWW.CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/3.0/DE/ACODE/)

DIE TIEFSEE
Mare incognitum unseres Planeten

Mittelozeanische Rücken: Feuer unter dem Wasser
Marinezensus: Ungeheure Vielfalt
Bildergalerie: Bizarre Kreaturen

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR
€ 4,99



MIDCONTINENT RIFT

NORDAMERIKAS GEBROCHENES HERZ

von Jessica Marshall

Ein riesiger Grabenbruch hätte vor rund einer Milliarde Jahren nahezu den nordamerikanischen Kontinent entzweit. Doch er blieb stecken. Den Ursachen dafür sind Wissenschaftler gerade auf der Spur.

An einem hellen Oktobersamstag zeigen die Bäume im Interstate State Park an der Grenze zwischen Minnesota und Wisconsin inmitten der USA ihre volle Herbstpracht. Zahlreiche Menschen bestaunen die bunten Blätter, schlängeln sich entlang der Wege, die durch eindrucksvolle Felsformationen aus dunklem Basalt zu einem Aussichtspunkt über dem St. Croix River führen. An einem der Gehwege dirigiert eine Fotografin ein junges Pärchen vor den Felsen in die richtige Pose, um ein romantisches Porträt von ihnen zu schießen. Wollten die beiden Verliebten mit dem Foto ihre ewig währende Liebe symbolisieren, hätten sie wohl eine andere Kulisse wählen sollen. Der zerklüftete Basalt, der ihre Gesichter rahmt, gehört zu einer riesigen Spalte, die sich in der Mitte Nordamerikas öffnete und den Kontinent vor 1,1 Milliarden Jahren fast zerriss – kein gutes Sinnbild für eine glückliche Beziehung.

Das Vulkangestein ist ein Überbleibsel des so genannten **Midcontinent Rift** – ei-

nes ausgedehnten Grabenbruchs, der Geologen vor große Rätsel stellt. Grabenbrüche sind Risse in der äußeren Erdschicht, die anwachsen und schließlich neue Ozeane formen können. So entstand etwa der Atlantik vor etwa 200 Millionen Jahren auf diese Weise. Und auch heute erweitert ein aktiver Grabenbruch das Meeresbecken. Das Midcontinent Rift verhielt sich allerdings anders. Es zog einen 3000 Kilometer langen Riss durch Nordamerika und formte ein Becken in etwa so groß wie das Rote Meer – dann kam das System zur Ruhe. Der Grabenbruch breitete sich nicht weiter, und der Kontinent blieb intakt.

»Wie das Rift die Erdkruste in der Region des Lake Superior zwar komplett umordnen konnte, es aber nicht schaffte, den Kontinent zu spalten, ist ziemlich erstaunlich«, sagt Geophysiker Randy G. Keller von der University of Oklahoma in Norman. »Ein spektakulärer Fehlschlag«, so der Leiter des Oklahoma Geological Survey weiter. Und dazu noch ein vergessener. Der Grabenbruch liegt mehrheitlich unter dicken Sedimenten verborgen, was seine Er-

forschung erschwert. Zudem befindet er sich weit ab von den Aufsehen erregenden geologischen Besonderheiten des Kontinents wie Bergketten und Erdbebenzonen. »Lange Zeit wurde der Grabenbruch kaum beachtet«, sagt Geochemiker [Peter Hollings von der Lakehead University](#) im kanadischen Thunder Bay.

Doch das ändert sich gerade. Geologen strömen neuerdings in die Region, um die enormen Erzvorkommen, entstanden durch die vulkanische Aktivität während der Grabenbruchbildung, zu untersuchen. In Nordminnesota befindet sich beispielsweise die weltweit größte unerschlossene Kupfer-Nickel-Lagerstätte. Von Interesse sind auch das [EarthScope](#)-Projekt von der US-amerikanischen National Science Foundation und die damit verbundenen Programme: Dutzende von zeitweilig installierten Seismometern entlang des Grabenbruchs sollen dort einen beispiellosen Einblick in die Erdkruste und den oberen Erdmantel liefern.

Forscher wollen verschiedene Theorien überprüfen, warum der Grabenbruch auf-

trat und warum er sich wieder beruhigte. Der urzeitliche Riss ließe sich außerdem nutzen, um das Driften und Auseinanderbrechen von Platten generell besser zu verstehen. Und da die Lavaströme im Grabenbruch in der Mitte eines Kontinents stecken blieben, sehen sie heute noch so aus wie vor einer Milliarde Jahren – nicht demoliert von Kollisionen, wie sie an den Kontinentalrändern auftreten. Das Basaltgestein bietet daher ein beispielloses Zeugnis von längst vergangenen Ereignissen auf der Erde, aus einer Zeit, als sich die kontinentalen Platten zu einem Superkontinent namens [Rodinia](#) vereinigten, kurz nachdem sich mehrzelliges Leben entwickelt hatte. Die Zeit des Grabenbruchs scheint also gekommen, so das Gefühl unter Forschern. »Es gibt einen regelrechten Ansturm von Geowissenschaftlern, die früher wirklich nicht daran interessiert waren«, sagt Keller.

Horchposten ins Erdinnere

Rund 145 Kilometer nordöstlich von jener Stelle, an der das Paar für sein Foto posierte, schaufelt [Suzan van der Lee](#) ein Loch, ein Kopftuch hält dabei ihr graues Haar zurück. Ungefähr einen Meter unter dem

Waldboden legt sie ein Seismometer, verstaut in einem schwarzen Kunststoffrohr, frei. Begleitet wird die Geophysikerin von der Northwestern University in Evanston, US-Bundesstaat Illinois, von der Studentin Emily Wolin, die gerade vor einem Laptop kniet und die Daten aus dem Instrument überspielt.

Der Messplatz liegt 50 Kilometer südlich des Lake Superior, abseits der Hauptstraße und inmitten eines dichten Baumbestands aus jungen Espen und Eichen. Wolin hatte die Stelle vor zweieinhalb Jahren entdeckt, als sie durch das Gebiet wanderte, um geeignete Standorte im oder nahe dem Midcontinent Rift auszumachen. Vor allem mussten die Messplätze ausreichend von Straßen entfernt sein, um Vibrationen durch den Verkehr zu vermeiden.

Seither kontrolliert Wolin die Stationen alle sechs Monate. Auf ihren Rundgängen hat die Studentin bereits einiges erlebt: Sie musste etwa vor einem angriffslustigen Hund fliehen, nach einem Schneefall im späten Frühjahr ihre Schier anlegen und ihr Auto mit Hilfe eines Bärenjägers aus dem Schlamm befreien. Eine ihrer Stationen überstand ein Lauffeuer (zwar war ein

Kabel geschmolzen, doch sie funktionierte noch), eine andere zeichnete Vibrationen auf, die umstürzende Bäume während eines ausgewachsenen Sturms verursachten. Anderorts nutzte ein Jäger das Solarpaneel – das den nötigen Strom für das Messinstrument liefert – offenbar, um seine Schießkünste zu verbessern: Wolin fand ein Einschussloch direkt in dessen Mitte.

Heute ist das Team hier, um Instrumente zu bergen, die zwei Wintern ausgesetzt waren und dennoch unbeirrt die seismische Aktivität rund um den Globus aufzeichneten. Die Stationen gehören zu einem Nebenprojekt von EarthScope, dem Superior Province Rifting EarthScope Experiment, kurz SPREE. In dessen Rahmen wollen Forscher den Midcontinent Rift mit insgesamt 82 zusätzlichen Stationen überwachen und vermessen. Ähnlich wie bei tomografischen Aufnahmen in der Medizin, scannen die Seismometer den Erdmantel und die Erdkruste nahe dem Grabenbruch ab, bis in eine Tiefe von rund 1000 Kilometern. Van der Lee hofft, auf diese Weise mehr darüber zu erfahren, wie weit sich der Grabenbruch ins Erdinnere erstreckt, und vielleicht einige Hinweise auf dessen Ursprung zu finden.

Obwohl die Forscher die Seismometer an vergleichsweise ruhigen Orten aufstellten, sind die aufgezeichneten Daten von einigen unvermeidbaren Störeffekten überlagert. Denn die Instrumente sind derart empfindlich, dass sie nicht nur Erdbeben auf der gesamten Welt detektieren, sondern auch Signale von Ozeanen und alle anderen Formen von seismischer Hintergrundaktivität. Die Herausforderung be-

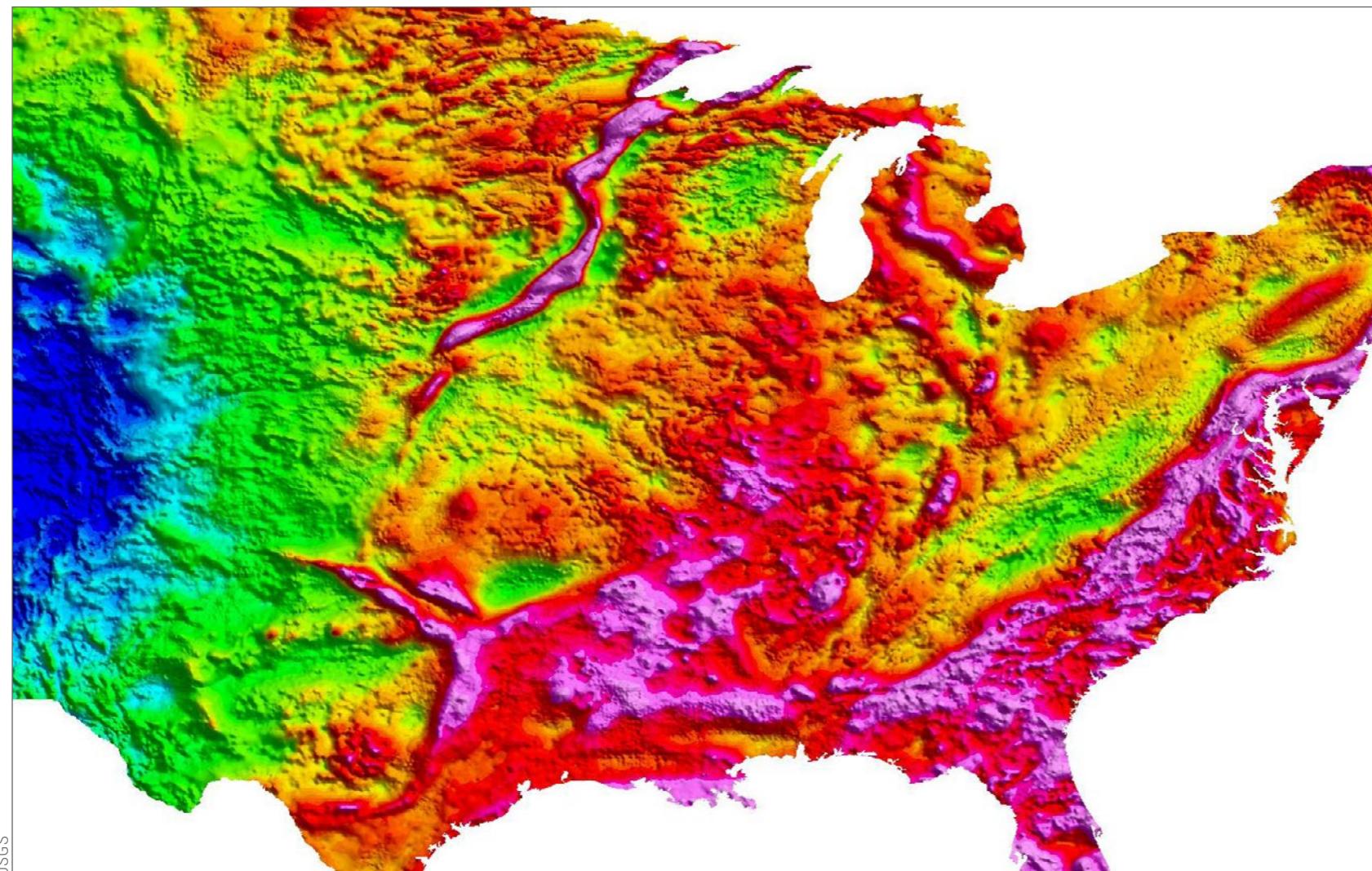
steht darin, diese Störeinflüsse bei jeder Station herauszufiltern und das echte Signal zu extrahieren. Genau damit ist das Team gerade beschäftigt – und es wird Monate dauern, bis ein umfassenderes Bild der Untergrundstruktur vorliegt.

Schon jetzt sind die Forscher allerdings von den ersten Ergebnissen fasziniert: Die Daten variieren sehr stark entlang des Grabenbruchs. »Alles, was wir bislang sehen,

deutet darauf hin, dass wir es mit einer sehr komplexen Struktur zu tun haben«, erläutert van der Lee.

Geheimnisse aus der Tiefe

Geophysikalische Projekte wie SPREE werden unabdingbar sein, um auch die tiefsten Geheimnisse des Grabenbruchs zu lüften – denn ein Großteil der Struktur liegt im Erdreich verborgen. Durch Magnetfeld- und Schwerkraftanalysen der Region in den vergangenen 50 Jahren wissen Geophysiker, dass der Grabenbruch wie ein Hufeisen geformt ist: Zwei Arme zeigen vom Lake Superior gen Süden. Seismische Untersuchungen in den 1980er Jahren zeigten, dass die Basaltschichten im Grabenbruch bis tief unter die Erde reichen, unterhalb des Lake Superior bis zu 30 Kilo-



MAGNETISCHE GESTEINSANOMALIEN

Diese geomagnetische Karte des Gesteins in den USA zeigt eine Anomalie im Bereich des Midcontinent Rift, des Grabenbruchs, der Nordamerika fast zerrissen hätte. Er ist erkennbar als pinkfarbene Linienstruktur in einer rot-gelb-grünen Umgebung und geht von den Großen Seen aus.

meter [1]. Insgesamt produzierte der Grabenbruch zwischen ein und zwei Millionen Kubikkilometer an Basalt und ist damit einer der weltweit größten Vorkommen von diesem Gestein.

Die schiere Menge an entstandenem Basalt ließ viele vermuten, dass der Grabenbruch durch einen so genannten Mantel-Plume gespeist wurde – heißes Gestein steigt hierin senkrecht aus den Tiefen des Planeten auf. Eine andere weit verbreitete Idee besagt, dass aus dem Osten tektonische Platten auf den Kontinent trafen und den Grabenbruch so zum Stillstand brachten. Forscher haben Methoden aus der Geochemie, Geophysik und anderen Fachbereichen angewandt, um diese Ideen zu überprüfen: mit widersprüchlichen Resultaten. »Mit allen Modellen gibt es bisher Schwierigkeiten«, sagt Hollings. »Keines von ihnen funktioniert wirklich perfekt. Doch mit Hilfe der neuen Studien können wir die Modelle neu bewerten und verschiedene Hypothesen durchspielen, wie es dazu kommen konnte«, fügt er hinzu.

Einige Forscher sehen den Grabenbruch inzwischen als Teil eines viel größeren Rätsels. Die Geophysikerin [Carol Stein von der University of Illinois](#) in Chicago sprach im

Oktober auf einer Konferenz der Geological Society of America (GSA) in Denver, Colorado, über diesen Ansatz. Das Midcontinent Rift war nicht isoliert, schlägt sie zusammen mit Keller und anderen Wissenschaftlern vor, sondern mit weiteren Grabenbrüchen verbunden. Letztere hatten zu der Zeit einen großen Einfluss auf die tektonischen Platten der Erde – inklusive der Bildung von Rodinia. Die Hypothese beruht auf einer früheren Studie von Keller. Demnach zeigen Schwerfeldkarten, dass die Arme des Grabenbruchs viel weiter in den Süden reichen, als man dachte – bis zum Rand von Laurentia, dem Vorläufer des nordamerikanischen Kontinents. Anderen Studien zufolge berührten sich Laurentia und Amazonia, einer der Vorläufer des südamerikanischen Kontinents, vor mehr als einer Milliarde Jahren. Getrennt haben sie sich vermutlich zu jener Zeit, als das Midcontinent Rift aktiv wurde [3]. Stein schlägt ein dreiarmiges Grabenbruchsystem vor, bestehend aus dem Midcontinent Rift und den beiden Armen, die [Laurentia](#) und Amazonia trennen.

»Wenn Kontinente auseinanderbrechen, scheint es vielerorts drei Arme zu geben, wobei ein Arm lahmgelagert wird und

die beiden anderen Arme einen neuen Ozean bilden«, erklärt die Forscherin. »Es wirkt schon weitaus weniger geheimnisvoll als noch vor einem Jahr. Wir hielten das Midcontinent Rift damals für eine sonderbare Struktur, die ihren Anfang inmitten des Kontinents nahm und dort auch wieder zur Ruhe kam.« Im Zusammenhang mit den Grabenbrüchen am Rande von Laurentia, fügt sie hinzu, ergibt es aber plötzlich einen Sinn. Stein vergleicht das urzeitliche System mit dem, was heute am östlichen Rand von Afrika geschieht. Zwei Arme eines Grabenbruchs im Golf von Aden und im Roten Meer treiben die arabische Halbinsel von Afrika weg, während sich ein dritter Arm in Afrika bildet. Wenn dieser ostafrikanische Grabenbruch nicht weiter anwächst und schließlich erstarrt, würde er laut Stein dem nordamerikanischen Midcontinent Rift ähneln.

Ihre Hypothese weckte das Interesse von anderen Experten. »Es ist eine sehr plausible Theorie«, so [Stephen Marshak von der University of Illinois](#) in Urbana-Champaign. Dennoch müssten seiner Ansicht nach entsprechende Tests folgen. Der Geologe und auch andere Wissenschaftler stimmen aber zu, dass das Verständnis des



PALISADE HEAD
Lavaströme der North-Shore-Volcanics-
esteinsformation: Das Bild zeigt Palisade
Head im Vordergrund vor Shovel Point. Beide
bestehen aus rhyolithischen Gesteinen des
Midcontinent Rift.

Midcontinent Rift auch einen Einblick in den ostafrikanischen Grabenbruch bieten kann – was ihn antreibt und wie er sich in der Zukunft entwickelt. »Beide beeinflussen sich gegenseitig«, ergänzt er.

Heißes Gestein

Wissenschaftler wollen den Grabenbruch aber nicht nur verstehen, sondern ihn auch als ein Fenster in die Vergangenheit nutzen. Geschützt in der beständigen Mitte Nordamerikas, blieben die Lavaströme des Grabenbruchs seit einer Milliarde Jahren unversehrt – eine Seltenheit für derart altes Gestein. Mancherorts lassen sich noch kleine Wellen im Basalt erkennen, die sich ausgebildeten als die Lava abkühlte. »Es ist einfach fantastisch«, sagt der Geologe [Nicholas Swanson-Hysell von der University of California](#) in Berkeley. »Es ist ziemlich erstaunlich, wie gut diese Ströme erhalten sind. Würde man sich die Oberfläche eines Lavafeldes auf Hawaii anschauen, das 1950 entstand, könnte man kaum einen Unterschied zu dieser 1,1 Milliarden Jahre alten Oberfläche feststellen.«

Die exzellent erhaltenen Lavaströme lassen sich besonders gut im Gebiet des Mamainse Points am östlichen Ufer des

Lake Superior beobachten. Zehn Kilometer entlang der Küstenlinie untersuchte Swanson-Hysell hier insgesamt 95 solcher Ströme. Die einzelnen Lavaströme messen wenige bis hin zu 20 Meter und sind Teil einer 4,5 Kilometer dicken Gesteinsformation. Letztere bildete sich während der aktivsten 15 Millionen Jahre in der Geschichte des Grabenbruchs, dessen gesamte Lebensdauer rund 30 Millionen Jahre betrug.

Als die Lava abkühlte, speicherte das ferromagnetische Gestein die Ausrichtung des Erdmagnetfelds zu jener Zeit. Mit Hilfe dieser winzigen eingefrorenen Kompassen lässt sich nachvollziehen, wie Laurentia im Lauf der Grabenbruchbildung rund um den Globus wanderte. Swanson-Hysell rekonstruierte aus den Mamainse-Strömen das frühere Erdmagnetfeld und fand Hinweise darauf, dass Laurentia womöglich schneller driftete als jede zuvor vermessene Platte [4]. Seine jüngsten Schätzungen, die er bei der GSA-Konferenz vorstellte, gehen von einer Geschwindigkeit zwischen 16 und 45 Zentimeter pro Jahr aus. Zum Vergleich: Die zweitschnellste bekannte Plattenbewegung brachte es nur auf 18 Zentimeter pro Jahr – vor 50 bis 60 Millionen Jahren bewegte sich Indien mit diesem Tempo auf Asien zu.

»Diese Geschwindigkeit hielt man für sehr schnell und nahe dem maximal möglichen Wert für die Kontinentaldrift«, berichtet Swanson-Hysell. Die meisten Platten bewegen sich heute nur rund vier bis neun Zentimeter pro Jahr. Bislang lässt sich die Geschwindigkeit für Laurentia nur recht ungenau angeben, künftig will Swanson-Hysell den möglichen Wertebereich aber weiter einschränken.

Das exakte Tempo dieses Kontinents zu kennen, wäre sehr wichtig für die Forscher. Denn es wäre eine große Hilfe dabei, die Bewegung aller Landmassen der Erde zum Zeitpunkt der Grabenbruchbildung zu rekonstruieren. Swanson-Hysell zufolge wäre es denkbar, dass die außergewöhnlich hohe Geschwindigkeit mehr als nur Laurentias Drift widerspiegelt. Ein Teil der Bewegung könnte durch eine so genannte [echte Polwanderung](#) verursacht worden sein: Die gesamte Erdkruste und der Erdmantel drehen sich gemeinsam um den Erdkern. Auftreten würde das Phänomen, wenn ein extrem dichter Materieklopfen im Erdmantel gen Äquator wandert und dabei Kruste und Mantel mitreißt.

Wenn tatsächlich eine solche echte Polwanderung stattfand, wäre das ein Indiz

dafür, dass »etwas Bedeutendes im Inneren der Erde geschieht«, so Swanson-Hysell. Doch selbst wenn nicht, fährt er fort, könnte die hohe Geschwindigkeit von Laurentia vielleicht erkennen lassen, was die Bewegung der tektonischen Platten zu jener Zeit antrieb. Die Wahrheit könnte eine Kombination der beiden Varianten sein. Um dies zu testen, möchte Swanson-Hysell ähnliche Messungen an Gesteinsproben von anderen Kontinenten durchführen. Zeugen sie von derselben schnellen Drift, wäre bewiesen, dass alle Platten gemeinsam wanderten – ein Hinweis auf eine echte Polwanderung. Gut erhaltenes Gestein aus dieser Ära zu finden, ist allerdings keine leichte Aufgabe.

Im Interstate State Park beginnt es derweil zu nieseln und die Menschenmassen strömen zurück zu ihren Autos. Die Regentropfen schwärzen den Basalt, verleihen ihm so kurzzeitig das Antlitz eines frischen Lavastroms. Gleich wird die Gegend menschenleer sein, nur die Felsen bleiben zurück – und mit ihnen die Geschichte, die Geologen gerade erst zu verstehen beginnen. ↪

(Spektrum.de, 2. Januar 2014)

Spektrum
der Wissenschaft
KOMPAKT

ERDBEBEN UND VULKANE

Unsere unruhige Erde

- Das Zeitalter der Megabeben
- Notfallplanung am Vesuv
- Der Einfluss des Klimawandels

FÜR NUR
€ 4,99

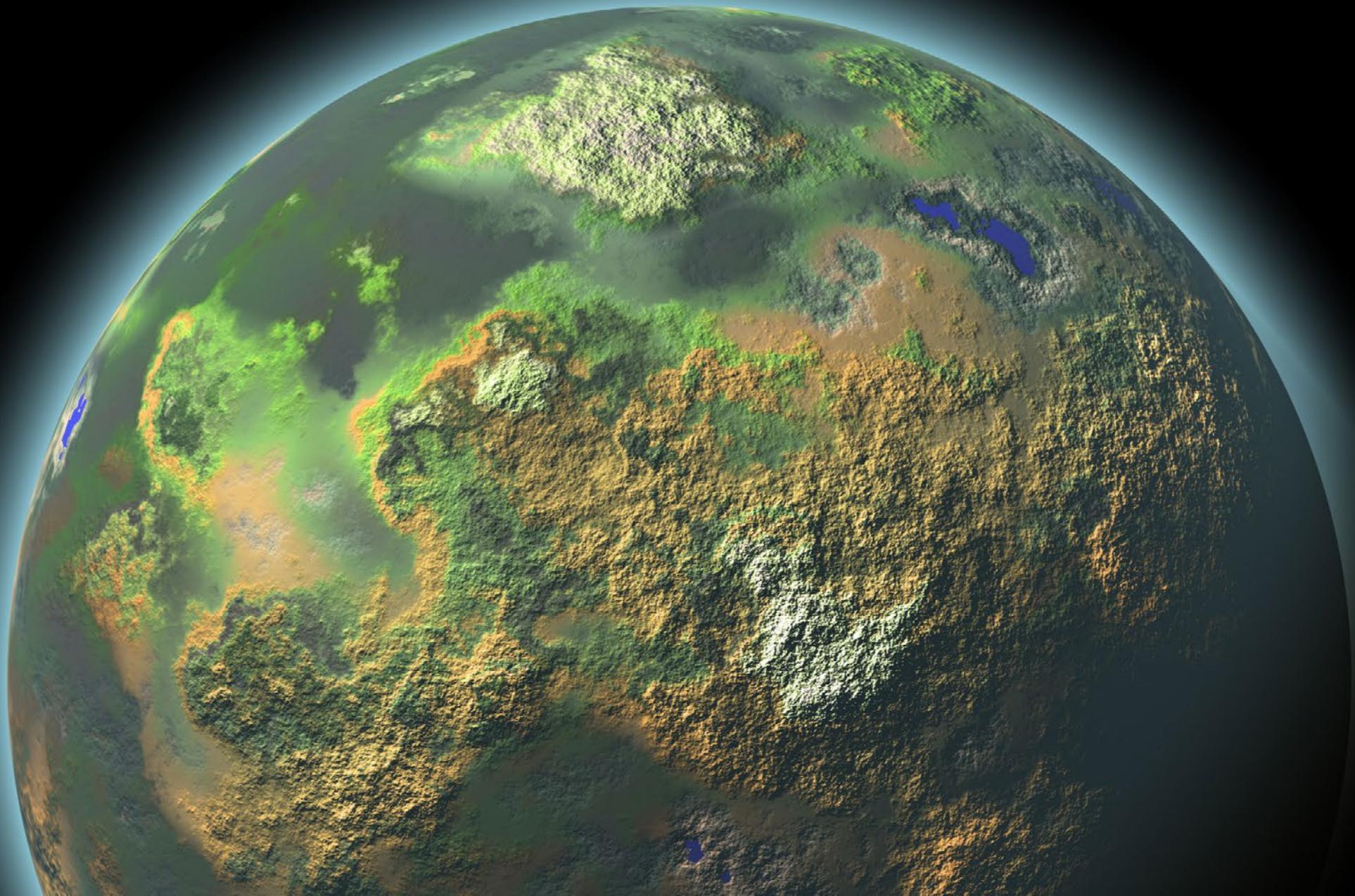
HIER DOWNLOADEN

PLATTENSTEKTONIK

Vom Werden und Vergehen der **SUPERKONTINENTE**

von Daniel Lingenhöhl

In spätestens 200 Millionen Jahren kommt es zum großen kontinentalen Zusammenstoß. Die Frage ist nur: wo? Und wie trennen sich die Platten wieder? Wissenschaftler suchen nach Antworten in den Weiten des Südatlantiks und im Innern der Gesteine.



Tristan da Cunha: Wenige Orte der Erde liegen abseitiger als dieses Eiland im südlichen Atlantik. Mehr als 2500 Kilometer entfernt von ihren nächsten Nachbarn leben hier 300 Briten von Fischfang und Landwirtschaft für die Selbstversorgung, zusammen mit Millionen Seevögeln, Seeelefanten und Seebären. Nur einmal im Jahr kommt routinemäßig ein Fracht- und Passagierboot an diesem Flecken Land vorbei, um Güter oder Besucher anzuliefern – den Rest der Zeit sind die Insulaner abhängig von Fischern aus Südafrika oder wissenschaftlichen Expeditionen, die sich der Geologie der Region widmen.

Denn so unbedeutend Tristan da Cunha heute auf der Weltkarte zu sein scheint: Einst könnten Vorläufer der knapp 100 Quadratkilometer großen Vulkaninsel einen ganzen Superkontinent zertrümmert haben. »Die Entstehung des Tristan-Archipels hängt eng mit dem Auseinanderbrechen von Gondwana vor 120 Millionen Jahren zusammen«, erklärt Marion Jegen vom GEOMAR in Kiel, die momentan auf einer Forschungsfahrt die genaue Rolle des Feuerbergs erkunden will. Nach einer gängi-

gen Theorie ragt Tristan da Cunha über einem vulkanischen Hotspot auf: einer Schwachstelle in der Erdkruste, an der fernab von Plattengrenzen heißes Gesteinsmaterial bis an die Oberfläche aufsteigen kann und Vulkane bildet.

Ursächlich für diese ungewöhnlichen Vulkane – zu denen beispielsweise auch die Hawaii-Inseln gehören – ist besonders heißes Magma im Mantel, das aus sehr tiefen Schichten der Erde stammt und womöglich sogar aus der Grenzregion zum Erdkern nach oben wandert. Dabei treten starke Konvektionsströmungen in der zähflüssigen Gesteinsschmelze des Mantels auf, die wegen ihrer Bewegungsrichtung an darüberliegenden Kontinenten oder dem Meeresboden zerren und das Gestein dehnen und strecken. Im Extremfall werden die Platten, die sich gerade über dem Hotspot befinden, auseinandergerissen.

Als der Tristan-Hotspot einst aufkam, schmolz er wohl direkt den riesigen Südkontinent Gondwana von unten an. Die Platte wurde in diesem Bereich großräumig erhitzt, thermisch emporgetrieben und langsam immer stärker ausgedünnt. Am Ende riss die Erdkruste auf, Magma trat aus und bildete neuen Meeresboden im

entstehenden Graben. Dieser senkte sich zudem ab, bis er vom jungen Südatlantik geflutet wurde – ein Prozess, wie er aktuell auch am Horn von Afrika abläuft, wo sich entlang des Rift Valleys Ostafrika vom Rest des Kontinents abspaltet. Der Tristan-Hotspot spielte also womöglich eine entscheidende Rolle als Schneidbrenner bei der Geburt von Afrika und Südamerika, doch müsste er tatsächlich erst einmal zweifelsfrei als solcher festgestellt werden, so Jegen: »Tristan da Cunha speist sich womöglich aus einer flacheren Quelle, dann wäre der Archipel die Folge der Spaltung und nicht dessen Ursache. Diese Frage wollen wir klären, denn die Region ist für das generelle Verständnis der Plattentektonik von hoher Bedeutung.«

Wenn Kontinente umpolen

Unabhängig vom Einfluss der südatlantischen Magmablase war die Aufteilung Gondwanas ohnehin nur ein weiterer Schritt in der Zersplitterung von Pangäa: Noch vor 250 Millionen Jahren hatte dieser Superkontinent praktisch die gesamte Landmasse der Erde in sich vereinigt, was laut dem so genannten Wilson-Zyklus (er beschreibt die Abfolge charakteristischer

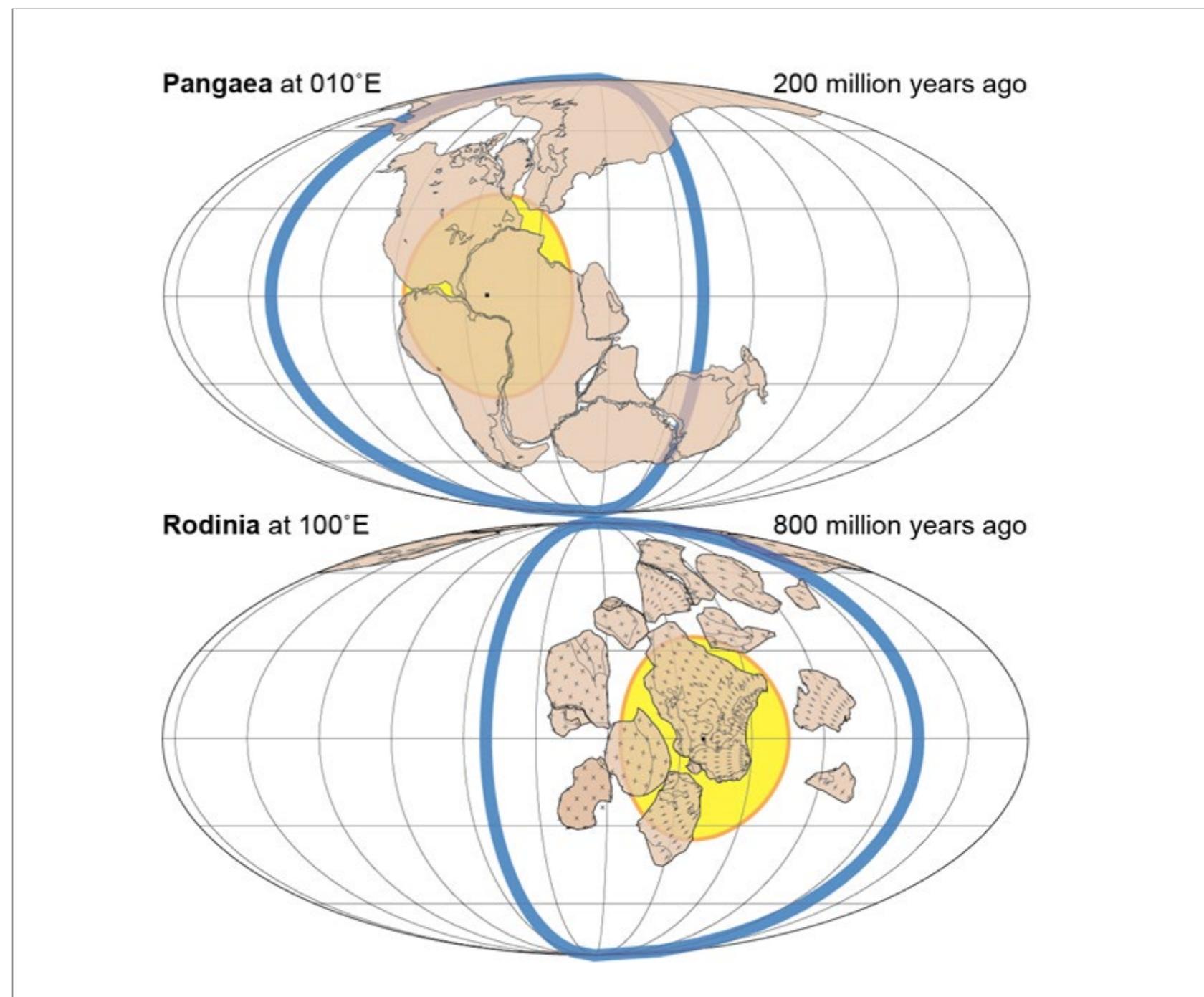


TRISTAN DA CUNHA

An dieser kleinen Insel zerbrach einst womöglich ein riesiger Kontinent. Denn unter Tristan da Cunha befindet sich wahrscheinlich ein riesiger magmatischer Hotspot, der Gondwana auftrennte.

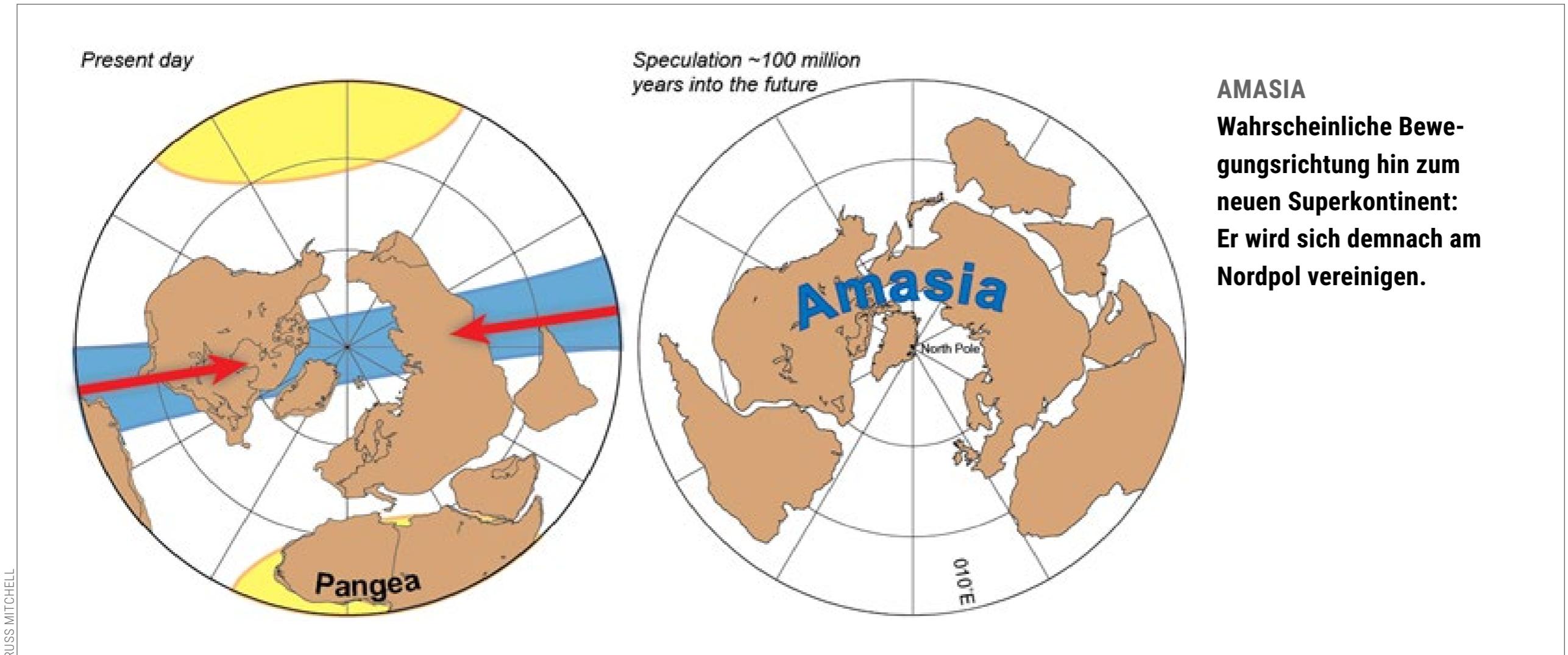
Phasen in der Entwicklung von Kontinenten und Ozeanen) einer Ruhepause in der Plattentektonik entspricht. Sie hatte zuvor alle festländischen Bruchstücke durch Kollisionen miteinander verschmolzen und Gebirge aufgetürmt. »Ein derartiger Superkontinent bildet sich über absteigenden Hitzeströmungen im Erdmantel«, erklärt Ross Mitchell von der Yale University in New Haven: »Anschließend polt er allerdings die Konvektion im globalen Maßstab um, so dass unter den Landmassen ein Auftrieb entsteht.« Und dieser zerreißt später die Superkontinente wieder, der Zyklus beginnt erneut.

Lange vor Gondwana war dies bereits in der Nordhälfte von Pangäa der Fall, als sich der Nordatlantik bildete und Nordamerika von Eurasien trennte. Immer mehr Magma stieg in diesem Graben an die Oberfläche und errichtete langsam einen mittelozeanischen Rücken, an dem austretende Lava immer neue Kruste schafft, die die Kontinente weiter und weiter auseinanderdrückt. Dieses Förderband läuft auch heute noch; wie ein sich öffnender Reißverschluss zieht sich der Mittelatlantikrücken vom Nord- bis ins Südpolarmeer und entfernt die Alte und die Neue Welt jeden Tag



PANGÄA UND RODINIA

Lage der früheren Superkontinente Pangäa und Rodinia. Blau eingezeichnet ist der ringförmige Gürtel von Subduktionszonen, wie sie heute den Pazifik einrahmen. Gelb markiert die Zentren der jeweiligen Superkontinentvorläufer.



ein Stückchen mehr voneinander. Doch wohin führt die Reise? Vereinigen sich die Kontinente eines Tages wieder zu einer einzigen großen Landmasse? Die Antwort lautet: Ja, solange die rohen Kräfte im Erdinneren wirken und über ihre Konvektionsströme die Platten hin und her treiben. Offen bleibt nur, wo dieser Zusammenschluss stattfindet. »Bislang geht man von zwei möglichen Szenarien aus, nach denen

die Kontinente an jeweils unterschiedlichen Stellen neu zusammenfinden«, sagt Mitchell.

Nach dem Introversionsmodell erlahmt irgendwann die magmatische Aktivität unter dem Mittelatlantischen Rücken, und der noch relativ junge Atlantik spreizt sich nicht mehr weiter. Stattdessen kehrt sich die Plattenbewegung wieder um, Alte und Neue Welt nähern sich an und raufen sich

dereinst wieder zu einem neuen alten Superkontinent zusammen – der relativ genau dort liegt, wo sich einst Pangäa erstreckte. Sein Zentrum läge folglich ungefähr im Herzen Afrikas. Diese Version konkurriert mit dem Extroversionsmodell: »Der relativ alte Pazifik verschwindet in diesem Fall in den Subduktionszonen an seinen Rändern. Dadurch soll sich der nächste Superkontinent genau auf der an-

deren Seite der Erdkugel etwa auf der Höhe von Hawaii oder den Fidschiinseln formieren«, so Mitchell.

Die Zukunft liegt am Nordpol

Doch Ross Mitchell und seine Kollegen sind von diesen beiden Entwicklungsmöglichkeiten nicht überzeugt: »Wir plädieren für einen dritten Weg: die Orthoversion. Jeder neue Superkontinent bildet sich demnach im 90-Grad-Winkel zum Mittelpunkt seines Vorgängers.« Dazu analysierten die Geologen zahlreiche Gesteinsproben, in denen das Erdmagnetfeld charakteristische Spuren in der Ausrichtung magnetischer Minerale hinterlassen hatte, während die ursprüngliche Schmelze abkühlte. Während jeder einzelne der vergangenen Superkontinente insgesamt relativ starr auf seiner Position verharrte und sich nur in einem engen Rahmen vor- und zurückbewegte, drehte sich die Megalandmasse sehr stark. »Pangäa liegt in einem 90-Grad-Winkel zu seinem Vorläufer Rodinia und dieser in einem 90-Grad-Winkel zu seinem Vorgänger Nuna«, sagt Ross.

Sollte sich dieses Modell bestätigen, ist der Weg zum nächsten Superkontinent vorgezeichnet: »Dann schließen sich weder

Pazifik noch Atlantik, sondern es verschwinden das Nordpolarmeer und die Karibik, wenn sich die Kontinente annähern. Das vereinte Amerika trifft Eurasien am Nordpol.« Das letzte Stündlein hat dann auch für das Mittelmeer geschlagen, denn Afrika drängt von Süden nach Europa und wird den neuen Superkontinent verstärken. Etwas länger dauert es dagegen, bis auch Australien und vielleicht sogar die Antarktis hinzustoßen. Immerhin: Die Reise des fünften Kontinents von Gondwana nach Osten fand schon ein Ende. Seit einigen Millionen Jahren hat Australien seinen Weg nach Norden ausgerichtet und driftet beschleunigt gen Asien.

Wann die große Zusammenkunft der Landmassen stattfindet, muss vorerst noch offenbleiben. »Das geschieht erst in der fernen Zukunft, irgendwann in 50 bis 200 Millionen Jahren«, meint Mitchell. Der Name des Superkontinents steht hingegen schon fest: Amasia – als Erinnerung an seine Gründungsmitglieder Amerika und Asien. ↗

(Spektrum.de, 8. Februar 2012)

Mitchell, R. et al.: Supercontinent cycles and the calculation of absolute palaeolongitude in deep time.

In: Nature 482, S. 208-212, 2012.

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT



HOCHGEBIRGE

Lebensraum am Limit

Historische Linguistik | Sprachenvielfalt der Anden

Glaziologie | Trotzt der Karakorum dem Klimawandel?

Das Erdbeben von Nepal | Im geologischen Fadenkreuz

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR
€ 4,99



PHLEGRAISCHE FELDER

Europas Supervulkan

kann ohne Vorwarnung explodieren

von Lars Fischer

Untersuchungen an den Phlegräischen Feldern zeigen:
Der Druck in der Magmakammer kann vor Eruptionen viel
kurzfristiger ansteigen als bisher gedacht.

An den Phlegräischen Feldern nahe Neapel, Europas einzigem Supervulkan, herrscht Unruhe. Seit 1950 hob sich dort der Boden schubweise um mehrere Meter, begleitet von Erdbeben. In den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts mussten wegen dauernder Erschütterungen die 40 000 Einwohner von Pozzuoli für Monate ihre Heimat verlassen: Man fürchtete einen Vulkanausbruch vergleichbar jenem von 1538, bei dem der 133 Meter hohe Monte Nuovo entstand.

Eine Arbeitsgruppe um Michael Stock von der University of Oxford hat jetzt eine gute und eine schlechte Nachricht für die Bevölkerung der Region. [Ihrer Analyse nach sind solche Erdbeben und Hebungen, anders als bisher vermutet, wohl kein Indiz für eine baldige Eruption](#). Allerdings kommen sie zu dem Schluss, dass die Phlegräischen Felder unter Umständen nur mit

sehr geringer Vorwarnzeit oder gar völlig überraschend ausbrechen.

Wann perlen die Fluide aus?

Hinter solchen Eruptionen stehen vulkanische Fluide – Gase wie Wasser und Kohlenstoffdioxid, die im Gestein gelöst sein können oder als Gasblasen im Magma vorliegen. Wenn sich im Lauf der Zeit genug an Fluiden gesättigtes, blasenhaltiges Magma ansammelt, steigt der Druck so weit, dass die gesammelten Gasblasen den Vulkanschlot aufsprengen. Bisher gingen Fachleute meist davon aus, dass das ein langsamer Prozess ist: Das Magma samt Fluiden sammelt sich über Jahrhunderte an, bis das Gestein darüber unter dem hohen Druck beginnt, sich zu verformen und zu rumpeln. Dann steht der Ausbruch bevor.

Stock und seine internationale Arbeitsgruppe schlagen einen anderen Mechanismus vor. Demnach steigt der Druck in der Magmakammer nicht langsam an, bis ein

kritischer Wert überschritten ist. Vielmehr fehlen, so ihr Befund, Gasblasen über lange Zeit völlig – das Magma ist nicht mit Fluiden gesättigt. Erst sehr kurz vor der Eruption perlt plötzlich Gas aus und erhöht den Druck bis zum Brechen des Deckgestein.

Einen solchen Ablauf jedenfalls legen die Überreste eines Ausbruchs vor 4000 Jahren nahe. Aus den Ascheschichten sammelten die Forscher das Mineral Apatit, das flüchtige Stoffe in seine Kristallstruktur einbaut und deswegen detaillierte Informationen über den Zustand des Magmas während der Kristallisation bewahrt. Im Gegensatz dazu stehen winzige Einschlüsse von Schmelze innerhalb wachsender Kristalle – sie tauschen auch nach ihrer Umschließung Stoffe mit der Magmakammer aus.

Diese beiden Sachverhalte reichen, um herauszufinden, wann in der Schmelze die ersten Gasblasen entstanden – das geschah exakt an dem Punkt, an dem die Schmelze



RADARBILDAUFNAHME VON NEAPEL UND UMGEBUNG

Die Metropolregion Neapel gehört zu den geologisch am stärksten gefährdeten Gebieten Europas: In unmittelbarer Nachbarschaft ragt der Vesuv auf, der in der Vergangenheit bereits verheerend ausgebrochen ist. Und Teile des Stadtgebiets liegen auch in der Caldera der Phlegräischen Felder – eines Supervulkans, von dem nicht bekannt ist, ob er schon endgültig einschläft oder langsam wieder erwacht.

mit Fluiden übersättigt war. Nach dem klassischen Modell sollten bereits lange vor der Eruption Teile des Magmas an Fluid übersättigt sein. Der entstehende Druck erzeugt dann Erdbeben und andere Warnzeichen. Doch das ist nicht das, was Stock und sein Team fanden.

Plötzlich übersättigt

Vielmehr gab es zwar Apatite, die aus einer an Fluiden übersättigten Schmelze entstanden, jedoch keine solchen Schmelzeinschlüsse. Demnach war die Schmelze nicht lange genug übersättigt, um eine nennenswerte Menge entsprechender Einschlüsse zu erzeugen. Doch ihr Fehlen verrate noch mehr, schreibt das Team: Demnach war die Zeitspanne zwischen dem Entstehen der allerersten Gasblasen zu kurz, als dass sich die Zusammensetzung der Einschlüsse durch Diffusion an die Magmakammer hätte anpassen können.

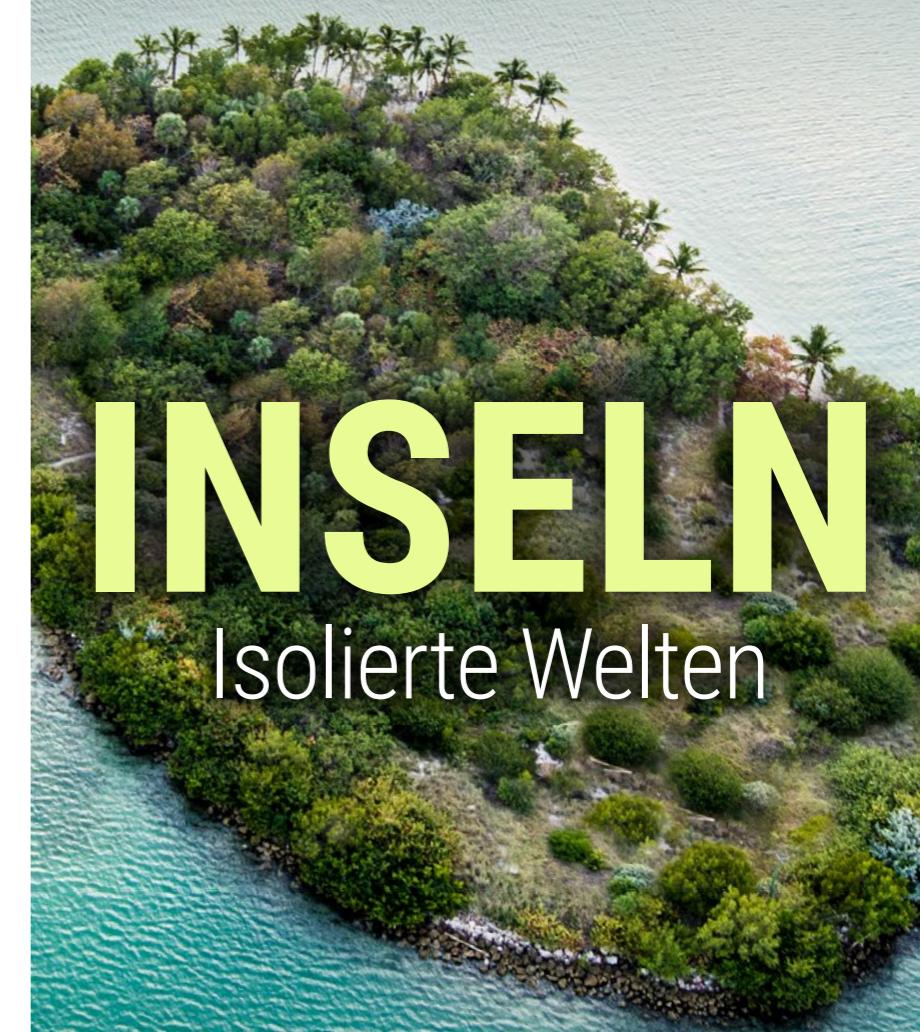
Viele leichte Moleküle und Ionen wandern nämlich, auch nachdem der Einschluss völlig von der Außenwelt abgetrennt ist, durch den umgebenden Kristall nach außen. Das aber dauert eine Weile – unter den Bedingungen einer Magmakammer einige Tage bis Wochen. Da keine Ein-

schlüsse gefunden wurden, die auf fluidübersättigtes Magma hindeuten, muss sich die Magmakammer nach dem Entstehen der ersten Blasen binnen dieser Zeitspanne geleert haben.

In so einem Fall käme die Eruption sehr plötzlich, denn nach diesem Mechanismus haben Erdbeben Schwärme und Bodenhebungen mit der Eruption selbst nichts zu tun – sie spielen sich auf längeren Zeitskalen ab. Stattdessen empfehlen Stock und seine Arbeitsgruppe, vulkanische Gase auf kurzfristige Änderungen zu untersuchen. Die nämlich würden deutlich anzeigen, wenn die Magmakammer anfängt, Blasen zu werfen. Ein paar Tage hätte man dann wohl noch. ↪

(Spektrum.de, 4. Februar 2016)

Spektrum
der Wissenschaft
KOMPAKT



INSELN

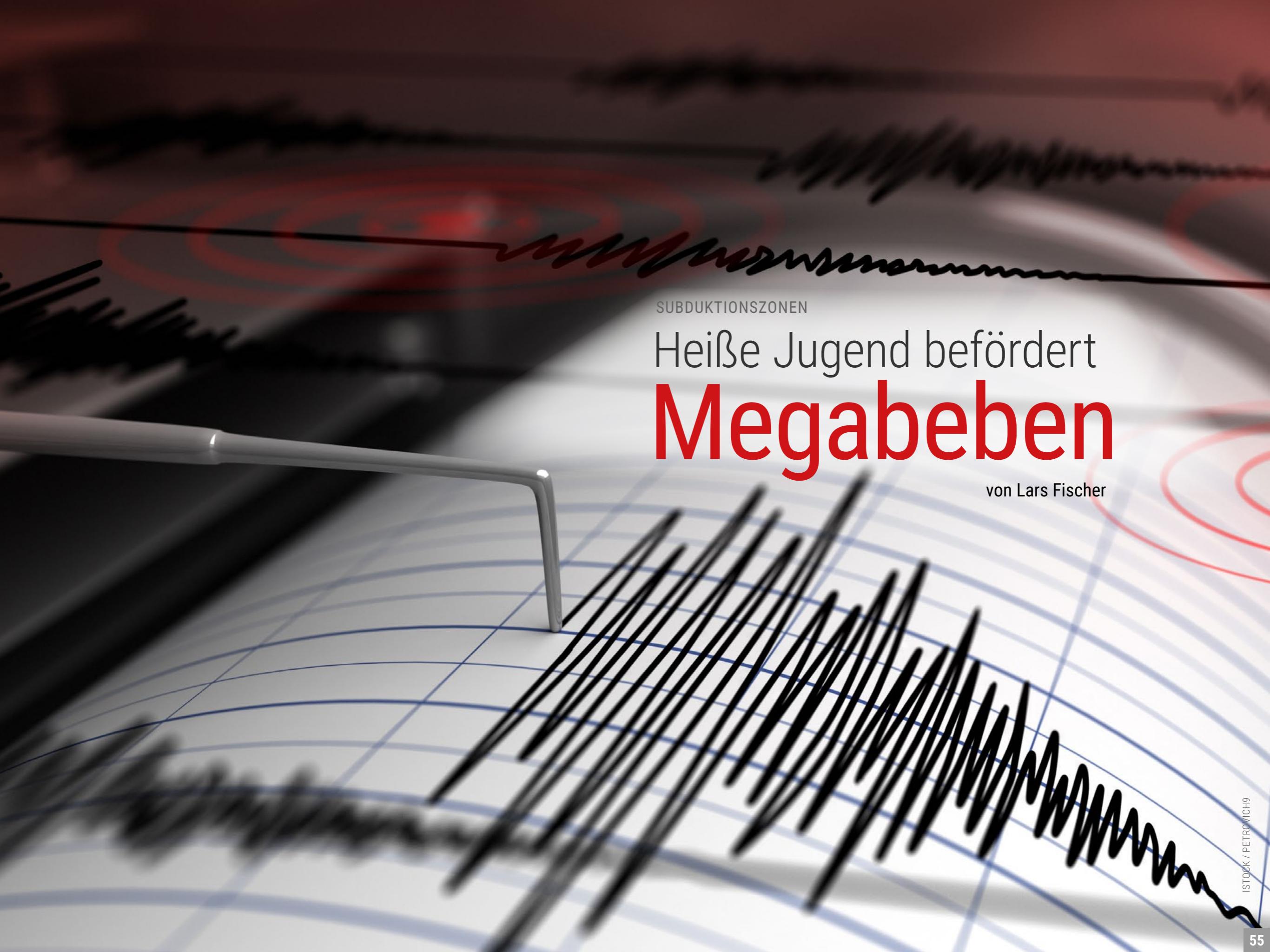
Isolierte Welten

Geophysik | Hotspots entfesselt
Osterinsel | Das Rätsel von Rapa Nui
Kartografie | Die Geisterinseln

ISTOCK/ANDRESIMAGING

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR
€ 4,99



SUBDUKTIONZONEN

Heiße Jugend befördert
Megabeben

von Lars Fischer

Warum bebt die Erde in bestimmten Gebieten besonders stark? Möglicherweise ist die geringere Dichte junger Erdplatten verantwortlich.

Die stärksten Erdbeben der Welt spielen sich dort ab, wo Erdplatten sich gegenseitig überfahren: in den Subduktionszonen. Doch nicht alle Subduktionszonen haben das gleiche Potenzial für schwere Erdstöße. Manche Regionen, zum Beispiel vor Chile, erzeugen regelmäßig extrem energiereiche Beben, andere Bereiche dagegen sind seismisch nachgerade harmlos. Und wie stark ein Beben in einer gegebenen Region maximal werden kann, ist beileibe keine rein akademische Frage – von der Antwort hängen im Ernstfall tausende Menschenleben ab.

Bisher galt ein direkter Zusammenhang zwischen maximaler Bebenstärke und der Geschwindigkeit der untertauchenden Erdplatte als wahrscheinlich. Das klingt zunächst einleuchtend: Je schneller sich die Platte bewegt, desto mehr Druck kann sich in relativ kurzer Zeit aufbauen, während bei langsamerer Plattenbewegung die

Wahrscheinlichkeit steigt, dass ein Teil der Spannung schon in kleineren Beben oder gar durch Gleitbewegungen verschwindet.

Doch diese simple Argumentation scheint nicht auszureichen. Ausgerechnet einige der stärksten und folgenschwersten Beben tanzen aus der Reihe. Das Sumatra-Beben von 2004 war nach dem bisherigen Verständnis viel zu stark. Auch das Tohoku-Oki-Beben von 2011 überraschte die Forschung. Im Gespräch sind deswegen verschiedene andere Effekte, die möglicherweise Einfluss auf die Energien der Megabeben haben. So zum Beispiel Ausmaß und Struktur der Sedimente an der Kontaktzone beider Platten oder auch Tiefseeberge, die die Reibung zwischen den Platten erhöhen.

Am wahrscheinlichsten jedoch scheint eine andere Möglichkeit: Schon lange vermuten Forscher, dass das Alter der untertauchenden Platte eine Rolle spielt – und zwar weil die ozeanische Kruste im Lauf der Zeit kühler und dichter wird. Die junge,

noch warme Kruste hat zusätzlichen Auftrieb, so dass sie nur langsam abtaucht und an der überfahrenden Platte entlangkratzt. Eine alte Platte dagegen ist kalt und schwer und sinkt aus eigenem Antrieb in den Erdmantel. Nach dieser Theorie erzeugt eine solche Situation eine Dehnungsregion, in der schwache Beben vorherrschen.

Tomoaki Nishikawa und Satoshi Ide von der Universität Tokio haben nun gezeigt, dass dieser thermische Auftrieb, auf Englisch die »slab buoyancy«, wohl der wichtigste Einzelfaktor für den Spannungszustand einer Subduktionszone ist. Dazu bestimmten sie für insgesamt 80 Regionen mit aktiver Subduktion die so genannten *b*-Werte, die man erhält, wenn man Häufigkeit und Stärke von Erdbeben gegeneinander aufträgt und von einer solchen Darstellung die Steigung bestimmt. Aus Experimenten im Labor weiß man: je niedriger der *b*-Wert, desto höher die Spannung – und desto stärker auch die maximal möglichen Erdbeben.

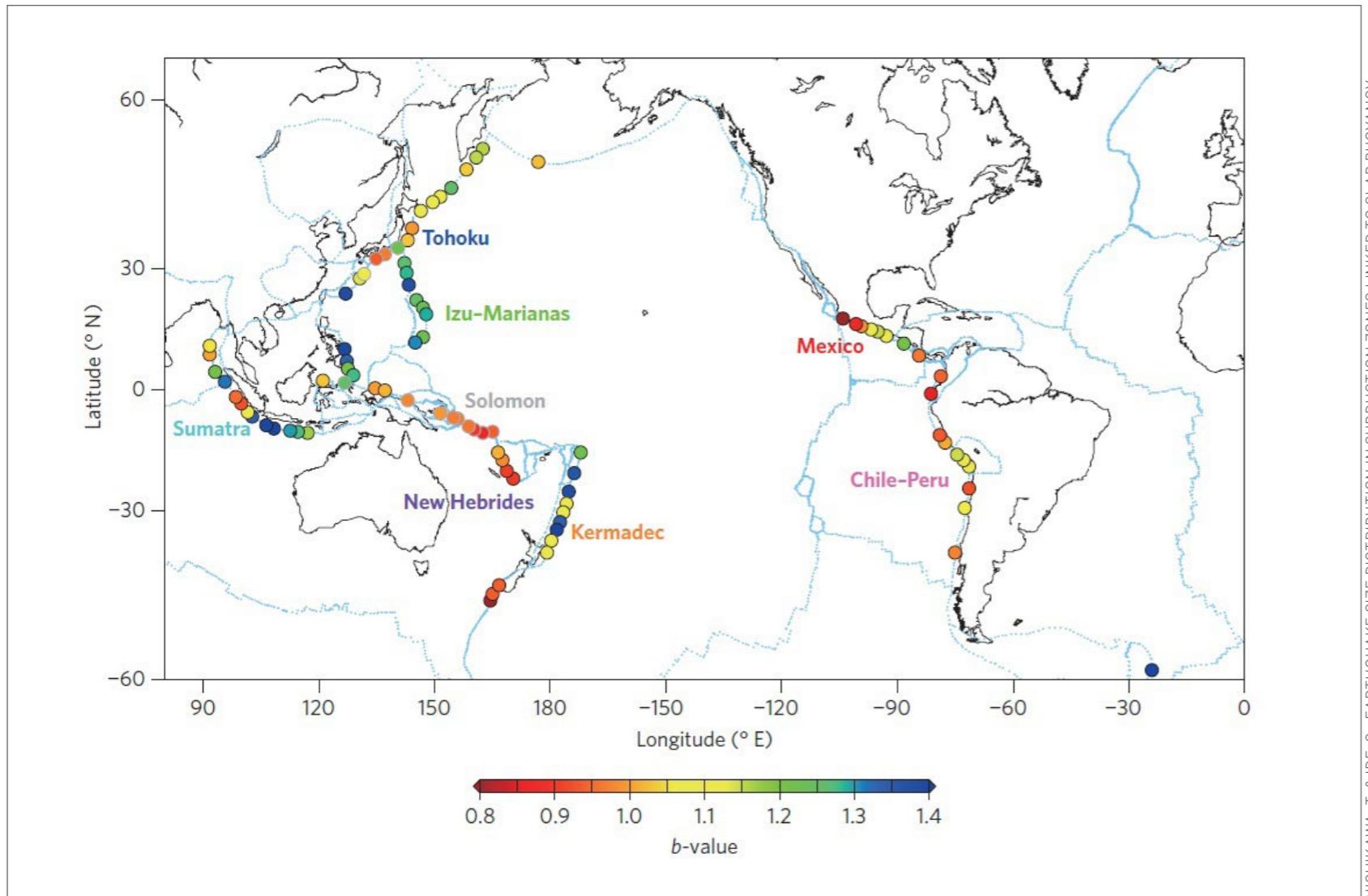


Wie Nishikawa und Ide herausfanden, sind Plattengeschwindigkeiten ein schlechter Indikator für Stresszustände. Bessere Übereinstimmungen fanden sie dagegen zum Plattenalter sowie der Tiefe des vorgelegerten Tiefseegrabens – beides Indikatoren für eine wichtige Rolle der Gesteinsdichte und damit des Alters. Besonders eindeutig ist der Zusammenhang bei Platten, die jünger sind als 80 Millionen Jahre. Die Forscher vermuten, dass nach diesem Zeitraum die Platte nur noch sehr langsam abkühlt.

Allerdings passt auch dieses neue Schema nicht wirklich gut zu den irregulären Beben von 2004 und 2011 – die b -Werte für diese beiden Regionen erwiesen sich nach den Daten als ungewöhnlich niedrig und widersprachen dem generellen Trend. Die beiden Forscher spekulieren nun, dass sich

ERDBEBENSCHÄDEN

Besonders gefährdet sind Menschen in Erdbebenrisikogebieten, in denen Armut und Korruption verhindern, dass Bauwerke nach neuesten Sicherheitsstandards gebaut werden. Hier sterben deshalb wesentlich mehr Menschen unter einstürzenden Gebäuden als in entwickelten Ländern mit geringer Korruption.



diese Erkenntnisse nutzen lassen, um sehr starke Beben vorherzusagen: Wenn der b-Wert einer Subduktionszone wesentlich niedriger ist, als man nach Plattenalter und Grabentiefe erwarten sollte, sei die Verwerfung möglicherweise reif für eine schwere Erschütterung. Vielleicht zeigen derartige Komplikationen aber auch einfach, wie weit der Weg zum Verständnis der stärksten Erdbeben in Wirklichkeit noch ist. ↪

B-WERTE DER SUBDUKTIONSZONEN

IM PAZIFIK

Niedrige b-Werte zeigen hohe Spannungen an – und damit das Potenzial für starke Erdbeben. Die Forscher konnten zeigen, dass beide eng mit dem Alter der abtauchenden Platte zusammenhängen.

(Spektrum.de, 3. November 2014)

Nature Geoscience 10.1038/NGEO2279, 2014

Der ganze Kosmos:
Auf Ihrem Bildschirm.



DAS STERNE UND WELTRAUM **DIGITALABO**

Erfahren Sie alles über Astronomie und Raumfahrt – direkt aus den Forschungslaboren der Welt. Jahrespreis (12 x im Jahr) € 60,–; ermäßigt (auf Nachweis) € 48,–

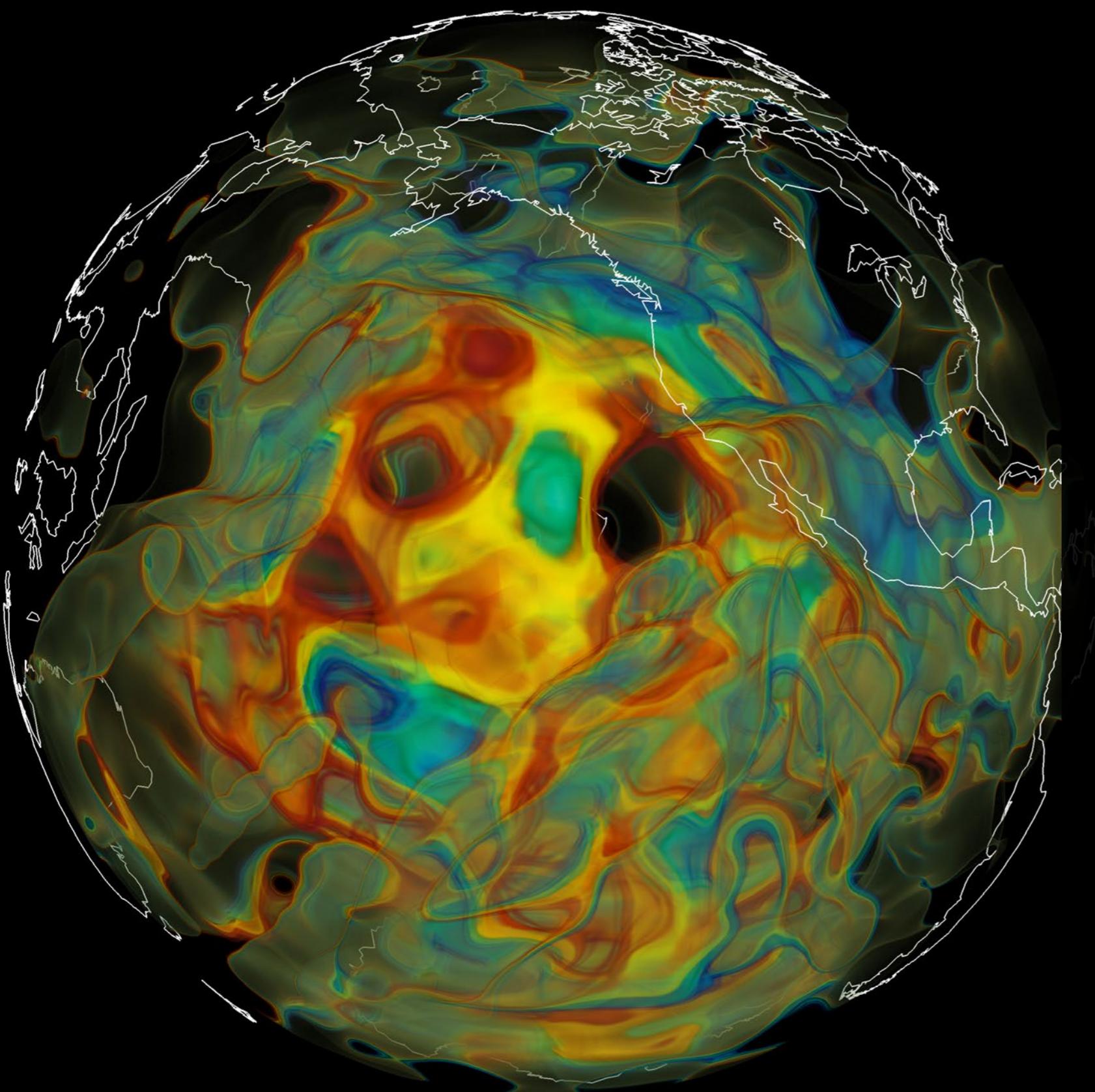
HIER ABONNIEREN



BILDGALERIE

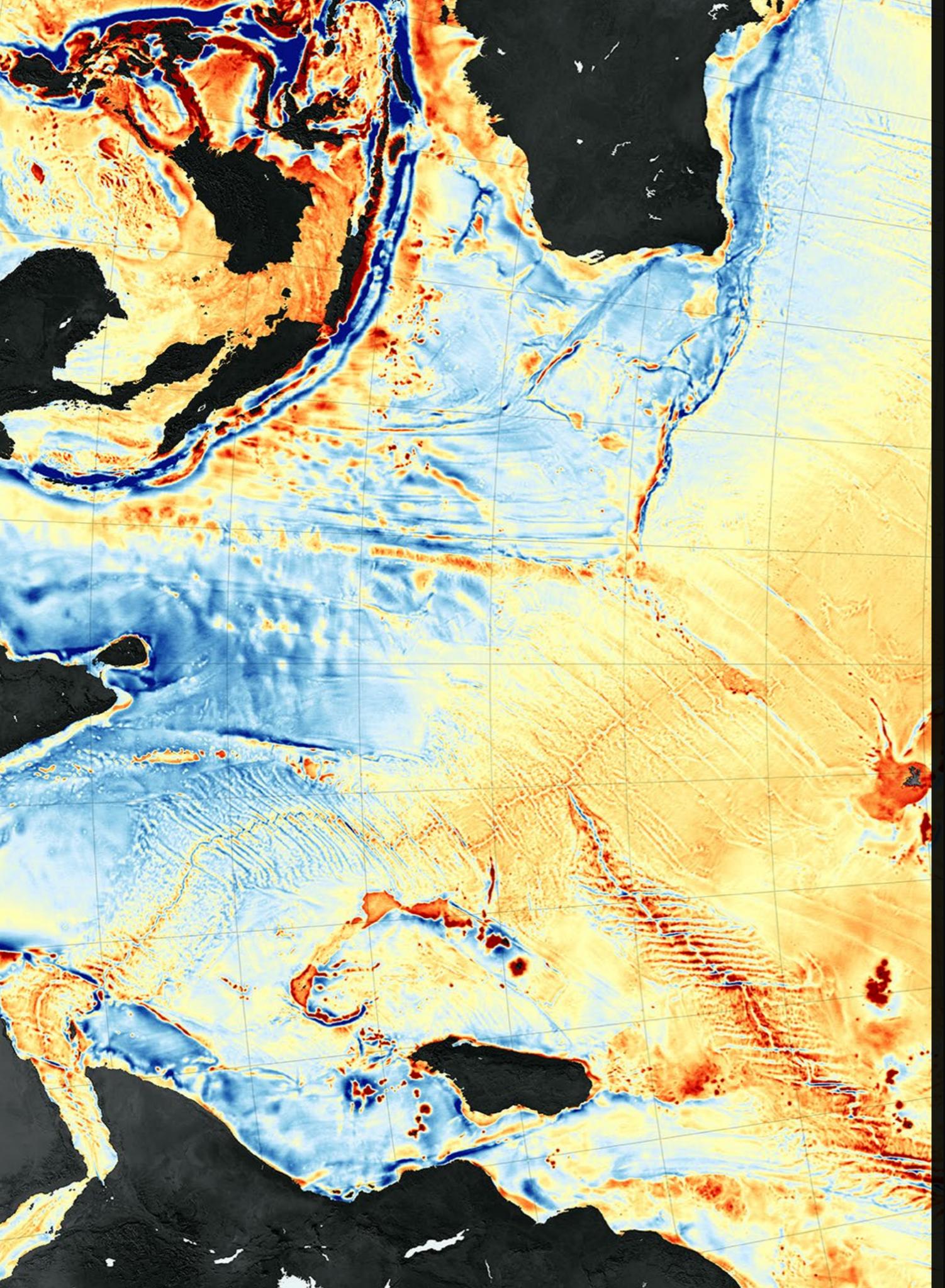
Blick in die Tiefe

Der direkte Blick auf den Ozeanboden oder das Innere der Erde ist uns meist verwehrt. Mit Hilfe technischer Verfahren gelingt es Forschern dennoch, ihre Untersuchungsobjekte spektakulär zu präsentieren.



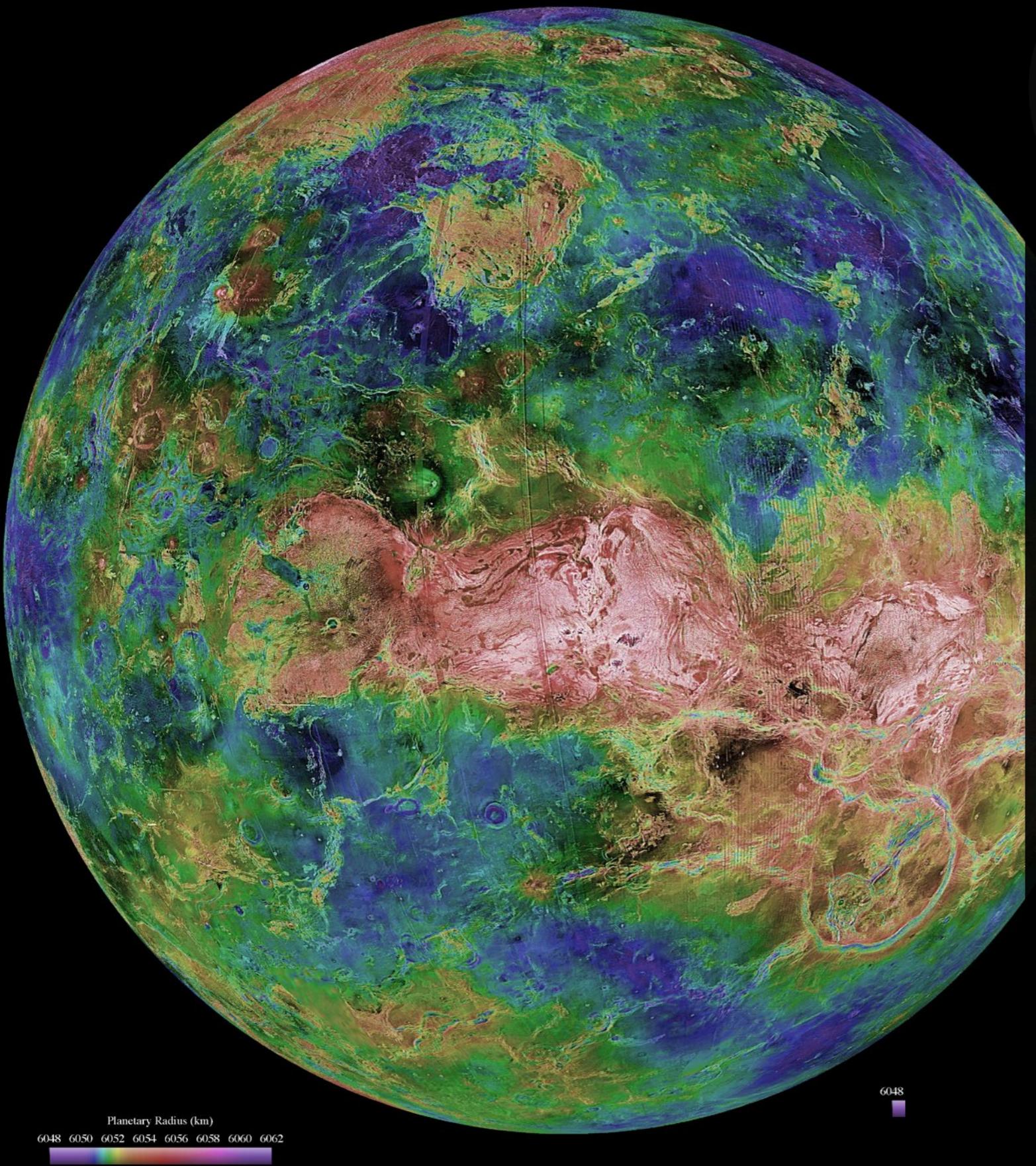
DIE REISE DER WELLEN

Erdbeben entstehen zumeist an Plattengrenzen, und ihre Erschütterungen breiten sich anschließend rasend schnell aus. Doch die Geschwindigkeit ist nicht überall im Inneren der Erde gleich – und das nutzen Forscher um den Geophysiker Jeroen Tromp von der Princeton University, um den Aufbau unseres Planeten besser zu verstehen und zu kartieren. Am Ende soll eine dreidimensionale Karte des Erdmantels stehen, mit der man Dichteunterschiede, Schwächezonen und mineralogische Zusammensetzungen nachvollziehen kann. Wie diese Computersimulation für den Mantel unter dem Pazifik zeigt, unterscheidet es sich regional deutlich, wie schnell sich seismische Wellen ausbreiten: An Subduktionszonen, an denen Platten unter andere Krustenstücke tauchen, setzen sie sich schneller (blau und grün) fort als innerhalb der Platten (rot und orange). Am Ende ließe sich damit vielleicht auch eher vorhersagen, wo genau Starkbeben drohen.



TIEFSEEBODEN IM INDISCHEN OZEAN

Der Grund der Meere ist auch heute noch überwiegend *Terra incognita* – das Wasser verbirgt den Blick in bis zu 11 000 Metern Tiefe. Doch zunehmend schärfen Satellitendaten unsere Karten vom Boden der Ozeane. Mit Hilfe von CryoSat-2 der ESA und Jason-1 der NASA ermittelten beispielsweise David Sandwell von der Scripps Institution of Oceanography und seine Kollegen die abweichenden Werte der Schwerkraft in der Tiefsee, die von Gesteinsdichten, Tiefen und Alter des Untergrunds abhängen: Die feinen Sensoren der beiden Satelliten zeichnen so erhöhte Gravitation an ozeanischen Rücken, unterseeischen Vulkanen und am Rand kontinentaler Platten auf (rot), während alte Tiefseegräben und -böden die Instrumente schwächer anziehen (blau). Und diese Daten bringen nun die Erforschung der Erdgeschichte voran, wie die dadurch neu entdeckte **Mammerickx-Mikroplatte** im Indischen Ozean belegt: Sie befindet sich ein Stück nordöstlich der so genannten Triple Junction, an der sich drei Teile des Indischen Rückens treffen. Mit ihr lässt sich der Beginn der Kollision zwischen Indischer und Eurasatischer Platte auf die Zeit vor 47 Millionen Jahren exakt terminieren. Als sich die beiden Kontinente trafen, bremste dies die sich relativ schnell bewegende Indische Platte aus und zwang sie, ihre Richtung zu ändern. Durch die Drehbewegung hobelte die Platte an ihrer Südgrenze ein kleines Stück der Antarktischen Platte ab, das seitdem zwischen beiden eingeklemmt, verformt und bewegt wird. »Mikroplatten entstehen normalerweise nicht an mittelozeanischen Rücken, auch wenn diese in der Nähe liegen, sondern bilden sich nur beim Crash von Kontinenten«, so Sandwell.



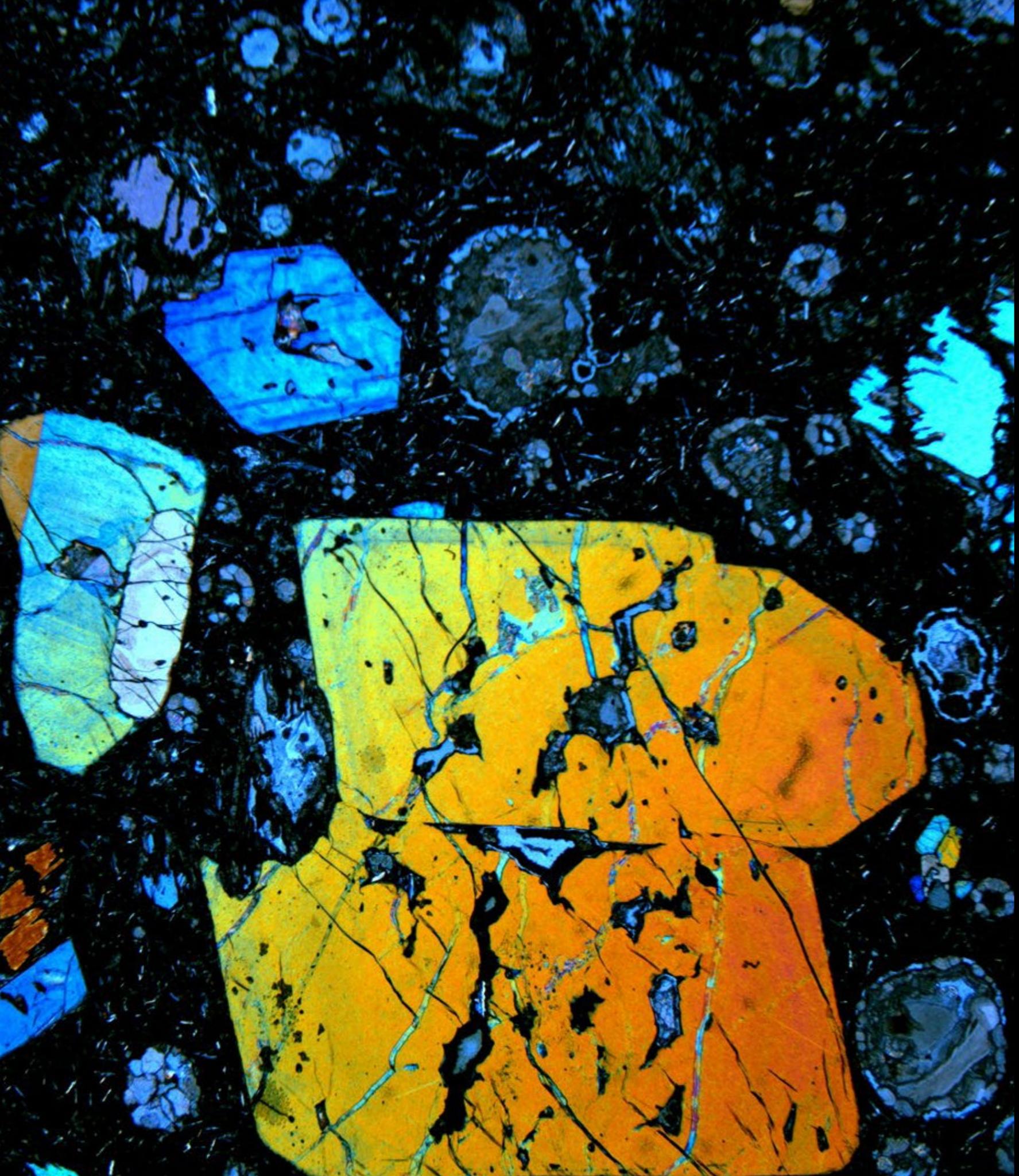
OBERFLÄCHE DER VENUS

Die über Jahrmillionen im Glutofen gebackene Oberfläche der Venus lehrt möglicherweise, zukunftsweisende Prozesse auf der frühen Erde zu entschlüsseln. Gemeint ist die Plattentektonik, jenes System aus gegeneinanderdriftenden Krustenabschnitten, dem unser Planet seine reichlichen Vulkane und jungen Gebirge verdankt – und ohne das die Erde wohl längst kein Leben mehr trüge. Fachleute streiten sich seit Jahren um die Frage, wie dieses System einst entstand. Ein Schweizer Forschungsteam will nun eine Antwort gefunden haben – auf der Venus und im Computer. Die Oberfläche unseres Nachbarplaneten nämlich sieht möglicherweise immer noch so aus wie jene der Erde, bevor die Plattentektonik begann. Das Team um Taras Gerya von der ETH Zürich bemerkte auf der Oberfläche ringförmige Strukturen, so genannte Coronae. Doch sie sind keine Krater, sondern entstanden nach Ansicht des Wissenschaftlers, als aufsteigende Finger heißen Materials, so genannte Mantelplumes, einst die Kruste von unten her ausdünnten. Geryas Computersimulationen deuten nun darauf hin, dass es eine Phase in der Geschichte der Erde gab, in der solche Strukturen die Plattentektonik in Schwung bringen konnten. Vor etwa drei Milliarden Jahren war die Kruste gerade so kalt und dicht, dass sie an einer solchen Corona zerrissen und in den heißen, leichten Mantel hinabgesunken wäre – die erste Subduktionszone, die Keimzelle der Erdplatten.



VULKAN TAMBORA

Wer sich über einen angeblich schlechten Sommer beschwert, sollte einen Blick zurück auf 1816 werfen – denn das war das »Jahr ohne Sommer«. Schuld daran war ein Vulkanausbruch, der über zwölf Monate zuvor stattgefunden hatte: Im April 1815 war der Tambora auf der indonesischen Insel Sumbawa explodiert, eine der heftigsten, bekannten Eruptionen während der letzten 25 000 Jahre. Der Feuerberg tötete mehrere zehntausend Menschen direkt, doch die Gesamtzahl der Opfer war noch viel größer. Durch die gewaltigen Mengen an ausgeworfenen Aschen und Gasen wurde die Atmosphäre verdunkelt, **was das Klima weltweit beeinflusste**. In Deutschland und weiten Teilen Europas gehörten die Sommermonate zu den kältesten der letzten Jahrhunderte; zudem sorgten ausdauernde Regenfälle für starke Überflutungen. Die Ernte fiel in den betroffenen Regionen gering oder ganz aus beziehungsweise war von schlechter Qualität – europaweite Hungersnöte waren die Folge. Sie trafen eine ohnehin schon durch Kriege und Missernten geschwächte Bevölkerung. Wie viele Menschen daran starben, lässt sich nicht beziffern.



GESTEINSDÜNNSCHLIFF MIT EINSCHLÜSSEN

In einem stark vereinfachten Kreislauf der Gesteine tauchen Erdplatten an Subduktionszonen ab, das Material wird im Mantel aufgeschmolzen, vermischt und kommt an- dernorts wieder zu Tage. Trotz der Durchmis- chung ist der Erdmantel in seiner chemi- schen und Isotopenzusammensetzung aber heterogen, woraus Forscher ableiten, dass die geochemischen Unterschiede der Erd- kruste von ozeanischen und kontinentalen Platten in einem gewissen Maße erhalten bleiben. Wie lange sich diese Eigenheiten erhalten, ist bislang allerdings unklar. In der Basaltlava der zu den südpazifischen Cook- Inseln gehörenden Mangaia-Insel sind For- scher um Rita Cabral von der Boston Univer- sity nun auf Spuren gestoßen, die offenbar von der ursprünglich aufgeschmolzenen Platte stammen. Anhand der Schwefelisoto- pe in winzigen Kristalleinschlüssen ermit- telten die Forscher, dass diese Rückstände zu Gesteinen gehörten, die vor über 2,45 Milliarden Jahren abgetaucht sein müssen – die Lava, mit der sie wieder an die Oberflä- che kamen, ist dagegen nur 20 Millionen Jahre alt.

Nature 496, S. 490-493, 2013