

# Die lange Geburt eines Ozeans

## Numerische und plattentektonische Modelle beleuchten das Wie und Warum der Südatlantiköffnung

Sascha Brune<sup>1,2</sup>, Christian Heine<sup>2,\*</sup>, Stephan Sobolev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

<sup>2</sup> EarthByte Group, Universität von Sydney, AU

\* Jetzt bei Shell Intl. Exploration & Production, Den Haag, NL

*When continents are thrown into extension a rift system evolves until eventually the continent breaks apart and a new ocean basin is opened. However, not all rift zones developed into an ocean. Some became inactive at an intermediate stage and are preserved as subsurface graben structures within continental interiors. But what controls the success or the failure of a rift system? During separation of South America from Africa about 130 Ma ago, the Equatorial segment of the South Atlantic Rift competed with the West-African Rift Zone. After 20 Ma of coeval rifting, extension in the West-African Rift stopped while the Equatorial Atlantic opened. Our plate-kinematic and numerical models show that the evolution of continental break-up is strongly influenced by the orientation of a rift system relative to its extension direction. The larger the angle between rift trend and extensional direction, the more force is required to maintain a rift system. But even single rift systems can show a surprising dynamic evolution - the centre of the rift, where the continental crust gets actively thinned through faulting, may not stay fixed during continental break-up, but migrate laterally. During this motion, highly stretched crustal blocks are transferred from one side of the rift centre to the other so that the resulting passive margins exhibit a strong crustal asymmetry. Such a relocation of a rift takes its time – during formation of the asymmetric Angolan and Brazilian margin pair, the rift centre migrated more than 200 km westward. This delayed continental break-up and the generation of oceanic crust by up to 20 Ma.*



„Unsere Erde, der blaue Planet“ – die vielzitierte Phrase hat sprichwörtlich tiefere Gründe: Die Dichotomie der Erdoberfläche, bei der etwa zwei Drittel von Ozeanen und das restliche Drittel von Kontinenten bedeckt wird, ist durch Dichteunterschiede in der äußeren Schicht der Erde, der Lithosphäre, bedingt. Kontinente, deren höchste Erhebungen bis auf fast 9 km reichen, haben eine geringere Dichte als die schwerere ozeanische Lithosphäre, deren Oberfläche durchschnittlich 4 km unter dem Meeresspiegel liegt. Beide Arten von Lithosphäre schwimmen auf dem darunterliegenden Erdmantel wie Holz auf dem Wasser: Je schwerer das Holz, umso weniger erhebt es sich über die Wasseroberfläche, ein Zusammenhang, der als Isostasie bezeichnet wird. Alte, ozeanische Lithosphäre ist sogar so schwer, dass sie an bestimmten Plattengrenzen, den Subduktionszonen (z. B. rund um den Pazifik), langsam in den Erdmantel hinabgleitet und daher kontinuierlich „recycled“ wird. Kontinente hingegen sind zu leicht, um subduziert zu werden – sie wandern stattdessen seit Milliarden von Jahren an der Erdoberfläche, sie kollidieren miteinander und bilden Superkontinente wie Gondwana oder Pangäa, die anschließend wieder auseinanderbrechen.

Was genau passiert aber, wenn Kontinente zerbrechen? Beim Auseinanderbrechen eines Kontinents, dem sogenannten Rifting, wird dieser zuerst stark gedehnt, bevor neuer ozeanischer Meeresboden entsteht. Der dabei entstandene Übergang von kontinentaler zu ozeanischer Lithosphäre wird als passiver Kontinentalrand bezeichnet, weil er nach der Entstehung weitgehend tektonisch inaktiv bleibt. Abhängig von der Entwicklung des Riftprozesses können Kontinentalränder symmetrisch, asymmetrisch, magmatisch, oder nichtmagmatisch sein. In jedem Fall aber führt Isostasie zum Absinken der gedehnten Kruste und zur Formation mächtiger Sedimentbecken, so dass die Spuren dieses kontinentalen Zerreißen heute oft unter dem Meeresspiegel liegen. Diese Sedimentfolgen sind nicht nur wertvolle Stratigraphie-Archive, mit denen sich paläoklimatische Verhältnisse oder Plattenbewegungen rekonstruieren

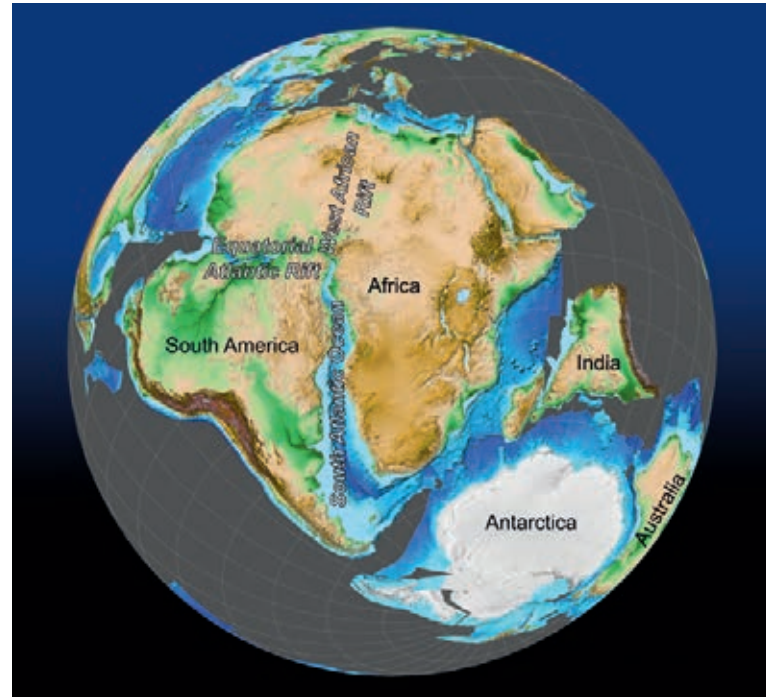


Abb. 1: Plattentektonische Rekonstruktion der südlichen Kontinente zur Zeit der Fragmentierung Gondwanas (hier dargestellt: Zustand vor 120 Mio. Jahren). Die Topographie der Kontinente und Ozeane basiert auf ETOPO1 (Amante & Eakins, 2009), rekonstruiert mittels GPlates ([www.gplates.org](http://www.gplates.org)). Grauer Hintergrund zeigt ozeanische Regionen, die heute nicht mehr existieren. (Bild: S. Brune, GFZ)

Fig. 1: Plate tectonic reconstruction of the southern continents during fragmentation of Gondwana (120 Ma ago). The topography of continents and oceans is derived from ETOPO1 (Amante & Eakins, 2009), reconstructed using GPlates ([www.gplates.org](http://www.gplates.org)). Grey background designates oceanic regions that do not exist anymore.

lassen, sondern beherbergen auch einen substanziellen Anteil unserer weltweiten Kohlenwasserstoff-, Blei-, Zink- und Phosphor-Vorkommen. Geriftete Kontinentränder werden am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ und im Verbund mit anderen Helmholtz-Zentren mit mariner Seismologie, Bohrungen am Meeresboden und Satelliten-gestützter Geophysik, aber auch mittels numerischen Simulationen untersucht.

Der afrikanische Kontinent bildete sich als Teil des Superkontinents Gondwana, der außer Afrika auch Südamerika, die Antarktis, Indien, Madagaskar und Australien umfasste (Abb. 1). Der Zusammenschluss Gondwanas geschah im späten Proterozoikum vor etwa 600 Mio. Jahren, noch bevor es mehrzellige Tiere auf der Erde gab. Das heutige südliche Afrika lag im Zent-

Links: Ein neugeborener Ozean. Nur wenige Kilometer trennen die massiven Riftschultern der Sinai-Halbinsel vom afrikanischen Kontinent auf der anderen Seite des Golf von Suez. Vor 130 Mio. Jahren hat der junge Atlantische Ozean zwischen Afrika und Südamerika vermutlich ähnlich ausgesehen. (Foto: Chr. Heine, Universität von Sydney, CC BY-SA)

Left: A new-born ocean. Only few tenths of kilometres separate the massive rift shoulders of the Sinai-Peninsula from the African continent on the far side of the Gulf of Suez. 130 Ma ago, the young South Atlantic Ocean has likely looked similar.



Kontakt: S. Brune  
([sascha.brune@gfz-potsdam.de](mailto:sascha.brune@gfz-potsdam.de))

rum dieses Superkontinents. Entlang der Kollisionszonen türmten sich Gebirge auf, die mit dem heutigen Himalaya vergleichbar sind. Diese wurden über Jahrmillionen hinweg erodiert und abgetragen, aber ihre Spuren blieben im Untergrund des Kontinents als Schwächezonen in der Lithosphäre erhalten. Als dann vor 180 Mio. Jahren der Superkontinent langsam zerbrach, wurden die alten Kollisionsgürtel reaktiviert. Zuerst spaltete Gondwana sich entlang der ostafrikanischen Küste in einen östlichen und einen westlichen Teil, wobei ein Vorläufer des Indischen Ozeans entstand. Danach spaltete sich der westliche Teil in Südamerika und Afrika, wodurch sich das südatlantische Ozeanbecken öffnete.

Die Wechselwirkungen von kontinentalem Zerbrennen, Plattentektonik und Lithosphärenstruktur in und um Afrika werden gegenwärtig am GFZ erforscht (vgl. auch Beiträge von *Weckmann et al.* und *Steinberger et al.* in diesem Heft). Die aktuelle Herausforderung besteht darin, die aus Laborexperimenten

bekannt, komplexen Fließeigenschaften des Erdgesteins mit konkreter Plattengeometrie und Lithosphärenstruktur zu verbinden. Zu diesem Zweck werden am GFZ numerische Simulation durchgeführt und Experimente auf Hochleistungscomputerclustern berechnet.

## Erfolg und Scheitern von Riftsystemen

Was aber bestimmt, welche Kollisionsgürtel reaktiviert werden? Und: gibt es Gesetzmäßigkeiten für das Auseinanderbrechen der Kontinente? Eine genaue Analyse der Abspaltung Südamerikas von Afrika gibt darüber Aufschluss (*Heine & Brune, 2014*). Zu Beginn der Kreidezeit vor 145 Mio. Jahren waren am Anfang des Trennungsprozesses mehrere mögliche Bruchstellen aktiv (Abb. 2). Neben der protoatlantischen Bruchzone entwickelte sich auch zwischen Westafrika und Nordostafrika das sogenannte Westafrikanische Rift, das sich vom heutigen Nigeria bis

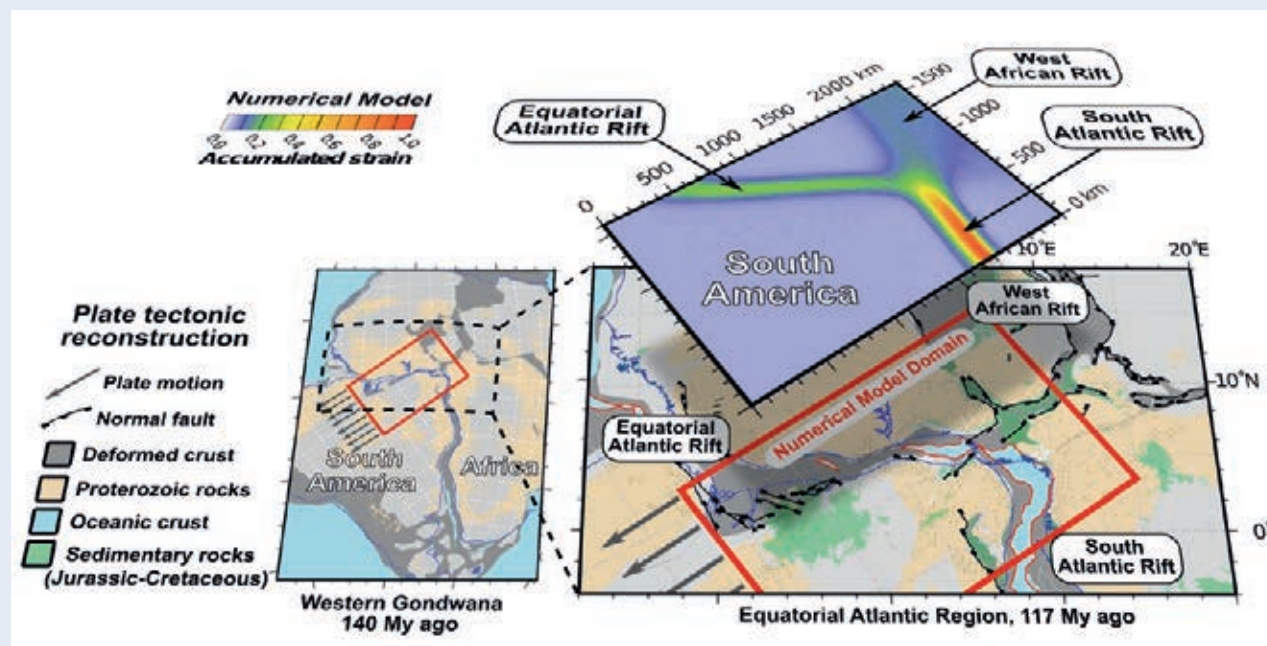


Abb. 2: Die tektonische Rekonstruktion (unten) enthält detaillierte Informationen über Plattenbewegungen und die Dehnungsgeschichte der beteiligten Riftsysteme. Das numerische Modell (oben) illustriert die Dehnung der Riftzonen an der Erdoberfläche. Die südwestwärtige Bewegung Südamerikas aktiviert die äquatorialatlantische Riftzone mit sehr schiefer Dehnungsrichtung. Das Westafrikanische Riftsystem hingegen leistet durch seine geringe Schiefe mechanisch mehr Widerstand. Dies ist der Grund, warum nach 20 Mio. Jahren gleichzeitiger Extension das Westafrikanische Rift inaktiv wird, während sich das äquatorialatlantische Ozeanbecken bis heute öffnet. (Bild: S. Brune, GFZ; Chr. Heine, Universität von Sydney)

Fig. 2: The tectonic reconstruction (bottom) contains detailed information on plate motions and extension history of associated rift systems. The numerical model (top) illustrates rift zone evolution at Earth's surface. The south-west directed velocity of South America activates the Equatorial Atlantic rift system with a highly oblique angle. Due to its low obliquity, the West African rift system offers distinctly more mechanical resistance. This explains why after 20 Ma of simultaneous extension, the West African Rift became inactive while the Equatorial Atlantic ocean basin opened.

in das südliche Libyen erstreckte. In diesen Grabensystemen dehnte sich die Kruste. Die Folge war ein Absenken der Erdoberfläche im Rift und die Entstehung kilometertiefer Sedimentbecken. Obwohl diese Prozesse vor 140 Mio. Jahren stattfanden, sind die entstandenen Sedimentablagerungen noch immer im Untergrund des afrikanischen Kontinents erhalten. Mit Hilfe geologischer und geophysikalischer Analyse dieser Becken und der umliegenden passiven Kontinentalränder lässt sich die damalige Dynamik der Entwicklung Afrikas rekonstruieren (Heine et al., 2013).

Anhand dieser Untersuchungen wird deutlich, dass sich der Atlantik wie ein Reißverschluss von Süd nach Nord geöffnet hat. Außerdem stellt sich das Westafrikanische Rift als lineare Verlängerung des Südatlantischen Rifts dar. Durch das Auseinanderbrechen des Kontinents entlang dieser zwei Riftzonen wäre das heutige Afrika in Nord-Süd-Richtung in zwei Teile gespalten worden, wobei sich ein Meeresbecken geöffnet hätte, das sich bildhaft als Sahara-Atlantik umschreiben lässt. Die tektonischen Rekonstruktionen zeigen, dass die Riftzone entlang des heutigen Äquatorial-Atlantiks über viele Millionen Jahre mit dem Westafrikanischen Rift konkurrierte und erst in letzter (geologischer) Minute eine rasche Lokalisierung zugunsten des Äquatorialen Atlantiks einsetzte. Letztlich verhinderte dies ein Zerbrecen Afrikas.

## Erfolg und Scheitern von Riftsystemen

Durch die Ergänzung der tektonischen Rekonstruktionen mit dreidimensionalen numerischen Modellen zur Lithosphären-deformation konnte eine Gesetzmäßigkeit identifiziert werden, die über Erfolg und Scheitern von Riftsystemen entscheidet: Die Schiefe einer Riftzone relativ zur Dehnungsrichtung ist ausschlaggebend für ihren Erfolg. Je spitzer der Winkel zwischen Plattenbewegung und Orientierung der Riftstruktur, umso weniger Kraft wird für die Dehnung benötigt (Brune et al., 2012). Das nahezu senkrecht zur südwestwärtigen Dehnungsrichtung liegende Westafrikanische Rift benötigte damit deutlich mehr Kraft und verlor letztendlich gegen seinen energetisch günstiger arbeitenden äquatorialatlantischen Kontrahenten.

Die hier vorgestellten Modelle zeigen zudem, dass geodynamische Rückkopplungen für einen fast zehnfachen Anstieg der Plattengeschwindigkeit Südamerikas verantwortlich sind, nachdem die letzte kontinentale Verbindung zwischen Südamerika und Afrika durch das Rifting geschwächt wurde (Abb. 3).

## Asymmetrische Kontinentränder

Als sich vor 130 Mio. Jahren Südamerika von Afrika löste, entstand der Südatlantische Ozean und trennte das heutige Angola von Brasilien. Die dabei gebildeten Kontinentalränder sind sehr asymmetrisch: Während sich vor der angolanischen Küste die stark ausgedünnte kontinentale Kruste bis zu 250 km weit ins

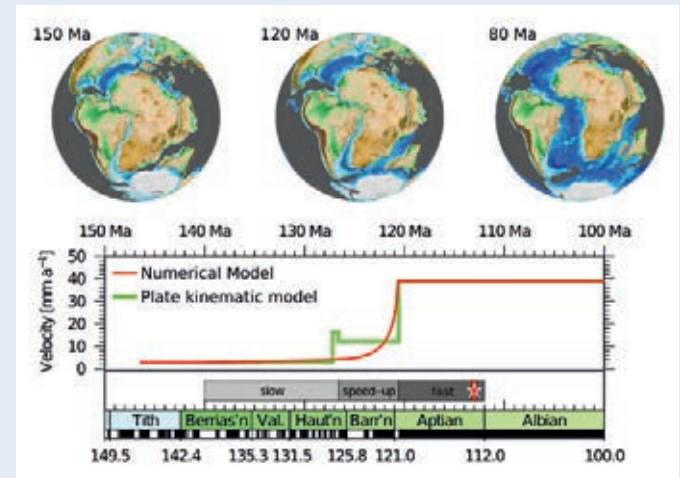


Abb. 3: Das Rifting zwischen Südamerika und Afrika begann mit der Kreidezeit vor etwa 145 Mio. Jahren. In den folgenden 30 Mio. Jahren öffnete sich der Südatlantik wie ein Reißverschluss von Süd nach Nord (oben). In diesem Zeitraum kam es zu einer dramatischen Veränderung der Relativgeschwindigkeit zwischen Südamerika und Westafrika (unten). Die Zeitreihen des numerischen und des platten-kinematischen Modells zeigen eine erste langsame Riftphase bis vor 127 Mio. Jahren, gefolgt von einem zehnfachen Anstieg der Geschwindigkeit innerhalb von 6 Mio. Jahren. Während dieses Zeitraums wird die letzte kontinentale Brücke zwischen Afrika und Südamerika durch Rifting so sehr geschwächt, dass sie den tektonischen Zugkräften kaum noch Widerstand leistet. Das kontinentale Zerbrecen (gekennzeichnet durch den Stern) fand in dieser Region vor etwa 113 Mio. Jahren statt. (Bild: S. Brune, GFZ; Chr. Heine, Universität von Sydney)

Fig. 3: Rifting between South America and Africa initiated during the early Cretaceous about 145 Ma ago. During the following 30 Ma, the South Atlantic opened like a zipper from south to north (top). During this process, the relative velocity between South America and West Africa changed dramatically (bottom). The numerical and the plate-kinematic model exhibit a slow initial rift phase prior to 127 Ma ago, followed by a ten-fold increase within 6 Ma. During this period, the last continental bridge between Africa and South America weakens successively due to the rift process. Continental break-up (designated by the red star) occurs in this region about 113 Ma ago.

Meer erstreckt, zeigt die dazugehörige brasilianische Seite einen sehr abrupten Übergang von kontinentaler zu ozeanischer Kruste (Unternehr et al., 2010). Welcher Prozess für die Entstehung dieser Asymmetrie der Kontinentalränder und der extrem ausgedünnten Kruste verantwortlich ist, war bisher unbekannt.

Durch die Kombination von Beobachtungen mit tektonischen und numerischen Modellen (Abb. 4) wurde gezeigt, dass das Zentrum eines Rifts während des Auseinanderbrechens eines Kontinents nicht statisch bleibt, sondern bis zu mehreren hun-

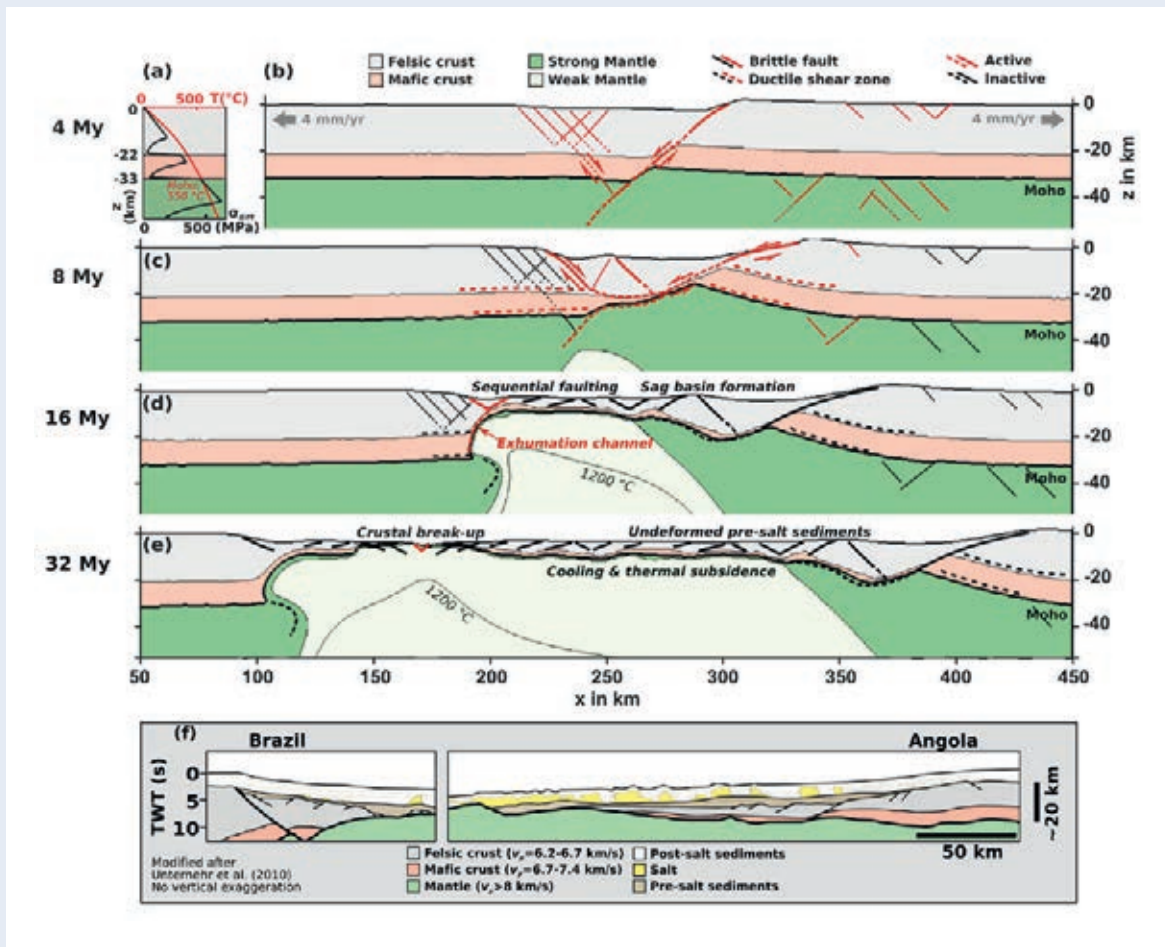


Abb. 4: Asymmetrie der südatlantischen Kontinentränder. Das Bild zeigt ein numerisches Modell für einen Querschnitt durch den Südatlantik. Das Riftzentrum bewegt sich mehr als 200 km in einem Zeitraum von 20 Mio. Jahren. Zum Vergleich zeigt die unterste Abbildung interpretierte seismische Daten der jeweiligen Kontinentalränder. (Bild: S. Brune, GFZ)

Fig. 4: Asymmetry of the South Atlantic continental margins. Shown is a model cross section for the South Atlantic. The rift centre moves laterally by more than 200 km during 20 Ma. For comparison, the lowermost image shows a seismic cross section of the conjugate continental margins.

dert Kilometer wandert (Brune et al., 2014). Bei diesem Prozess wird die Erdkruste an einer der beiden Riftflanken durch heißes, aus dem darunter liegenden Erdmantel aufströmendes Gestein geschwächt. Dabei bilden sich immer nur auf dieser Riftseite neue Risse im Rift. Die Störungen an der anderen Riftflanke werden inaktiv, weil sie nicht durch das heiße Mantelgestein beeinflusst werden. Die neuen Störungen lassen an der geschwächten Riftseite ein neues Riftzentrum entstehen, während das alte Zentrum seine Aktivität wegen fehlenden Wärmenachschubs einstellt. Dieser Mechanismus führt zu einer seitlichen Bewegung des Rifts. Diese Riftwanderung ist gleichbedeutend damit, dass Material aus der südamerikanischen Platte her-

ausgelöst und an die afrikanische Platte angelagert wird. Die so transferierten Krustenblöcke werden im Einflussbereich des Rifts stark gedehnt und bleiben letztlich als die bisher unerklärten dünnen Krustenschichten hinter dem Rift zurück.

Eine solche Entwicklung des Rifts braucht ihre Zeit: Zwischen dem heutigen Angola und Brasilien wanderten die Grabenbrüche seinerzeit mehr als 200 km in Richtung Westen. Dies wiederum verzögerte das kontinentale Auseinanderbrechen und die damit einhergehende Bildung ozeanischer Kruste um bis zu 20 Mio. Jahre. Unsere Modelle und Analysen der südatlantischen Kontinentränder zeigen übereinstimmend, dass die Deh-

nungsgeschwindigkeit dabei eine dominierende Rolle spielt: Je schneller die Kruste gedehnt wird, desto länger wandert der Grabenbruch und umso ausgeprägter wird die Asymmetrie der neuen Kontinentränder.

## Ausblick

Riftzonen sind ein wichtiges tektonisches Element unserer Erde. Sie sind für die heutige Form der Kontinente verantwortlich. Ein markantes Beispiel ist das derzeitige Auseinanderbrechen Ostafrikas. Untersuchungen des Ostafrikanischen Grabensystems geben uns Kenntnisse über die ersten Phasen des kontinentalen Auseinanderbrechens. Mit Beobachtungsdaten und Modellierungen von Krustenstrukturen an Kontinenträndern – die das finale Stadium des Rifting repräsentieren – entsteht somit ein umfassendes Bild der Prozesse, die in Riftsystemen wirksam sind. Die gegenwärtigen Studien am Deutschen Geoforschungszentrum GFZ liefern entscheidende neue Einblicke in die komplexen Vorgänge von Grabenbrüchen und dem Auseinanderbrechen von Kontinenten (Brune, 2014). Wichtige Fragen nach dem Einfluss von Schmelzen und Magmatismus, der Rheologie von Scherzonen und der Rolle des tiefen Erdmantels sind allerdings noch immer ungeklärt. Die Kombination numerischer Modellierung mit geologischen und geophysikalischen Daten bildet ein bewährtes Verfahren, mit dem diese Fragestellungen gegenwärtig am GFZ bearbeitet werden.

## Literatur

- Amante, C., Eakins, B.W. (2009): ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, (NOAA Technical Memorandum : ESDIS / National Environmental Satellite, Data, and Information Service ; NGDC-24), National Geophysical Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration. DOI: <http://doi.org/10.7289/V5C8276M>
- Brune, S. (2014): Evolution of stress and fault patterns in oblique rift systems: 3-D numerical lithospheric-scale experiments from rift to breakup. - *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 15, 8, p. 3392-3415. DOI: <http://doi.org/10.1002/2014GC005446>
- Brune, S., Heine, C., Pérez-Gussinyé, M., Sobolev, S. V. (2014): Rift migration explains continental margin asymmetry and crustal hyper-extension. - *Nature Communications*, 5. DOI: <http://doi.org/10.1038/ncomms5014>
- Brune, S., Popov, A., Sobolev, S. V. (2012): Modeling suggests that oblique extension facilitates rifting and continental break-up. - *Journal of Geophysical Research*, 117, B08402. DOI: <http://doi.org/10.1029/2011JB008860>
- Heine, C., Zoethout, J., Müller, R. D. (2013): Kinematics of the South Atlantic rift. - *Solid Earth*, 4, 2, 215–253. DOI: <http://doi.org/10.5194/se-4-215-2013>
- Heine, C., Brune, S. (2014): Oblique rifting of the Equatorial Atlantic: Why there is no Saharan Atlantic Ocean. - *Geology*, 42, 3, p. 211-214. DOI: <http://doi.org/10.1130/G35082.1>
- Unternehm, P., Péron-Pinvidic, G., Manatschal, G., Sutra, E. (2010): Hyper-extended crust in the South Atlantic: in search of a model. - *Petroleum Geoscience*, 16, 3, 207–215. DOI: <http://doi.org/10.1144/1354-079309-904>