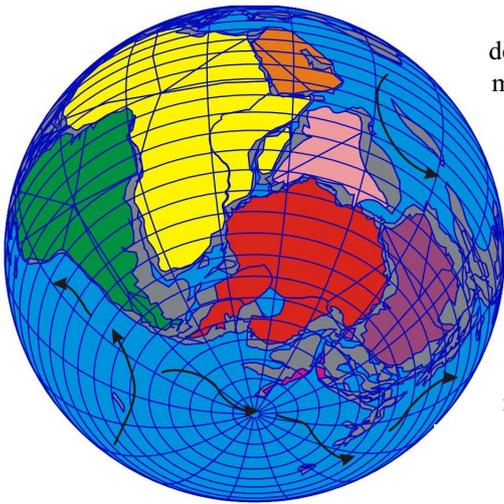


Gondwana -

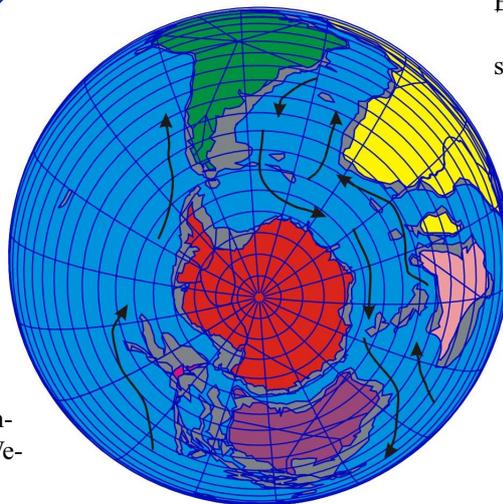
Ein Kontinent zerbricht

von Gabriele Uenzelmann-Neben, Johannes Rogenhagen
und Christian Müller, Bremerhaven



Das Klima der Erde wird durch eine Vielzahl von Faktoren und deren Zusammenwirken bestimmt. Einen besonderen Einfluss auf das Klima haben die Ozeane, in denen gewaltige Strömungen Wassermassen transportieren. Denn mit diesen Strömungen und Wassermassen wird Wärme aus Äquatornähe Richtung Pol transportiert oder umgekehrt. Dies zeigt sich z. B. im Westen Irlands und Südwesten Englands, wo die Ausläufer des Golfstroms (benannt nach dem Golf von Mexiko) ein mildes Klima schaffen und so sogar das Wachstum von Palmen ermöglichen. Auf gleicher Höhe in Nordamerika findet man solch Wärme liebende Pflanzen nur in geheizten Wohnungen. Der Unterschied ist, dass vor Irland der Golfstrom als überdimensionale Fernwärmeheizung funktioniert, die jede Stunde kostenlos und frei Haus die Heizleistung von 30.000 Millionen Tonnen Kohle liefert. Diese Zahl zeigt, wie hervorragend Wasser Wärme transportiert.

Neben der eigentlichen Bedeutung der Meeresströmungen für das Klima ist aber entscheidend, wo die Strömungen verlaufen. Die Wege der Strömungen in den Ozeanen sind nicht willkürlich; untermeerische Berge und Schwellen lenken ihren Verlauf. Neben diesen Einflüssen der Topographie des Meeresbodens werden Strömungen in größerem Maße durch die geographische Lage der Kontinente bestimmt. Jedem ist bei ei-



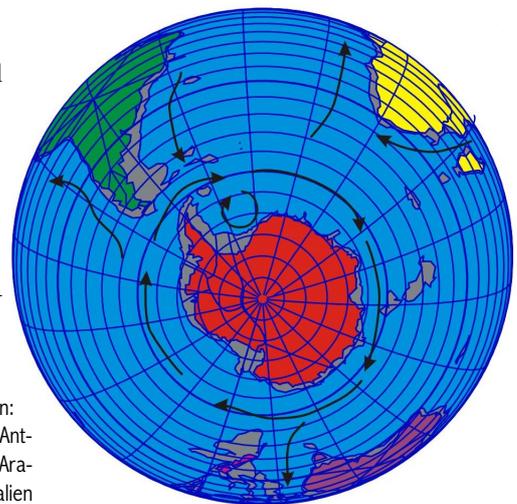
nem Blick auf den Globus schnell einsichtig, dass es keine direkte Strömung vom Pazifik in die Karibik geben kann, da die Landmasse von Mittelamerika den Weg versperrt. Doch das war nicht immer so: Bis vor cir-

Abb. 1: Zerfall des Superkontinents Gondwana. Oben: Die einzelnen Kontinente im Gondwana-Verband vor 200 Millionen Jahren. Mitte: Situation vor 85 Millionen Jahren. Unten: Die Kontinente in ihrer heutigen Position. Rot: Antarktis, grün: Südamerika, gelb: Afrika, orange: Arabische Halbinsel, rosa: Indien, weinrot: Australien und Neuseeland. Schwarze Pfeile zeigen den Verlauf der Meeresströmungen.

ca vier Millionen Jahren gab es eine solche Strömung. Erst durch die Lageänderung zweier Kontinente wurde sie unterbrochen. Nord- und Südamerika haben sich bei Panama über eine Landbrücke verbunden und so den Wasserfluss unterbunden.

Durch die Verschiebung der Kontinente, also die plattentektonische Veränderung der geographischen Lage, werden somit Änderungen der Meeresströmungen erzwungen (Abb. 1). Somit hat die plattentektonische Entwicklung der Erde im Verlauf der Erdgeschichte einen direkten Einfluss auf das Klima. Um einen Beitrag zum Verständnis der Entwicklung des Klimas zu leisten, versuchen wir, die plattentektonische Entwicklung der Erde zu rekonstruieren. So können wir auch die heute auf der Erde ablaufenden Prozesse besser verstehen und ihre Bedeutung für das Klima einordnen.

Die Antarktis ist ein gutes Beispiel für das Zusammenspiel zwischen plattentektonischer Dynamik, Meeresströmungen und Klima. Heute ist die Antarktis fast vollständig von Eis bedeckt. Lediglich zwei Prozent der Oberfläche sind eisfrei und ermöglichen die geologische Untersuchung der Gesteine. Die Antarktis bildete zusammen mit Indien, Australien, Südamerika und Afrika den Super-Kontinent



Gondwana. Gondwana war nicht unter teilweise kilometerdickem Eis begraben. Fossilien zeugen von einem gemäßigten und feuchten Klima. Seit seiner Entstehung ist der Gondwana-Splitter Antarktis dagegen erheblichen Klimaänderungen unterworfen worden.

Wie der Superkontinent Gondwana sich auflöste und welche Wege die großen Bruchstücke nahmen ist weitgehend bekannt (Abb. 1): Gondwana begann vor 220 Millionen Jahren zu zerbrechen. Dabei trennte sich zunächst Ostgondwana, bestehend aus der Antarktis, Indien und Australien, von Westgondwana, bestehend aus Südamerika und Afrika. Auch diese beiden Kontinente blieben nicht stabil, sondern zerfielen weiter (Abb. 1 Mitte). Vor 130 Millionen Jahren teilte sich dann Westgondwana in Südamerika und Afrika auf, zwischen ihnen öffnete sich der Südatlantik. Indien begann seine Bewegung in Richtung Norden vor 120 Millionen Jahren, während sich Australien vor 95 Millionen Jahren von der Antarktis trennte (Abb. 1 Mitte).

Wie kam es aber zur Vereisung der Antarktis? Mit dem Zerfall Gondwanas blieb die Antarktis als einziger Kontinent in einer weit südlichen Position zurück. (Abb. 1 unten). Vor 27 Millionen Jahren öffnete sich zwischen Südamerika und der Antarktis die Drake Passage. Damit war die letzte Landverbindung der Antarktis zu einem der Nachbarkontinente abgerissen. Dadurch entwickelte sich eine die Antarktis umfließende Strömung, der Antarktische Zirkumpolarstrom (Abb. 1 unten). Diese bis heute bestehende Ringströmung verhindert, dass warmes Wasser in die Nähe der Antarktis gelangt und sorgt so für eine thermische Isolation des Kontinents. Die vollständige Vereisung der Antarktis ist die Folge.

Die großflächigen Einflüsse der Plattentektonik auf das Klima sind gut bekannt. Aber es gab mit Sicherheit weitere Auswirkungen auf die Umwelt. Wenn das Auseinanderbrechen Gondwanas zum Beispiel von verstärkter vulkanischer Aktivität

begleitet gewesen wäre, hätte die in die Atmosphäre geschleuderte Asche die Sonneneinstrahlung verringert. Auch können die vielen kleineren Fragmente im Puzzle der Kontinente Auswirkungen auf die Umwelt haben. Den Weg, den die größeren Kontinente beim Gondwana-Zerfall genommen haben, kennt man ziemlich genau. Nicht gut bekannt sind aber die plattentektonischen Verschiebungen der kleineren Kontinentfragmente, wie der Antarktischen Halbinsel und Madagaskars. Schon eines dieser Fragmente kann einer Meeresströmung einen vollkommen anderen Weg aufzwingen. Wo lagen diese Kontinentfragmente früher und welchen Weg nahmen sie, um ihre heutige Position zu erreichen?

Um diese Fragen zu beantworten, werden die Ränder der Kontinente und der Meeresboden mit geologischen und geophysikalischen Methoden untersucht. Die Kontinentalränder repräsentieren die Kanten, an denen Gondwana auseinanderbrach. Aber auch der Meeresboden zwischen den Kontinenten hat während seiner Entstehung wichtige Informationen über die Entwicklungsgeschichte archiviert. Die genauesten Daten über Art, Alter und Prozesse,

die die Gesteine geprägt haben, liefert eine direkte Untersuchung des Gesteins. Leider ist eine direkte Probenahme in der Tiefsee bis in tiefere Schichten nicht möglich oder sehr schwierig. Deshalb kommen so genannte profilierende, geophysikalische Verfahren zum Einsatz, auf Grund derer die Auswahl viel versprechender Bohr- und Beprobungspunkte erfolgt. Die drei wichtigsten profilierenden Verfahren sollen hier kurz erläutert werden.

Die Seismik

Seismische Methoden führen zu einem detaillierten Abbild des Untergrundes entlang einer Geraden, eines Profils. Hierfür werden künstlich seismische Wellen erzeugt, die Erdbebenwellen entsprechen, aber wesentlich weniger Energie besitzen. Diese Wellen werden in der marinen Seismik meistens mit so genannten Luftpulsern ausgelöst, die in bestimmten Abständen unter Druck stehende Luft freisetzen. An Land setzt man kleine Sprengladungen oder Vibratorfahrzeuge ein. Die seismischen Wellen breiten sich im Untergrund aus und werden an Schichtgrenzen reflektiert (Abb. 2). Sie laufen dann zurück Richtung

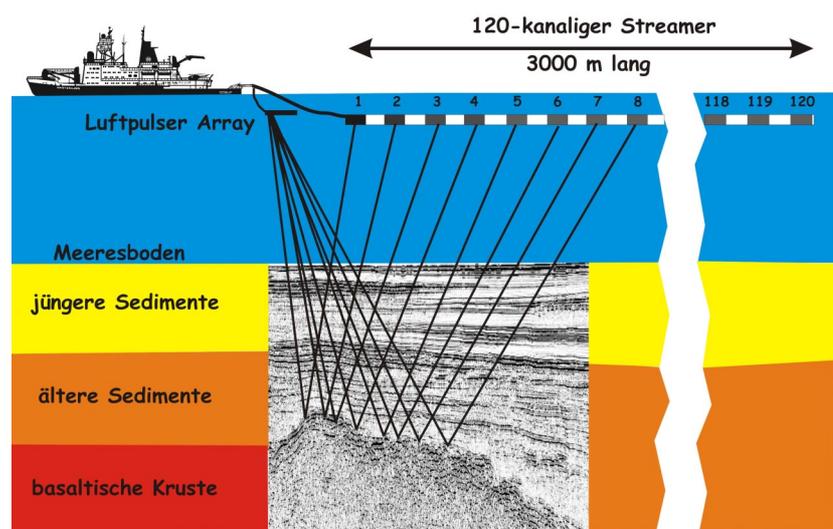


Abb. 2: Funktionsweise der marinen Seismik. Ein Schiff zieht eine Gruppe von Luftpulsern und einen Streamer hinter sich her. Die Luftpulsarray erzeugen seismische Wellen, die an Schichtgrenzen im Untergrund reflektiert werden und wieder an die Oberfläche laufen. Dort werden sie von den Unterwassermikrophonen im Streamer registriert.

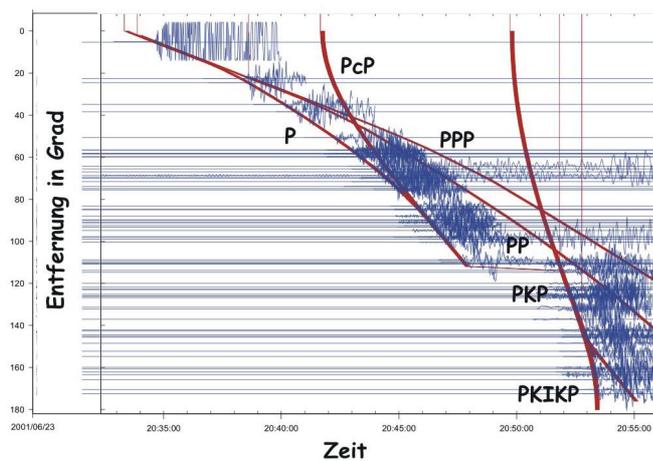
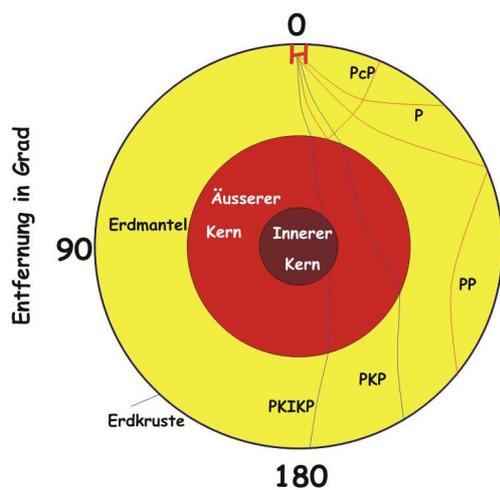
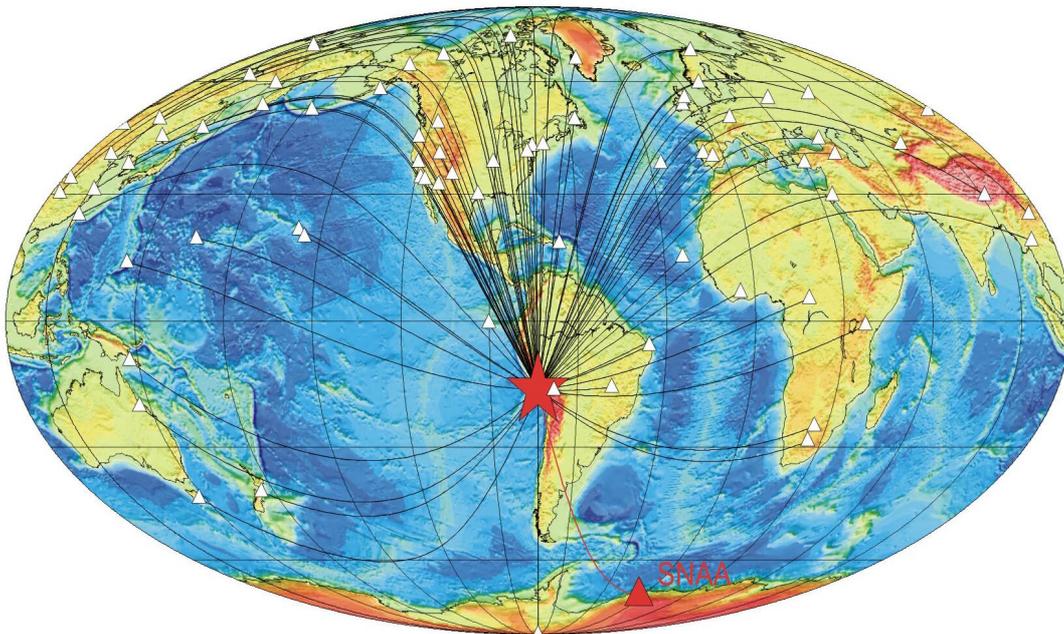
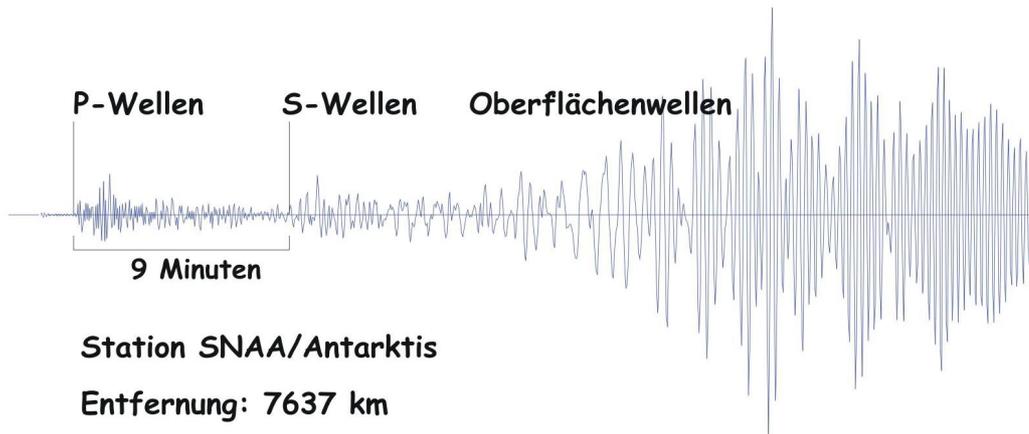


Abb. 3 (links): Wege der Erdbebenwellen zu den verschiedenen Registrierstationen auf der Erde (Bild Mitte) und durch die Erde (unten links) am Beispiel des Peru-Bebens vom 23. Juni 2001. An verschiedenen Lokationen werden Wellen registriert, die unterschiedliche Teile der Erde durchlaufen haben (unten links und rechts). Deutlich ist zu erkennen, dass sich seismische Wellen

verschiedenen Typs mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch die Erde bewegen und deshalb verzögert an den Registrierstationen ankommen. Primär-Wellen sind am schnellsten, sie werden gefolgt von den Sekundär-Wellen (Bild oben).

Oberfläche, wo sie von Messapparaturen registriert werden. Im Wasser schleppt man dazu einen langen schwimmenden Schlauch hinter dem Schiff her, in dem hochfeine Drucksensoren angeordnet sind (Abb. 2). Auf der festen Erde werden die Schallwellen mit eingegrabenen Geophonen registriert. Die Schallwellen werden aufgrund der unterschiedlichen Gesteinseigenschaften der über und unter einer Schichtgrenze liegenden Gesteine reflektiert. Ein Wechsel der Gesteinseigenschaften kann als Folge von Erosion auftreten, zum Beispiel durch ozeanische Strömungen oder als Ergebnis tektonischer Vorgänge wie Verschiebungen der Gesteinsschichten gegeneinander. Er kann aber auch Änderungen in den Umweltbedingungen zur Zeit der Ablagerung anzeigen. Mit seismischen Methoden kann man auch von jüngeren Sedimenten bedeckte Lavaströme, Zeugen vergangenen Vulkanismus, aufspüren.

Magnetische Eigenschaften

Über geologische Zeiträume gesehen ist die Ausrichtung des Erdmagnetfeldes keineswegs konstant, sondern schwankt zwischen zwei Zuständen. In unregelmäßigen Abständen vertauschen sich Nord- und Südpol des Erdmagnetfeldes. Diese Abfolge von Umkehrungen oder Umpolungen des Feldes ist durch zahlreiche gesteinsmagnetische Untersuchungen weltweit dokumentiert und liefert eine der besten Zeitskalen der Erdgeschichte.

Beim Auseinanderdriften der Kontinente bildet sich in dem dazwischen entstehenden Ozean ständig neue ozeanische Kruste. Magma fließt aus und erstarrt am Tiefseeboden. Bestimmte Eisenoxide richten sich wie winzige Magnete dabei nach dem vorhandenen Erdmagnetfeld aus. Nach Abkühlung des Magmas können sie sich nicht mehr bewegen und speichern so die Ausrichtung des Erdmagnetfeldes zum Zeitpunkt der Gesteinsbildung. Diese Magnete sind zwar mikroskopisch

klein, ihre Gesamtmenge in der kilometerdicken ozeanischen Kruste ist jedoch sehr hoch und deshalb erzeugen sie einen messbaren Effekt, die so genannte magnetische Anomalie. Mit Hilfe der magnetischen Anomalien des Meeresbodens lässt sich feststellen, wann und wo welcher Teil der Kruste neu gebildet wurde. Damit kann auch die Driftgeschichte der umliegenden Kontinente rekonstruiert werden.

Erdbebenbeobachtung oder Seismologie

In der Erdbebenbeobachtung werden seismische Wellen natürlicher Beben genutzt, um die Strukturen der Erde zu erkunden. Erdbebenwellen haben eine wesentlich höhere Energie als künstlich erzeugte Wellen, sie durchlaufen praktisch die gesamte Erdkugel. Die Erdbeben verursachen Bodenerschütterungen, die mit hochempfindlichen Geräten, so genannten Seismometern, registriert werden. Ein weltweites Registriernetz zeichnet Daten auf, mit deren Hilfe sich die Strukturen des tiefen Erdinneren ableiten lassen. Auf den Aufzeichnungen in Abbildung 3 sind verschiedene Wellen zu unterscheiden. Sie stammen von einem Seismometer in der Antarktis und wurden am 23. Juni 2001 während eines starken Bebens in Peru aufgenommen. Die Primär-Wellen (P-Wellen) kommen zuerst an, sie sind geradeaus durch die Erde gelaufen. Werden die P-Wellen an der Oberfläche reflektiert, wie eine Billardkugel an der Bande, brauchen sie aufgrund des längeren Weges mehr Zeit und treffen später ein. Solche Wellen werden PP-Wellen genannt. PcP-Wellen werden an der Grenze zwischen Erdmantel und äußerem Erdkern reflektiert, während PKP-Wellen durch sie hindurch laufen. Neben den P-Wellen misst man auch die Geschwindigkeiten der Sekundär-Wellen (S-Wellen), die grundsätzlich langsamer laufen als P-Wellen. Die Unterschiede in der Laufzeit hängen vom zurückgelegten Weg und den Eigenschaften des

durchlaufenen Gesteins ab.

Temperatur- und Druckunterschiede im Inneren der Erde sowie die verschiedenen Minerale beeinflussen die Geschwindigkeit der Wellen. Die Geschwindigkeit verschiedener Wellen liefern also Hinweise über das durchlaufene Gestein. Beispielhaft soll ein Gebiet im südlichsten Atlantik, das Agulhas Plateau, eine untermeerische Hochebene südlich Afrikas, das mit diesen Methoden untersucht wurde, hier näher beleuchtet werden. Dieses Gebiet nimmt eine Schlüsselposition in der Rekonstruktion des atlantischen Sektors Gondwanas ein, da es an der Stelle lag, wo sich Südamerika, Afrika und die Antarktis aus Gondwana heraustrennten.

Das Agulhas Plateau

Das Agulhas Plateau ist ein untermeerisches Plateau südlich von Afrika, das bis zu 2.500 Meter über den umgebenden Meeresboden ragt (Abb. 4). Das Agulhas Plateau ist durch eine Vielzahl von Vulkanen charakterisiert, die wahllos über das Plateau verstreut sind. Die über den Vulkanablagerungen liegenden Sedimente sind ungestört, sie wurden nicht durch nachfolgende Vulkanausbrüche verändert. Das Alter der Sedimente von bis zu 90 Millionen Jahren zeigt daher das Mindestalter der letzten vulkanischen Aktivität an.

Wie kommt es zur Bildung eines Plateaus mitten in einem ozeanischen Tiefseebecken? Handelt es sich bei diesem Plateau um ein Fragment von Gondwana? Antworten auf diese Fragen geben die Strukturen und die physikalischen Eigenschaften des Agulhas Plateaus. Wichtige Parameter sind der Verlauf der Schichtgrenzen, die Dicke der Schichten und die Geschwindigkeit seismischer Wellen in den Gesteinspaketen. Wenn das Plateau ein Teil des früheren Kontinents Gondwana war, sollten oben genannte Parameter kontinentale Kruste anzeigen. Die Kruste unter dem Agulhas Plateau ist mit bis zu 25 Kilometern für

ozeanische Kruste eigentlich zu dick. Für kontinentale Kruste hingegen ist sie wiederum viel zu dünn. Die unteren 50 bis 70 Prozent der Kruste durchlaufen seismische Wellen ungewöhnlich schnell. Die hohe Geschwindigkeit der Wellen und vor allem der große Anteil der Kruste, der durch sie charakterisiert wird, deuten eher auf ozeanische Kruste.

Vermutlich handelt es sich bei dem Agulhas Plateau um ozeanische Kruste, die durch zusätzlichen Eintrag von Material aus dem Erdmantel ungewöhnlich dick wurde. Dies passiert zum Beispiel an sogenannten Hotspots, an denen heißes Material direkt aus dem Mantel in die Kruste aufsteigt. Beim Agulhas Plateau ist vermutlich der Einfluss des Bouvet Hotspots (benannt nach der Insel Bouvet im Südost-Atlantik) beteiligt gewesen, der sich vor 80-100 Millionen Jahren an derselben Stelle befand wie das heutige Agulhas Plateau.

Nach diesen Befunden war das Agulhas Plateau kein Bestandteil Gondwanas, sondern wurde erst nach der Trennung Südamerikas von Afrika durch das Ausfließen von großen Mengen Lava neu gebildet.

Aktuelle Erdbebenaktivität in der Antarktis

Trotz seiner bewegten Vergangenheit ist der Rand des antarktischen Kontinents heute relativ ruhig. Häufige Erdbebenaktivitäten findet man an aktiven Plattengrenzen, sie haben eine hohe Seismizität. Doch seismische Aktivität kann auch unabhängig von aktiven Plattenrändern existieren. Solche Zonen sind meist Gebiete, in denen die Kruste geschwächt ist.

Der antarktische Kontinent zeichnet sich durch eine sehr geringe Erdbebenaktivität aus (Abb. 5, Einschub links oben, Erdbeben sind durch rote Punkte gekennzeichnet). Inzwischen wurde festgestellt, dass die in der Antarktis auftretenden Erdbeben aufgrund ihrer geringen Stärke einfach nicht registriert wurden, da nur wenige hochempfindliche Messgeräte installiert waren. Seit 1997 wird in der Nähe der deutschen Antarktisstation „Neumayer“ ein so genanntes seismologisches Array betrieben (in Abb. 5 gekennzeichnet durch das internationale Kürzel VNA2). Ein Array ist eine bestimmte Anordnung von mehreren Seismometern, das wie eine Antenne

für seismische Wellen wirkt. Damit sind auch schwache lokale und regionale Beben zu orten. Mit diesem Array wurden zwei Regionen in der Nähe des antarktischen Kontinentalrandes gefunden, in denen regelmäßig schwache Erdbeben stattfinden. Eine dieser Regionen hoher seismischer Aktivität befindet sich im Jutul-Penck-Graben, einer geologischen Struktur, die als krustale Schwächezone bekannt ist. Die aktuellen Erdbebenmessungen zeigen, dass diese Region auch heute noch aktiv ist.

Der Einschub rechts unten in Abbildung 5 zeigt die Aufzeichnungen aller Messgeräte in dieser Region während eines Bebens. Deutlich sind die P-Wellen und die etwa 30 Sekunden später eintreffenden S-Wellen zu erkennen. Diese Beben könnten mehrere Ursachen haben. Es könnte sich um eine andauernde tektonische Aktivität in der Antarktis handeln, oder es könnte aber auch sein, dass die Erdkruste sich als Reaktion auf das Abschmelzen der noch dickeren Gletscher der eiszeitlichen Antarktis hebt. Solche nach-eiszeitlichen Bewegungen werden heute auch in Skandinavien beobachtet.

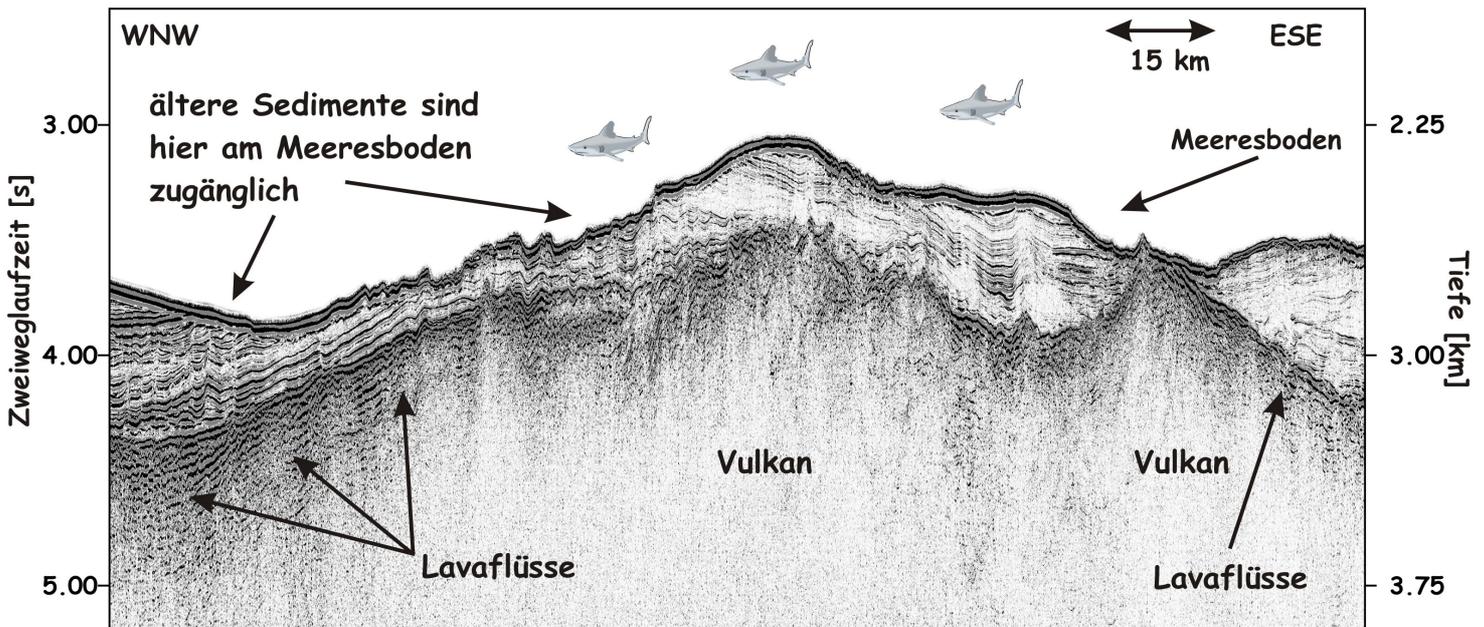


Abb. 4: Aufbau des Agulhas Plateaus, wie er sich im seismischen Bild darstellt. Eine Reihe von Vulkanen kennzeichnet das Plateau, von denen Lavaflüsse ausgehen. Diese sind als starke Reflexion im seismischen Bild zu er-

kennen. Darüber befinden sich Sedimente. Durch Erosion sind bis zu 90 Millionen Jahre alte Sedimente am Meeresboden zugänglich.

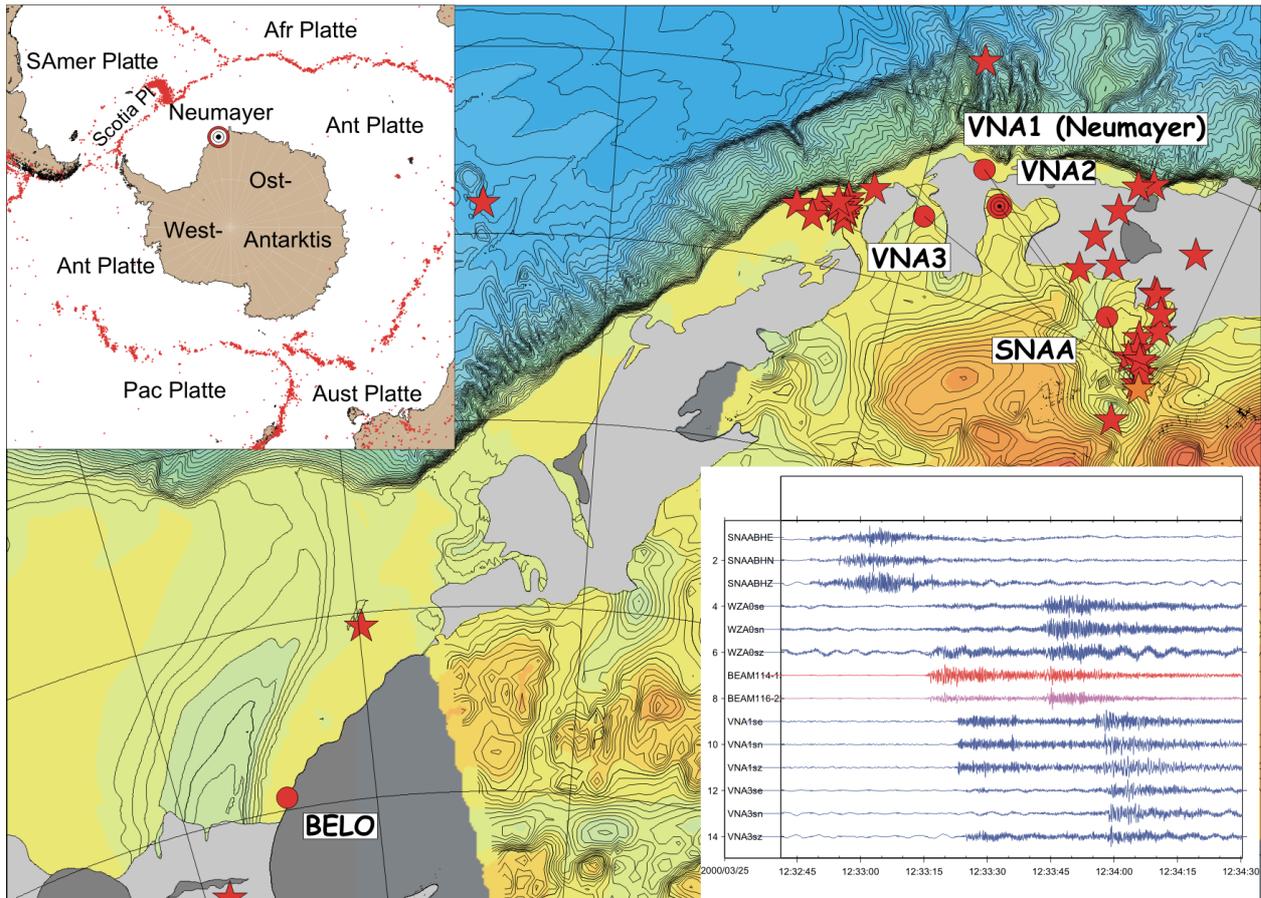


Abb. 5: Erdbebenaktivität der Antarktis und angrenzender Platten. Beobachtete Erdbebenlokationen liegen vor allem an den Plattengrenzen, als rote Punkte im Einschub links oben dargestellt (SAmer: südamerikanische, Afr: afrikanische, Ant: antarktische, Aust: australische, Pac: pazifische Platte). Der Antarktische Kontinent zeichnet sich durch eine geringe Erdbebenaktivität

aus. Genauere Untersuchungen mit Hilfe eines seismologischen Arrays an der Neumayer Station (rote Punkte in der großen Karte) haben jedoch auch schwache Beben im Jutul-Penck-Graben festgestellt (rote Sterne auf der großen Karte). Der Einschub rechts unten zeigt die Registrierungen eines Bebens aus dem Jutul-Penck-Graben.

Fragen zur vulkanischen Aktivität beim Gondwana-Zerfall, den Gondwana-Splittern und zur Entwicklung des Zirkumpolarstromes in den letzten Jahren zum Teil beantwortet werden. Der Zerfall Gondwanas ist mit erheblicher vulkanischer Aktivität verbunden gewesen. Sowohl im östlichen Weddellmeer als auch am Agulhas Plateau finden sich Hinweise auf starken Vulkanismus. Es handelt sich aber um verschiedene Phasen: im östlichen Weddellmeer fand er vor ca. 180 Millionen Jahren statt, im Gebiet des Agulhas Plateaus vor 80-100 Millionen Jahren. Das Agulhas Plateau galt bisher immer als eine Struktur, die im Gondwana-Verbund mit dem Falkland Plateau zusammenhing. Neuere Untersuchungen konnten zeigen, dass das Agulhas Plateau erst nach dem Zerfall Gondwanas entstanden ist.

Die bisher bekannten Modelle zur Rekonstruktion Gondwanas müssen also überarbeitet werden.

Literaturhinweise

H.-P. Harjes, R. Walter (1999): Die Erde im Visier. Springer, ISBN 3-540-66027-5.
 Internetadresse des Alfred-Wegener-Instituts: <http://awi-bremerhaven.de/Research/geowissensek2.html>



Gabriele Uenzelmann-Neben arbeitet als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Als Geophysikerin beschäftigt sie sich mit der plattentektonischen Geschichte des Antarktischen Kontinents und den Folgen für Strömungen und Sedimentablagerungen. Sie schrieb diesen Aufsatz zusammen mit Johannes Rogenhagen und Christian Müller, ebenfalls am AWI tätig.

Anschrift: Dr. G. Uenzelmann-Neben
 Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
 Columbusstrasse
 27568 Bremerhaven

e-mail: guenzelmann@awi-bremerhaven.de