

Aus eins mach zwei: Geodynamische Modelle beschreiben Südamerikas Trennung von Afrika

Sascha Brune¹, Simon E. Williams², R. Dietmar Müller², Stephan Sobolev¹

¹ Deutsches Geoforschungszentrum GFZ, Potsdam

² EarthByte Research Group, School of Geosciences, University of Sydney, Australien

The South American continent as we know it formed during the break-up of West Gondwana between 150 and 110 million years ago, when the South Atlantic Rift system evolved into the South Atlantic ocean. Using state-of-the-art global tectonic reconstructions in conjunction with numerical and analytical modelling, we investigate the geodynamics of rift systems as they evolve into an ocean basin. We find that rifts initially stretch very slowly along the future splitting zone, but then move apart very quickly before the onset of rupture. In case of the split between South America and Africa, the divergence rate increased from initially 5 to 7 millimetres per year to over 40 millimetres per year within few million years. Intriguingly, abrupt rift acceleration did not only occur during the splitting of West Gondwana, but also during the separation of Australia and Antarctica, North America and Greenland, Africa and South America, in the North Atlantic or the South China Sea. We elucidate the underlying process by reproducing the rapid transition from slow to fast extension using analytical and numerical modelling with constant force boundary conditions. The mechanical models suggest that the two-phase velocity behaviour is caused by a rift-intrinsic strength-velocity feedback similar to a rope that snaps when pulled apart. This mechanism provides an explanation for several previously unexplained rapid absolute plate motion changes, offering new insights into the balance of plate driving forces through time.



Plattentektonische Geschwindigkeiten

Verglichen mit alltäglichen Geschwindigkeiten ist Plattentektonik ein langsamer Prozess, denn Kontinente gleiten mit nur wenigen Zentimetern pro Jahr über die tieferen Erdschichten. Und doch bewegen sie sich im Laufe von Millionen Jahren über große Entfernungen und erschaffen dabei mächtige Gebirgsketten, zerklüftete Riftsysteme und tiefe Ozeanbecken. Wie genau sich die Erdplatten über geologische Zeiträume bewegt haben und welche Kräfte sie dabei antreiben oder abbremsen, wird am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ in Zusammenarbeit mit der Universität von Sydney untersucht.

Über hundert Jahre nachdem Alfred Wegener die Form des Superkontinents Pangäa skizzierte, steht fest, dass Südamerika und Afrika über viele Millionen Jahre im westlichen Teil des Superkontinents Gondwana vereint waren. Neben Afrika und Südamerika umfasste Gondwana alle Kontinente der Südhalbkugel, aber auch Arabien, Indien und Teile Südasiens. Obwohl die Küstenlinien der Südkontinente aneinanderverschließen wie Puzzlestücke, stieß Wegeners Idee der Kontinentaldrift am Anfang des letzten Jahrhunderts noch auf wenig Zustimmung. Zu gravierend erschienen die Argumente, dass die festen Gesteine der Erde keine Bewegung der Kontinente zulassen. Heute steht es außer Frage, dass sich die Kontinente bewegen: mit Hilfe moderner GPS-Technologie können die derzeitigen Geschwindigkeiten der Erdplatten millimetergenau gemessen werden. Eine 10-Eurocent-Münze hat einen Durchmesser von knapp 20 mm. Um die doppelte Distanz entfernt sich jährlich Südamerika von Afrika, mit einer Geschwindigkeit von 40 mm pro Jahr. Gleichzeitig wächst die ozeanische Kruste des Südatlantiks, indem heißes, weiches Gestein unter dem mittelozeanischen Rücken aufwärts gezogen wird und sich beim Erkalten an die divergierenden Erdplatten anlagert.

Die gegenwärtigen Geschwindigkeiten der Kontinente kann man zwar direkt messen, aber die der Vergangenheit nicht. Deshalb muss die kinematische Plattengeschichte aus einer Fülle von Daten rekonstruiert werden, wenn wir verstehen wollen, wie sich die Oberfläche unseres Planeten im Verlauf der Erdgeschichte entwickelt hat. Die genauen Bewegungen der Kontinente lassen dabei wichtige Rückschlüsse auf die Kräfte zu, die unsere dynamische Erde antreiben. Darüber hinaus beeinflusst die Lage der Kontinente die Entwicklung von Sedimentbecken und Lagerstätten, aber auch Ozeanzirkulation und Klima sowie die Entstehung und Vernichtung von Landbrücken und damit einhergehende Verbreitung von Tier- und Pflanzenarten. Somit bildet die Plattentektonik das Fundament des Systems Erde und seiner zeitlichen Entwicklung.

Woher kennt man die Position der Kontinente über einen Zeitraum von vielen Millionen Jahren? Die größte Datenbasis für die Rekonstruktion der Kontinentalbewegungen liefert – erstaunlicherweise – der Ozeanboden. Bei der Erstarrung der ozeanischen Kruste an den mittelozeanischen Rücken wird die Polarität des Erdmagnetfelds im Krustengestein konserviert. Da das Magnetfeld der Erde alle Millionen Jahre seine Polarität wechselt, bilden sich Streifen von magnetischen Anomalien auf dem Meeresboden, die ein Abbild der Bewegungen der Erdplatten darstellen. Durch Datierung radioaktiver Isotope in magmatischen Gesteinen sind die Zeitpunkte der Polaritätswechsel sehr gut bekannt, so dass die magnetischen Anomalien direkt in relative Plattengeschwindigkeiten umgerechnet werden können. In Verbindung mit zusätzlichen Daten, wie beispielsweise Ausrichtungen ozeanischer Frakturzonen oder Ergebnisse paläomagnetischer Messungen an Land, kann die Position und Geschwindigkeit der Erdplatten nach dem Zerbrechens eines Superkontinents sehr genau bestimmt werden.

Links: Plattentektonische Rekonstruktion Westgondwanas; zur Orientierung mit den heutigen politischen Grenzen. Das Bild zeigt die Plattenkonfiguration vor 180 Mio. Jahren, rekonstruiert mittels GPlates (www.gplates.org; Abb.: S. Brune, GFZ).

Left: Plate tectonic reconstruction of West Gondwana, with today's political borders for orientation. The image shows the plate configuration 180 million years ago, reconstructed using GPlates (www.gplates.org).



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



Abb. 1: Lavafeld des Erta Ale, einem Schildvulkan im äthiopischen Teil des Ostafrikanischen Grabensystems (Foto: Ji-Elle, Wikimedia Commons, lizenziert unter CreativeCommons-Lizenz CC BY-SA 3.0)

Fig. 1: Lava field of the Erta Ale, a shield volcano in the Ethiopian part of the East African Rift system

Dieser klassische Ansatz der Plattenrekonstruktion lässt allerdings kaum Rückschlüsse auf die Plattenbewegungen vor der Ozeanbildung zu. Um zu verstehen, wie sich z. B. Südamerika und Afrika vor der Öffnung des Südatlantiks während der Riftphase bewegt haben, müssen zusätzliche Prozesse einbezogen werden. Von größter Bedeutung ist dabei, dass es beim Zerschneiden eines Kontinents erst zu einer starken Dehnung kommt. Dabei wird die feste Gesteinsschicht der Erde dünner, die Oberfläche sinkt ab und es bildet sich ein Becken, in dem sich Sedimente Schicht für Schicht ablagern. Werden diese Sedimentschichten mit geochronologischen Methoden datiert, können die detaillierte Dehnungsgeschichte der Riftzone nachvollzogen und daraus die Plattengeschwindigkeiten ermittelt werden. Außerdem wird das Zerschneiden von Kontinenten häufig von starkem Magmatismus und der Bildung von Vulkanen wie z. B. dem Erta Ale in Äthiopien (Abb. 1) begleitet. Magmatische Gesteine lassen sich mithilfe von radioaktiven Zerfallsprozessen datieren, was zusätzliche Information über die Entwicklung von Riftsystemen liefert. Die Fülle geologischer, geophysikalischer und geochemischer Daten wird meist zunächst in regionalen Studien vereint, bevor sie in globale plattentektonische Rekonstruktionen einfließt (Müller et al., 2016).

Abrupte Plattenbeschleunigung

Normalerweise ändern Erdplatten ihre Bewegungsrichtung nur sehr langsam. Das liegt daran, dass ihre Geschwindigkeit vom Gewicht der an den Subduktionszonen abtauchenden Platten (*slab pull*), von der Konvektionsbewegung des hochviskosen Erdmantels (*basal drag*) und von dem gravitativen seitlichen Druck der Mittelozeanischen Rücken (*ridge push*) bestimmt wird. Diese antreibenden Kräfte verändern sich in der Regel nur im Verlauf von mehreren 10 Mio. Jahren. Allerdings finden sich

immer mehr Hinweise, dass die Kontinente in einigen seltenen Momenten der Erdgeschichte ihre Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit sehr plötzlich ändern können (Jaffaldano und Bunge, 2015). Welche Prozesse die Erdplatten so rapide beschleunigen, wird derzeit intensiv diskutiert, ohne dass bislang eine allgemein gültige Theorie für diesen Prozess gefunden wurde (z. B. van Hinsbergen et al., 2011; Bercovici et al., 2015).

Neueste Analysen des Zerschneidens von Pangäa zeigen nun, dass abrupte Änderungen der Plattengeschwindigkeit häufig mit kontinentalem Zerschneiden korrelieren (Brune et al., 2016). Die Trennung des südamerikanischen Kontinents von Afrika begann beispielsweise sehr langsam mit einer durchschnittlichen Riftgeschwindigkeit von etwa 5 bis 7 mm pro Jahr und blieb über mehr als 20 Mio. Jahre hinweg relativ konstant. In dieser Zeit senkte sich die Oberfläche des südatlantischen Grabensystems langsam ab und wurde schließlich von Süden her überflutet. Vor rund 125 Mio. Jahren allerdings kam es zu einer abrupten Beschleunigung Südamerikas und die Riftgeschwindigkeit stieg innerhalb von wenigen Millionen Jahren auf durchschnittlich 40 mm pro Jahr (Abb. 2). Das Rift wurde dadurch förmlich auseinandergerissen und von hohen Absenkungsraten und Vulkanismus geprägt, bis schließlich die Ozeanisierung einsetzte und der mittelozeanische Rücken entstand. Auch auf Südamerikas Westseite hat die Beschleunigung des Kontinents Spuren hinterlassen. Dort tauchen ozeanische Platten in einer Subduktionszone in den tiefen Erdmantel unter Südamerika hinab. Während der Westrand des Kontinents durch den Subduktionsprozess dort zuerst gedehnt wurde und sich in den nördlichsten Gebieten vor 140 Mio. Jahren sogar kleinere Meeresbecken bildeten, wie sie heute z. B. in Ostasien zu finden sind, schob das beschleunigte Südamerika diese Becken wieder zusammen. Letztlich bereitete dieser Vorgang auch den Weg zur Entstehung der Anden

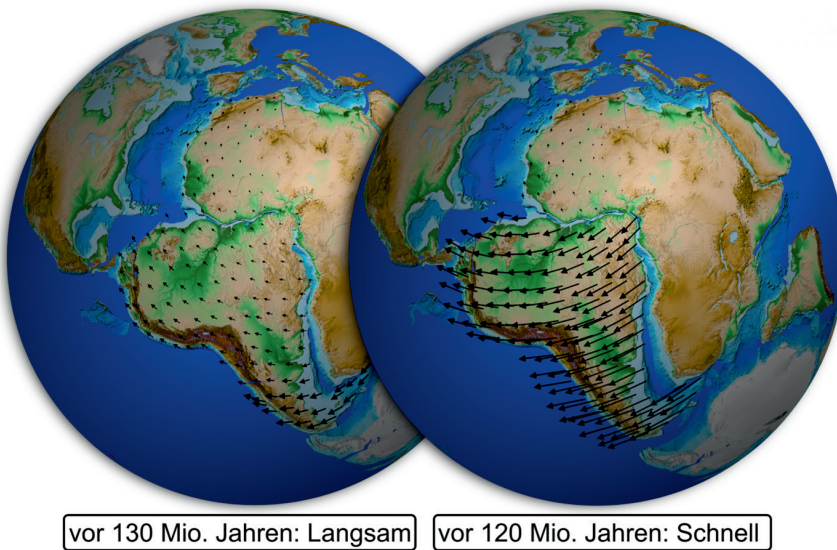


Abb. 2: Beschleunigung Südamerikas während der Trennung von Afrika. In wenigen Millionen Jahren steigt die Geschwindigkeit des Kontinents von 7 auf 40 mm pro Jahr. (Abb.: S. Brune, GFZ/CC BY-ND)

Fig. 2: South America's acceleration during the separation from Africa. Within a few million years the mean plate velocity increased from 7 to 40 mm per year.

viele Millionen Jahre später (Oncken, 2016). Die Überreste dieser Untersee-Episode sind heute in Form von marinen Sedimenten aus der Kreidezeit in den Anden zu finden.

Die zeitliche Abfolge einer erst langsamen, dann abrupt beschleunigten Trennung von Kontinenten lässt sich bei dem Zerbrecen vieler Erdmassen nachweisen, sei es bei der Trennung von Australien und der Antarktis, Nordamerika und Grönland, Afrika und Südamerika, im Nordatlantik oder im Südchinesischen Meer (Brune et al., 2016). Die größte Riftzone, an der ein Kontinent aktuell zerbricht, ist das Ostafrikanische Grabensystem. Dieses Riftsystem wird derzeit mit etwa 4 bis 5 mm pro Jahr gedehnt. Es befindet sich also noch in der langsamen Riftphase. Die neuen Ergebnisse erlauben die Annahme, dass sich die Dehnungsraten plötzlich erhöhen könnten, bevor sich im Ostafrikanischen Rift ein neuer Ozean entwickelt.

Wie ein zerreißendes Seil

Während sich mit Hilfe plattentektonischer Rekonstruktionen ergründen lässt, wie sich die Kontinente im Verlauf der Erdgeschichte bewegt haben, beantworten mathematisch-physikalische Modelle die Frage nach dem Warum. Zu diesem Zweck entwickeln GFZ-Forscherinnen und -Forscher in der Sektion Geodynamische Modellierung innovative numerische Software, mit der sich die Deformation der festen Erde über die geologischen Raum- und Zeitskalen hinweg nachvollziehen und erklären lässt. Mithilfe dieser thermo-mechanischen Modelle lässt sich die komplexe Bruchbildung auf eine verblüffend einfache dynamische Analogie reduzieren: unabhängig davon, aus welchen Gesteinen der Kontinent an der Bruchstelle besteht, verhält er sich wie ein altersschwaches Seil beim Tauziehen – das Seil dehnt sich erst langsam, bevor es plötz-

lich ruckartig zerreißt (Abb. 3). Genauso beginnen Grabenbrüche mit einer langen Phase bei kleiner Dehnungsgeschwindigkeit. Das Riftsystem beschleunigt in dem Moment, in dem der Kontinent buchstäblich zerbricht.

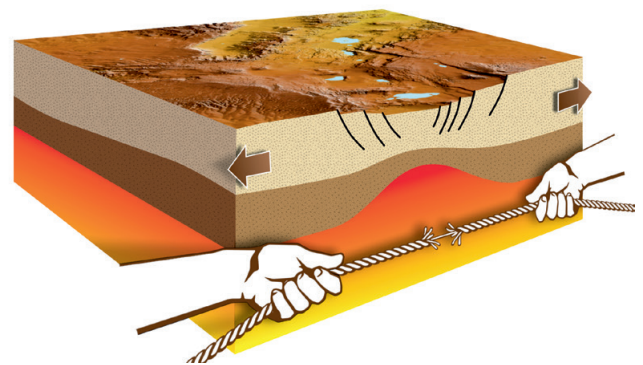


Abb. 3: Die Geschwindigkeit von Erdplatten steigt rapide, wenn Kontinente sich teilen. Der Grund ist, dass die Platten-geschwindigkeit von der Stärke der Riftzone abhängt. Diese nimmt während der Dehnung abrupt ab, während sich die Geschwindigkeit erhöht – wie bei einem zerreißenden Seil. (Abb: S. Brune, G. Schwalbe, GFZ und S. Riedl, Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam)

Fig. 3: The velocity of Earth's plates increases abruptly during the split of continents. This is due to the fact that plate speed directly depends on the strength of the rift zone. When the rift strength decreases the divergence rate will increase abruptly – similar to a snapping rope.

Diese einfache Analogie basiert auf numerischen und analytischen Lösungen für das Kraftgleichgewicht in Riftsystemen (Brune et al., 2016). Im Modell wird vereinfachend angenommen, dass der sich teilende Kontinent aus einer mehrlagigen Gesteinsschicht besteht, die mit einer vorgegebenen, konstanten Kraft auseinandergezogen wird. Während einer ersten Riftphase, wenn der Kontinent noch seine ursprüngliche Mächtigkeit besitzt, dehnt sich das Rift nur sehr langsam

(Abb. 4). Mit fortschreitender Deformation des Riftsystems verringert sich sukzessive die Dicke des Kontinents, wobei die mechanische Stärke signifikant reduziert wird (Brune et al., 2014). Wenn das Riftsystem schwächer wird, die Zugkraft allerdings konstant bleibt, muss sich die Riftgeschwindigkeit erhöhen, was zu erneuter Schwächung führt. Dieses einfache numerische Modell zeigt, dass ein mechanischer Rückkopplungsprozess die beschleunigte Trennung der Kontinente verur-

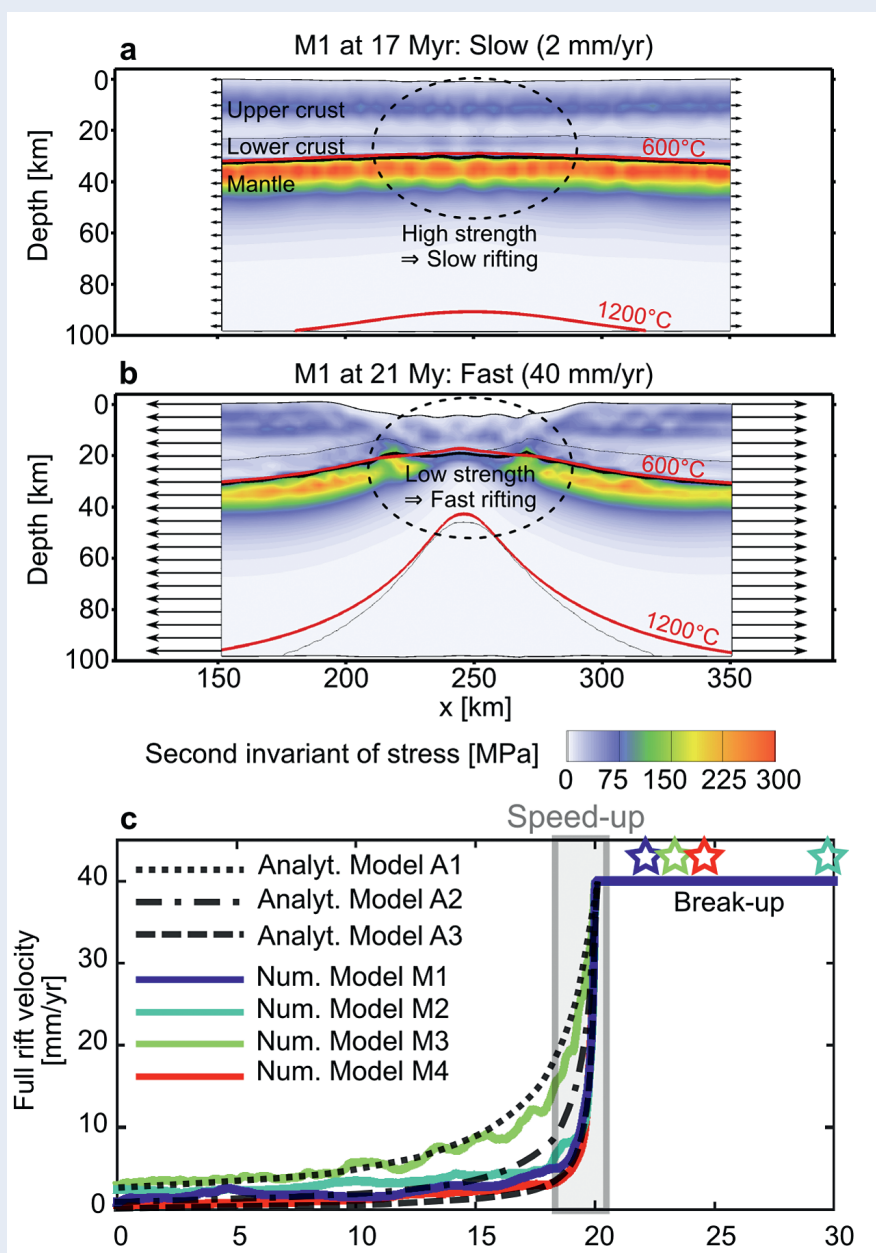


Abb. 4: Numerisches und analytisches Modell der Riftentwicklung bei konstanter Kraft (Brune et al. 2016). (a, b) Die Dehnungsgeschwindigkeit wird durch die zeitabhängige Stärke des Rifts bestimmt, hier als Spannung dargestellt. Wenn das Rift geschwächt wird, steigt die Riftgeschwindigkeit. (c) Unter der Annahme realistischer mechanischer Gesteinseigenschaften beschleunigt sich die Dehnung während eines Zeitraums von wenigen Millionen Jahren. (Abb.: S. Brune, GFZ)

Fig. 4: Numerical and analytical model of rift evolution under constant force. (a,b) The rate of extension is controlled by the time-dependent strength of the lithosphere, here visualized through stress. When the strength drops, the rift accelerates. (c) For realistic, mechanical rock properties, extension rate increases drastically within a few million years.

sacht. Weiterhin lässt sich prüfen, inwiefern spezifische Materialeigenschaften diesen dynamischen Prozess beeinflussen. Dabei zeigt sich, dass die Dauer der Übergangsphase von langsamem zu schnellem Rifting durch die Fließeigenschaften des Gesteins bestimmt wird: für linear viskose Materialien, bei denen die Viskosität konstant ist, dauert der Geschwindigkeitsanstieg mehrere 10 Mio. Jahre. Sowohl Laborexperimente als auch Feldstudien zeigen allerdings, dass sich Gesteine innerhalb der Lithosphäre extrem nichtlinear verhalten, also dass die Viskosität gemäß eines Exponentialgesetzes von der Deformationsrate abhängt. Bringt man dieses Wissen in das numerische Modell ein, ergibt sich eine Beschleunigungsphase von etwa 2 bis 10 Mio. Jahren, die mit den Ergebnissen aus der Plattenrekonstruktion übereinstimmt.

Die Umrisse des südamerikanischen Kontinents sind bei der Spaltung Gondwanas nicht zufällig entstanden. Denn Südamerika und Afrika bestehen aus mehreren Kratonen, den langlebigen harten Kernen der Kontinente. Aus diesen wurde Westgondwana vor über 550 Mio. Jahren zusammengeschweißt, ungefähr zu der Zeit, als sich tierisches Leben auf der Erde entwickelte. Wenn Kontinente miteinander kollidieren, bilden sich gewaltige Gebirgsketten, wobei die kratonischen Kerne meist nur wenig deformiert werden. Die Hochgebirge in solchen Kollisionszonen werden über Jahrmillionen hinweg erodiert und abgetragen, ihre Spuren bleiben jedoch im Untergrund des Kontinents als Schwächezonen in der Lithosphäre erhalten. Wenn sich nach vielen Millionen Jahren das globale Kräftegleichgewicht ändert und der Kontinent wieder auseinandergezogen wird, dann werden diese alten Kollisionsgürtel quasi als Sollbruchstellen reaktiviert (Heine und Brune, 2014).

Ausblick

Eine Schlüsselerkenntnis dieser Arbeit ist, dass Lokalisierungsprozesse an Plattengrenzen (mit einer Breite von nur etwa 100 km), die Bewegung ganzer Erdplatten mit Dimensionen von mehreren 1000 km kontrollieren können. Dieser skalenübergreifende Ansatz ist ein Kernelement der von der Helmholtz-Gemeinschaft und dem GFZ ko-finanzierten Nachwuchsgruppe CRYSTALS (Continental Rift Dynamics Across the Scales, <http://www.gfz-potsdam.de/wg/crystals/>). Das über fünf Jahre laufende Projekt zielt darauf ab, grundlegende geodynamische Prozesse zu beschreiben, die die Wechselwirkung von Plattentektonik, Riftdynamik und rheologischen Gesteinseigenschaften kontrollieren. Zentrales Werkzeug ist dabei die computerbasierte Modellierung, mit der – unter Verwendung innovativer Methoden – geodynamische Prozesse auf Skalen von weniger als 1 cm bis mehr als 3000 km verbunden werden. Bei multidisziplinären Projekten wie diesem spielt die computergestützte Modellierung eine immer wichtigere Rolle (Brune, 2016), denn mithilfe von numerischen Modellen lassen sich die erhobenen Datensätze und die tieferliegenden geodynamischen Prozesse in einem umfassenden Kontext verstehen.

Ein tieferes Verständnis der Geodynamik von Riftsystemen ist nicht nur von fundamentalem Interesse für die Wissenschaft. Sedimentäre Becken an gerifteten Kontinentalrändern beherbergen einen substanziellen Anteil der weltweiten Kohlenwasserstoff-, Blei-, Zink- und Phosphor-Lagerstätten. Des Weiteren kontrollieren geologische Strukturen, die bei dem Zerbrechen von Kontinenten entstehen, die Fluidzirkulation im Untergrund und damit das Potenzial zur Gewinnung geothermischer Energie an kontinentalen Riftsystemen wie beispielsweise in Ostafrika.

Literatur

- Bercovici, D., Schubert, G., and Ricard, Y., 2015, Abrupt tectonics and rapid slab detachment with grain damage: Proceedings of the National Academy of Sciences, 112, 5, pp. 1287-1291.
- Brune, S. (2016): Rifts and rifted margins: A review of geodynamic processes and natural hazards. - In: Duarte, J., Schellart, W. (Eds.), *Plate Boundaries and Natural Hazards*, (Geophysical monograph series, 219), Hoboken, New Jersey, Wiley, pp. 13-39.
- Brune, S., Heine, C., Sobolev, S. V. (2014): Die lange Geburt eines Ozeans: numerische und plattentektonische Modelle beleuchten das Wie und Warum der Südatlantiköffnung. - *System Erde*, 4, 2, pp. 20-25.
- Brune, S., Williams, S. E., Butterworth, N. P., Müller, R. D. (2016): Abrupt plate accelerations shape rifted continental margins. - *Nature*, 536, 7615, pp. 201-204.
- Heine, C., Brune, S. (2014): Oblique rifting of the Equatorial Atlantic: Why there is no Saharan Atlantic Ocean. - *Geology*, 42, 3, pp. 211-214.
- Iaffaldano, G., Bunge, H.-P. (2015): Rapid Plate Motion Variations Through Geological Time: Observations Serving Geodynamic Interpretation. - *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43, pp. 571-592.
- Müller, R. D., Seton, M., Zahirovic, S., Williams, S. E., Matthews, K. J., Wright, N. M., Shephard, G. E., Maloney, K. T., Barnett-Moore, N., Hosseinpour, M., Bower, D. J., Cannon, J. (2016): Ocean Basin Evolution and Global-Scale Plate Reorganization Events Since Pangea Breakup. - *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44, pp. 107-138.
- Oncken, O. (2016): Das Rätsel der Anden-Orogenese: Ist der Erdmantel für den Start der Gebirgsbildung verantwortlich? – *System Erde*, 6, 2, pp. 16-21.
- van Hinsbergen, D. J. J., Steinberger, B., Doubrovine, P., Gassmöller, R. (2011): Acceleration and deceleration of India-Asia convergence since the Cretaceous: roles of mantle plumes and continental collision. - *Journal of Geophysical Research*, 116, B06101.