



Die Geburtsstätte des Lebens liegt, so vermuten Forscher, am Grund des Meeres – an den heißen Quellen der Tiefsee. Diese Quellen entstehen an den Verschiebungszonen der Erdplatten, dort, wo Seewasser in die aufgeheizte Erdkruste sickert. Das erhitze Wasser löst Mineralien aus der ozeanischen Kruste, steigt wieder auf und entlässt seine reiche Fracht in den Ozean – stetiger Nachschub an anorganischen Verbindungen für jene Organismen, die hier in völliger Dunkelheit leben und

schien ihnen die Vorstellung, dass die Kontinente einmal verbunden gewesen und dann auseinander gedriftet sein sollten. Doch, so fragte sich Wegener, warum sonst ließe sich die Ausbuchtung des südamerikanischen Kontinents so wunderbar einpassen in die Einbuchtung des afrikanischen und würden Fossilien des Mesosaur nur im Osten Südamerikas und im Westen Afrikas gefunden und nirgendwo sonst? Um mehr Anhänger für seine Theorie zu gewinnen, fehlte dem

Wo die Erde aus den Fugen gerät – Forschen am Grund des Ozeans

ihre Energie für den Aufbau von Kohlenhydraten aus der Oxidation dieser Verbindungen gewinnen. Hunderte neuer Spezies von Würmern, Weichtieren und Gliederfüßern haben Forscher mithilfe bemannter und unbemannter Tauchboote an diesen **Hydrothermalquellen** gesammelt – eine vollkommen neuartige Unterwasserwelt: „*Nothing could diminish the excitement of seeing the animals for the first time*“, schrieb ein Teilnehmer der ersten Expedition dieser Art 1978 zum Galápagosgraben.

BEWEGTE ERDE

Der Galápagosgraben ist ein Tiefseegraben im Pazifischen Ozean. Er trennt zwei kleinere tektonische Platten voneinander – die Kokos- und die Nazcaplatte (**Abb. B**). Mit einer Geschwindigkeit von wenigen Zentimetern pro Jahr treiben sogenannte Konvektionsströme die beiden Platten auseinander. Diese Wärmewalzen halten die Kruste unseres Planeten in ständiger Bewegung. Als der deutsche Meteorologe Alfred Wegener 1912 erstmals seine Theorie der **Kontinentalverschiebung** formulierte, reagierten die Fachleute allerdings nur mit Kopfschütteln – zu abwegig

Deutschen aber eine überzeugende Erklärung, wie die riesigen Kontinentalplatten in Bewegung versetzt werden.

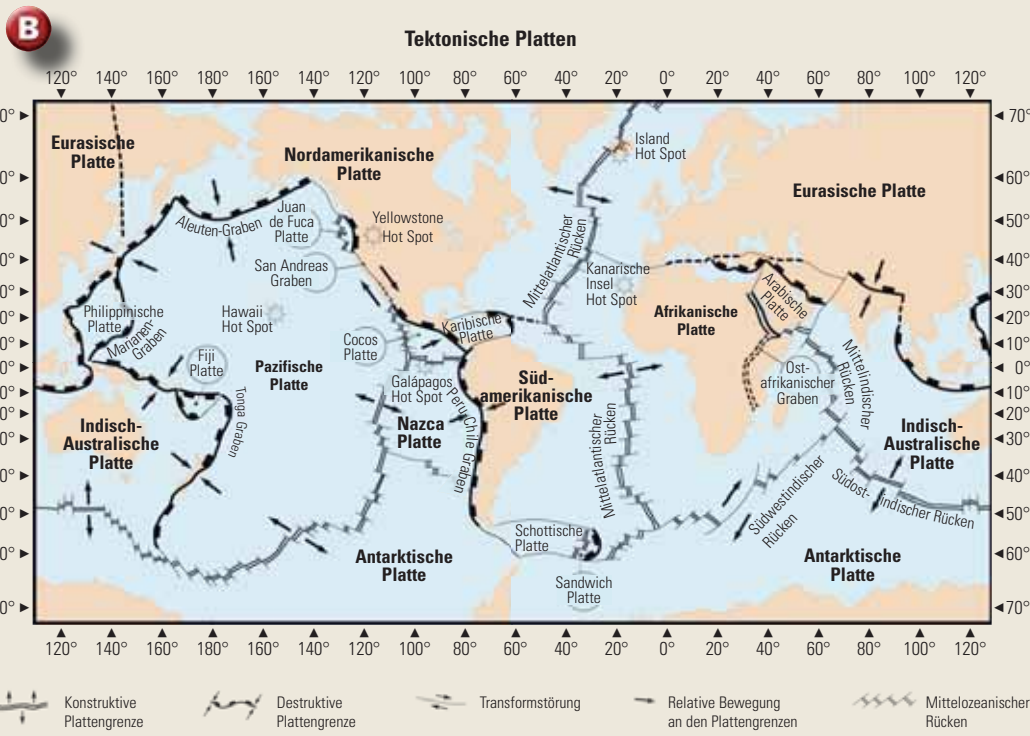
1929 schlug der Engländer Arthur Holmes einen möglichen Mechanismus vor: Wenn sich Gesteinsmaterial tief im Erdmantel erhitzt, reduziert sich seine Dichte und es steigt zur Oberfläche auf, wo es abkühlt und absinkt, nur um wieder aufgeheizt zu werden und wieder aufzusteigen. Dieser Konvektionsstrom aufge-



► Darstellung eines „Black Smokers“, einer heißen Quelle, aus der typischerweise eine schwefelhaltige mineralreiche Flüssigkeit auströmt, die mehrere hundert Grad Celsius heiß sein kann. Einige der gelösten Mineralien werden ausgefällt und türmen sich dann zu einem Schlot rund um die Quelle auf. Solche Tiefseeschlote sind Lebensraum für Bakterien, von denen sich wiederum Würmer, Weichtiere, Krebse und Fische ernähren.

A





◀ Die Erdkruste (Lithosphäre) ist in sieben große und mehrere kleine Platten zerbrochen. An den mittelozeanischen Rücken driften benachbarte Platten auseinander (divergierende oder konstruktive Plattengrenze), Magma quillt hier aus dem Erdmantel empor und bildet neue ozeanische Kruste. In den Tiefseegräben sinkt die Kruste wieder in den Mantel ab und wird „verschluckt“ (subduziert). Die Kontinentalblöcke werden wie auf einem Fließband von den Spreizungszonen weg beziehungsweise zu den Subduktionszonen hin geschoben. Nur eine Kollision mit einer anderen Kontinentalplatte kann diese Bewegung aufhalten (konvergierende oder destruktive Plattengrenze). Dabei werden die Lithosphärenschichten gestaucht und hunderte von Kilometern übereinander geschoben. Das führt dann zur Auffaltung hoher Gebirgszüge.

© verändert nach Earth Science Reference Tables – 2001 Edition (überarbeitet im November 2006)

→ heizten Gesteins im Mantel unter der Erdkruste könnte die erforderliche Treibkraft für die Verschiebung der Kontinente bereitstellen. Bei seinen Überlegungen machte sich Holmes die Erkenntnisse von Seismologen zunutze. Schon 1890 hatte der englische Geologe John Milne, der an der Kaiserlichen Technischen Universität in Tokio unterrichtete, zusammen mit Kollegen den ersten präzisen Seismografen für die Aufzeichnung von Erdbeben entwickelt. Die Forscher erkannten jedoch bald, dass sich mit diesem Instrument auch das mysteriöse Innere unseres Planeten erkunden ließ. Aus dem Verhalten seismischer Wellen schlossen sie, dass die Erde aus konzentrischen Schichten zusammengesetzt ist: einem inneren Kern, von dem man seinerzeit nicht wusste, ob er fest oder flüssig war, und einer Zwischenschicht aus dichtem Gestein, dem Erdmantel, der sich ungefähr 50 Kilometer unterhalb der äußersten Oberfläche, der Erdkruste, befindet.

Doch es blieb schwer, Beweise für den von Holmes vorgeschlagenen Mechanismus zu finden. Erst die kriegsbedingte Verbesserung von Echolot- und Sonartechnik für die U-Boot-Aufklärung ermöglichte weitere Fortschritte auf diesem Gebiet. Ein Sonargerät kann durch das Aussenden von Schallwellen und das Auffangen des Echos, das vom Meeresboden zurückgeworfen wird, die Entfernung zwischen einem Schiff und dem Meeresboden bestimmen. Forscher der Columbia Universität führten damit zahlreiche Tiefmessungen im Atlantischen Ozean durch und begannen auf der

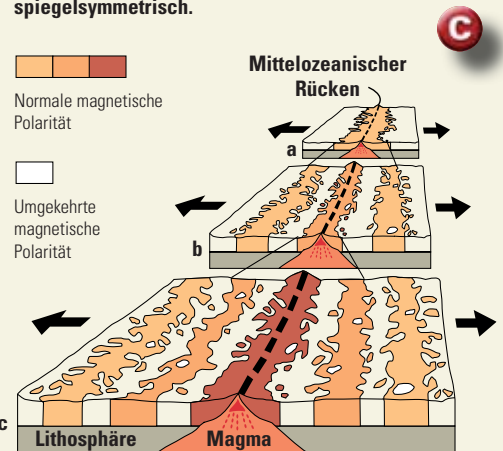
Basis dieser Messungen ein Profil des Meeresbodens zu erstellen. Was die 1959 von den beiden amerikanischen Ozeanografen Bruce Heezen und Maurice Ewing veröffentlichte Karte schließlich zeigte, war eine Gebirgskette unter dem Meer von ungeahntem Ausmaß: über eine Länge von 14.000 Kilometern zieht sich 1.500 bis 3.000 Meter unter der Wasseroberfläche ein Gebirgskamm entlang mit einem Zentralgraben, der bis zu 3000 Meter tief sowie 20 bis 50 Kilometer breit ist und somit bequem den Grand Canyon beherbergen könnte. Er ist Teil eines vulkanischen Gebirgsystems, das eine Gesamtlänge von 75.000 Kilometern besitzt und sich wie die Naht eines Tennisballs um die Erdkugel windet (Abb. B), vom Arktischen Ozean zum Atlantik, um Afrika, Asien und Australien, durch den Pazifischen Ozean und zur Westküste von Nordamerika: die **mittelozeanischen Rücken**. Wie mochte diese Formation entstanden sein?

NEUER OZEANBODEN ENTSTEHT

In seiner Veröffentlichung „Die Entstehung der Ozeanbecken“ wagte sich der Geologe Harry Hess von der Universität Princeton an eine neue Interpretation der geologischen Befunde. Forscher hatten zu diesem Zeitpunkt ihre Ansichten über die innerste Struktur der Erde verfeinert: Sie gingen nun von einem festen inneren Eisenkern aus, der außen flüssig war. Ihn umgab ein Mantel, der wiederum von der äußeren dünnen ozeanischen und der dicken kontinentalen Kruste überzogen war. Hess nahm an, dass die Erdkruste aus eisen-

armen Gestein bestand, das zur Oberfläche gestiegen war, nachdem radioaktiver Verfall im Inneren des neu verdichteten Planeten das Gestein erhitzt und geschmolzen hatte. Diese Kruste hatte einmal eine einzige kontinentale Landmasse gebildet. Die kontinuierlich stattfindende Aufheizung im Inneren des Planeten würde eine Konvektionsschleife mit sich hebendem und senkendem Material im

▼ Wenn die Lithosphärenplatten auseinanderdriften, steigt Magma an die Oberfläche, verfestigt sich und zeichnet dabei gleichzeitig das vorherrschende Magnetfeld auf. Das neu geformte Krustengestein wird gleichsam an die Platten „angeschweißt“ und von der Spreizungszone weggezogen. Alle paar hunderttausend Jahre kehrt sich das Magnetfeld um und damit auch die magnetische Polarisierung des Ozeanbodens. Die Streifen spiegeln die zeitliche Abfolge der Feldumkehrungen wider. Da die Gesteinsblöcke parallel von beiden Seiten des Spreizungsgrabens weggetragen werden, ist das Streifenmuster spiegelsymmetrisch.



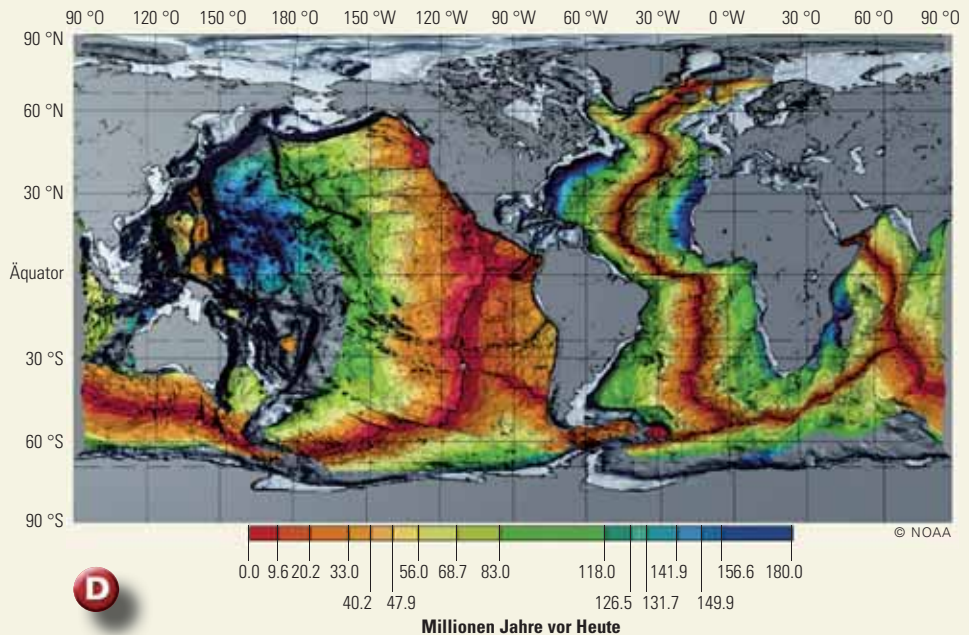
© United States Geological Survey

Mantel bilden, so wie es Arthur Holmes 1929 bereits vorgeschlagen hatte. Hess folgte nun weiter, dass sich die **Mantelkonvektion** in zahlreiche separat zirkulierende Schleifen, die vom Kern ausgehen, aufgeteilt hätte. Wo die Ströme zur Oberfläche aufsteigen, tritt geschmolzenes Material aus, was die mittelozeanischen Rücken aufbaut und neue ozeanische Kruste formt. Wo die Konvektionsströme absteigen, stürzt abgekühlte ältere ozeanische Kruste an den tiefen Ozeanrändern in den Mantel zurück. Der Meeresboden breitet sich also aus und verlagert sich dabei gleichzeitig (engl. *seafloor spreading*).

Die magnetische Vermessung der Unterwassergrate Anfang der 1960er-Jahre sollte endlich Belege für dieses Konzept liefern. Seit 1929 war den Forschern bekannt, dass sich das Magnetfeld der Erde alle paar hunderttausend Jahre umkehrt. Gestein aus verschiedenen geologischen Zeitabschnitten kann daher gegensätzliche **magnetische Polarisierung** aufweisen. Denn neu geformtes Krustengestein zeichnet die Stärke und Orientierung des Erdmagnetfeldes zum Zeitpunkt seiner Formation auf: In geschmolzenem oder sehr heißem Gestein richten sich die magnetischen Partikel zufällig aus; wenn das Gestein jedoch erkaltet, dann orientieren sie sich am Magnetfeld der Erde – die Partikel werden in dieser Position quasi arretiert; auch wenn das **Erdmagnetfeld** sich verändert, bleibt die Ausrichtung der Partikel erhalten. In den Gesteinsschichten war die Orientierung daher entweder „normal“ und zeigte nach Norden, so wie heute, oder das geomagnetische Feld war umgekehrt.

MAGNETBÄNDER ABGESPEICHERT

Auf dem Meeresboden traten diese Umkehrungen jedoch nicht in verschiedenen senkrecht übereinander liegenden, sondern in nebeneinander liegenden Schichten auf. Unter dem Gesichtspunkt des Magnetismus betrachtet sind die Gesteine auf dem Meeresboden also „gestreift“. 1963 veröffentlichten die beiden englischen Geophysiker Fred Vine und Drummond Matthews in der Fachzeitschrift NATURE dazu folgende Hypothese: Wenn der Meeresgrund die Orientierung des Erdmagnetfeldes zum Zeitpunkt des Austritts von frisch geschmolzenem Gestein aus dem Erdmantel festgehalten hatte und eine Verschiebung des Meeresbodens stattfand, wie Harry Hess vorgeschlagen hatte, dann sollten die Gesteinsblöcke von abwechselnd normal und umgekehrt magnetisiertem Material parallel von beiden Seiten des Grates weggetragen werden. Tatsächlich zeigten sich die

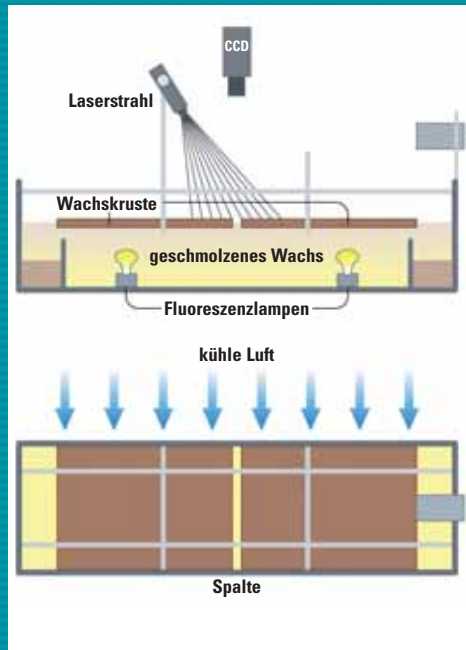


Umpolungen als Streifenmuster normalen und umgekehrt gepolten Materials spiegelsymmetrisch auf beiden Seiten der Unterwassergrate (**Abb. C**). Altersbestimmungen der Ozeansedimente bestätigten dann, dass die jüngsten Streifen im Senkungsgraben liegen, während man in weiterer Entfernung vom Graben auf älteres Gestein trifft (**Abb. D**).

Die Streifen von „normalem“ und umgekehrt magnetisiertem Gestein am Meeresboden zusammen mit dem Konzept des **„Seafloor-Spreading“** und der ermittelten Zeitabfolge der Magnetfeldumkehrungen waren der Schlüssel zum Verständnis der Kontinentaldrift: Wenn an den mittelozeanischen Rücken durch periodisch aufsteigendes Magma neuer Meeresboden entsteht, wird ältere ozeanische Kruste nach außen gedrängt. Wie auf einem Fließband bewegt sich die Meereskruste dabei in Richtung Tiefseegräben, wird kalt und schwer und taucht schließlich an den Plattenrändern wieder in den Erdmantel ab. Diesen Vorgang bezeichnen die Wissenschaftler als **Subduktion**. Jahr für Jahr werden etwa 20 Kubikkilometer neuer ozeanischer Erdkruste gebildet (das entspricht etwa 90 Prozent der globalen Magmenproduktion), die entlang der mittelozeanischen Rücken an die Platten „angeschweißt“ wird und diese dabei auseinander schiebt. Auf Island, das auf dem mittelatlantischen Rücken liegt, kann man den Spreading-Vorgang sogar an Land beobachten. Allerdings – der Erdkruste beim Gleiten zuzuschauen ist in etwa so spannend, wie Grashalmen beim Wachsen zuzusehen: Zwischen einem und 18 Zentimeter pro Jahr beträgt die Geschwindigkeit, mit der die Platten auseinanderdriften.

▲ Die Untersuchung von Bohrkernen hat ergeben, dass der Meeresboden ausgehend von den mittelozeanischen Rücken immer älter wird. Die farbigen Streifen in der Karte geben das geologische Zeitalter an, in dem der Meeresboden gebildet wurde. Die mittelozeanischen Rücken, die Geburtsstätten des Ozeanbodens, sind auch gleichzeitig der jüngste Meeresboden (in der Grafik rot). Das Ergebnis bestätigt eindeutig die Theorie des Seafloor-Spreading.

Um die Verschiebung der Platten sichtbar zu machen, braucht es in der Regel aufwändige Computermodelle. Doch manchmal geht es auch einfacher: Eberhard Bodenschatz, Direktor am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, simuliert die Verschiebungen der ozeanischen Erdkruste mit flüssigem Wachs – und macht damit Bewegungen sichtbar, die in der Natur für gewöhnlich 100 Millionen Jahre und länger dauern. Was Bodenschatz an seinem Versuchsaufbau beobachtet, hat erstaunliche Ähnlichkeit mit dem, was sich an den mittelozeanischen Rücken abspielt. In einer Wanne erhitzen die Max-Planck-Forscher Wachs auf mehr als 80 °C, sodass es schmilzt (**Kasten**). Damit sich die Wachsoberfläche verfestigt, wird kühle Luft senkrecht von oben draufgeblasen. Es bildet sich eine nur wenige Millimeter dicke feste Kruste, die auf dem flüssigen Wachs schwimmt – ähnlich wie die Erdkruste auf dem Erdmantel. Zwei senkrecht in der Wachskruste steckende, drei Millimeter dicke Metallplatten werden über einen kleinen Motor in entgegengesetzter Richtung verschoben; dabei wird gleichzeitig die Wachskruste langsam und gleichmäßig auseinander gezogen. Bei niedrigen Geschwindigkeiten bildet sich →



► In einer Wanne voll Wachs erforschen Eberhard Bodenschatz und seine Mitarbeiter die Grundlagen der Geophysik. Über Heizschlangen im Boden der Wanne wird das Wachs auf mehr als 80 °C erhitzt, sodass es schmilzt. Gleichzeitig pustet ein Gebläse senkrecht von oben kühle Luft (12 °C) auf das heiße Wachs, sodass sich die Oberfläche verfestigt. Mit einer Kamera zeichnen die Forscher auf, wie die Wachskrusten auseinanderdriften. Mit Hilfe von Laserlicht können sie die Veränderungen im Rift-Profil auch quantitativ erfassen.

© MPI für Dynamik und Selbstorganisation

→ ein gradliniger Spalt, durch den heißes Wachs von unten emporquillt und – wie Magma an den Rändern der Erdkruste – erstarrt. Erhöhen die Wissenschaftler die Geschwindigkeit, mit der die „Platten“ auseinanderdriften, so zeigen sich auch im Wachsmodell die für alle mittelozeanischen Rücken typischen **Transformstörungen**: Versetzungen, die senkrecht zur Längsrichtung des Spalts laufen, wobei auch ein Stück des Spalts zur Seite rückt. Ganze Abschnitte des Rückens verschieben sich deshalb senkrecht zur Spreizungszone nach links oder rechts.

„Es handelt sich hier zwar nur um eine vereinfachende Darstellung der Realität, aber offenbar spiegelt unser Modell Phänomene wider, die ganz ähnlich in der Natur vorkommen“, sagt Bodenschatz. Das Wachsmodell zeigt die Krustenbildung im Miniaturformat und zugleich im extremen Zeitraffer. Eine Stunde Plattenwanderung in der Simulation entspricht 140 Millionen Jahren in der Wirklichkeit, eine Strecke von einem Zentimeter etwa 250 Kilometern. Trotzdem lässt sich das Experiment nicht 1:1 auf die Lithosphäre übertragen, denn aufgrund der großen Masse sind die Kräfte natürlich viel stärker als beim Wachs. Allerdings ist die Dichte von Wachs und Magma recht ähnlich. Und auch die mechanischen Eigenschaften gleichen sich. Bodenschatz ist derzeit dabei, diese Eigenschaften des schmelzenden Wachses genau zu messen. „Wir gehen davon aus, dass sich unser Modell letztlich hoch skalieren und auf

den realen Maßstab übertragen lässt“, so der Max-Planck-Forscher. Das würde auch seinen Kollegen aus der Geophysik weiterhelfen, um neue Erklärungen für die Vorgänge in der Erdkruste zu finden.

MEERESSPIEGEL FÄLLT WIEDER

Nahezu alle geologischen Hauptmerkmale der Erde lassen sich jedoch mit der Plattentektonik erklären: die Drift der Kontinente im Verlauf der Erdgeschichte, wie sie alleine fünf Mal zu einem Riesenkontinent zusammen geschoben und danach wieder auseinander gebrochen sind, die Gebirgsbildung oder die Entstehung von Vulkanen. Und auch für die Schwankungen des Meeresspiegels über sehr große Zeiträume liefern die Veränderungen der mittelozeanischen Rücken, ihre Spreizungsraten (das ist die Geschwindigkeit, mit der zwei tektonische Platten auseinanderdriften) und die Subduktion eine Erklärung. Geowissenschaftler der Universität in Sydney haben jüngst anhand von Modellrechnungen, in denen sie eben diese Veränderungen berücksichtigten, die **Meeresspiegelschwankungen** in den vergangenen 140 Millionen Jahren rekonstruiert: Vor 80 Millionen Jahren während der Kreidezeit erreichte der Meeresspiegel nämlich seinen bisherigen Höhepunkt; der Westen der USA stand unter Wasser ebenso weite Teile Europas und Nordafrikas. Seitdem ist der Meeresspiegel ständig gesunken und liegt heute 170 Meter tiefer als damals. Grund dafür ist die Veränderung im

Volumen der Meeresbecken. Die mittelozeanischen Rücken liegen nur rund zweieinhalb Kilometer tief unter dem Meer, die Tiefsee-Ebenen hingegen fünfeinhalb bis sechs Kilometer. Verändert sich das Verhältnis zwischen mittelozeanischen Rücken und Tiefsee-Ebenen, dann verändert sich auch das Volumen der Meeresbecken. Das ist wie bei einer Wanne: Wenn man den Boden erhöht oder absenkt, so steigt oder sinkt – bei unveränderter Wassermenge – der Wasserspiegel in ihr. Vor 80 Millionen Jahren, als der Meeresspiegel rekordverdächtig hoch lag, waren die mittelozeanischen Rücken sehr viel länger. Der Grund: Damals lief das Zerbrechen des Superkontinents Pangäa auf Hochtouren, überall wuchsen die Ozeane. Es gab mehr mittelozeanische Rücken, aber dafür weniger Tiefsee-Ebenen, sodass die Meeresbecken flach waren und das Wasser auf die Kontinente drängte. Auf der Basis ihrer Modellrechnungen prognostizieren die Forscher aus Sydney, dass der Atlantik und der Indische Ozean weiter wachsen werden, während der Pazifik schrumpft. Insgesamt wird es weniger mittelozeanische Rücken geben als heute, dafür aber mehr Tiefsee-Ebenen. Weil das Wasser dann mehr Platz hat, sich zu verteilen, wird der Meeresspiegel im Vergleich zu heute um 120 Meter fallen – allerdings erst in 80 Millionen Jahren, Geowissenschaftler rechnen eben in anderen Zeitdimensionen.

Schlagwörter: Hydrothermalquellen, Kontinentalverschiebung, mittelozeanische Rücken, Mantelkonvektion, magnetische Polarisierung, Erdmagnetfeld, Seafloor-Spreading, Subduktion, Transformstörungen, Meeresspiegelschwankungen

Internet-Tipps: www7.nationalacademies.org/german-beyonddiscovery/Erdbeben_2.html
www.g-o.de/dossier-48-1.html
www.ds.mpg.de/english/research/dept_FPN/wax_tectonics/index.html

Lesetipps: Wolfgang Frisch und Martin Meschede, Plattentektonik. Kontinentverschiebung und Gebirgsbildung, Primus-Verlag, 2. aktualisierte Auflage (Februar 2007); Ulrich Hansen, Erfolgreiche Computersimulation der Plattentektonik, Spektrum der Wissenschaft 5 / 1999; Alexander Braun, Dr. Erwin Lausch und Gabriele Marquart; Die bewegte Geschichte des Nordatlantiks, Spektrum der Wissenschaft 6 / 2001

WWW.MAX-WISSEN.DE

– der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: