

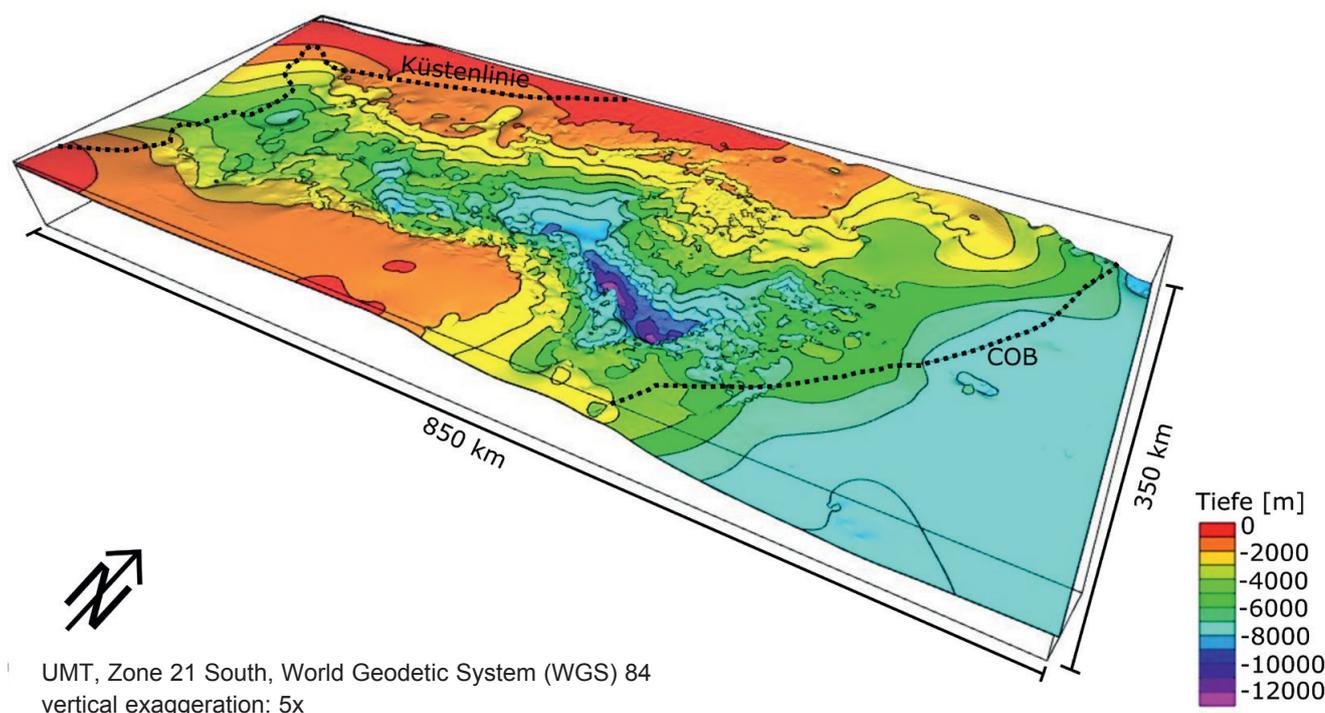
Rekonstruktion der Absenkungsgeschichte des Argentinischen Kontinentalrands

Ingo Dressel, Magdalena Scheck-Wenderoth, Judith Sippel
 Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Sedimentary basins represent geological archives. Accordingly, 3D basin models that integrate geological and geophysical observations can be used to reproduce not only their present-day structural configuration and distribution of physical properties, but also their evolution including the subsidence history. For example, the thickness of deposited sediments reflects the amount of subsidence caused by the sediment load. The corresponding load-dependent vertical movements (called isostatic subsidence) can be sequentially subtracted from the total subsidence in order to reconstruct past depth configurations.

Another aspect of basin subsidence is caused by thermal processes that can also be approximated by studying the present-day basin configuration. If the basin formation is related to lithospheric stretching and thinning, it initially involves a thermal disturbance due to which the geothermal gradient is increased by an amount depending on the observed strain. After stretching has ceased, the lithosphere starts cooling down and approaches a thermal equilibrium. This cooling process is accompanied by an increase in rock density and related thermal subsidence, which can also be assessed. By calculating the two subsidence components for certain stratigraphic intervals, the corresponding temporal changes in water depths (paleobathymetries) can be reconstructed for our understanding of subsidence dynamics.

This research methodology was applied to the conjugate passive continental margins of Africa and Argentina in order to analyse and compare the evolution of sedimentary basins after the formation of the South Atlantic. This study mainly focussed on the Argentinian Colorado Basin because of its complex evolution and economic resource potential.



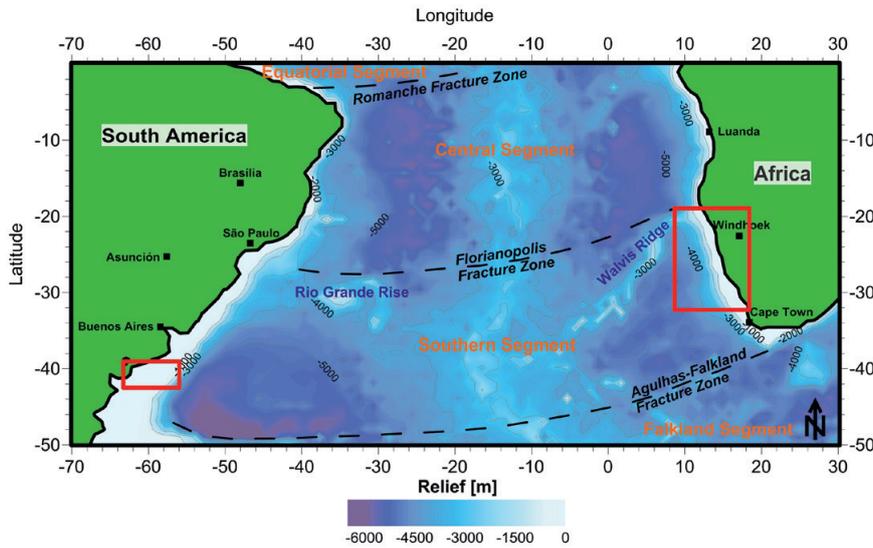


Abb. 1: Lage des Coloradobeckens am passiven Kontinentalrand vor der Küste Argentiniens im südlichen Segment des Südatlantiks (kleines rotes Rechteck, entspricht Ausschnitt in Abb. links). Die für das Coloradobecken rekonstruierte Absenkungsgeschichte wird ebenfalls mit analogen Ergebnissen vom dazu konjugierten südafrikanischen Kontinentalrand (großes rotes Rechteck) verglichen. Die Skala gibt die Wassertiefe an.

Fig. 1: Location of the Colorado Basin on the passive continental margin at the coast of Argentina in the Southern Segment of the South Atlantic (small red rectangle). The reconstructed subsidence history of the Colorado basin is also compared with analogous results from the conjugated South African continental margin (large red rectangle). Legend denotes water depth.

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SAMPLE (South Atlantic Margin Processes and Links with onshore Evolution) wurden am Beispiel des Südatlantiks die Ursachen des Auseinanderbrechens von Kontinenten und die darauf folgende Entwicklung der Kontinentalränder des neu entstandenen Ozeans untersucht. Das Schwerpunktprogramm wurde 2008 initiiert und 2016 abgeschlossen (weiterführende Informationen im Internet: www.sample-spp.de und in der Rubrik „Netzwerk“ in diesem Heft, S. 48). Neben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ waren Kolleginnen und Kollegen des Alfred-Wegener-Instituts (AWI), des GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und verschiedener anderer nationaler und internationaler Universitäten sowie außeruniversitärer Forschungseinrichtungen und Behörden beteiligt.

Innerhalb dieses Schwerpunktprogramms befassten sich die Arbeiten der GFZ-Sektion „Sedimentbeckenmodellierung“ mit der heutigen und der vergangenen Konfiguration der Sedimentbecken des Südatlantiks.

Ausgangsbasis

Sedimentbecken stellen mit ihrer Füllung Archive der Erdgeschichte dar, deren Untersuchungen genaue Studien über die Vergangenheit erlauben. Für diese Studien kann mittels Integration von geologischen und geophysikalischen Beobachtungen ein dreidimensionales Modell eines Sedimentbeckens erstellt werden, welches dessen heutige strukturelle Konfiguration und die Verteilung physikalischer Eigenschaften abbildet. Dieses Modell des heutigen Zustands kann darüber hinaus als Startpunkt für die Rekonstruktion der Vergangenheit verwendet werden, um die Absenkungsgeschichte zu verstehen. Neben den grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen liefert die Analyse von Sedimentbecken auch neues Wissen für ökonomische Fragestellungen (Schulz et al., 2014). Sedimentbecken haben ein großes Rohstoffpotenzial. Um dieses Potenzial bestmöglich zu nutzen, bedarf es einer detaillierten Erkundung der Konfiguration des Sedimentbeckens sowie der komplexen Prozesse, welche für die charakteristische Sedimentbeckenentwicklung verantwortlich sind.

Dazu wurde am GFZ die heutige Struktur des Kontinentalrands vor der Küste Argentiniens und vor der Küste von Südafrika und Namibia (Abb. 1) aus geologischen und geophysikalischen Beobachtungen abgeleitet und die Entwicklung der Absenkungsgeschichte an beiden Kontinentalrändern rekonstruiert.

Links: Dreidimensionale Ansicht der Sedimentbasis (Oberfläche der kristallinen Kruste) im Bereich des Coloradobeckens zwischen der argentinischen Küstenlinie und der Kontinent-Ozean-Grenze (COB)

Left: 3D view on the base of the sedimentary fill (top of the crystalline crust) in the area of the Colorado Basin between the coast of Argentina and the continent-ocean boundary (COB)



Kontakt: M. Scheck-Wenderoth
magdalena.scheck@gfz-potsdam.de

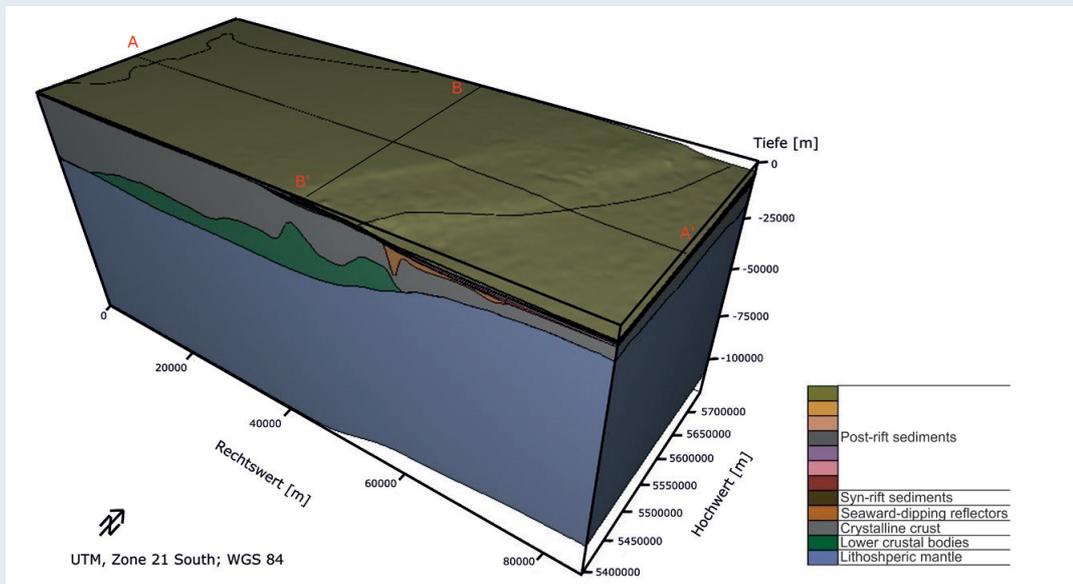


Abb. 2: 3D-Strukturmodell des Coloradobeckens (nach Autin et al., 2013, 2016; siehe rotes Rechteck in Abb. 1 für die Lage des Coloradobeckens). Stratigraphisch werden sieben Postrift-Einheiten und eine Synrift-Einheit unterschieden. Darüber hinaus liefert dieses Modell Informationen über Heterogenitäten in der Kruste, indem es „Seaward-dipping reflectors“ und „Lower crustal bodies“ abbildet. Die strukturelle Basis des Modells ist die Lithosphären-Asthenosphärengrenze.

Fig. 2: 3D structural model of the Colorado Basin (after Autin et al., 2013, 2016; see Fig.1, red rectangle for location of Colorado Basin). Stratigraphically seven post-rift units and a syn-rift unit are differentiated. In addition, this model provides information on heterogeneities in the crust, where it shows “seaward-dipping reflectors” and “lower crustal bodies”. The structural base of the model is the lithosphere-asthenosphere-boundary.

iert und miteinander verglichen. Im Gegensatz zu den Arbeiten von Brune et al. (2016), welche sich mit dem Aufbrechen Gondwanas während der Riftphase befassen, beschreiben die Arbeiten von Dressel et al. (2015, 2016) die Entwicklung der Kontinentalränder während der darauffolgenden Postriftphase. Der Beginn der Postriftphase ist durch die Methode der seismischen Stratigraphie und das Auftreten einer sogenannten Lagerungsdiskordanz („Breakup unconformity“) gut belegt. Diese zeigt den Beginn der Ozeanbildung und ein Übergreifen der Sedimentation an.

Die Untersuchungen am atlantischen Kontinentalrand Südamerikas konzentrierten sich auf das Coloradobecken, ein Sedimentbecken vor der Küste Argentiniens. Es hat eine West-Ost-Erstreckung von rund 650 km und eine Nord-Süd-Erstreckung von rund 300 km. Für den Sedimenteintrag ist hauptsächlich der Coloradofluss verantwortlich, welcher sich rund 1000 km durch Argentinien zieht, bevor er südlich von Bahia Blanca in den Südatlantik mündet.

Die Arbeiten zum Coloradobecken in SAMPLE konnten sich auf zahlreiche im Vorfeld durchgeführte Studien stützen. Insbesondere die Konfiguration der Beckenfüllung wurde im Rahmen der Kohlenwasserstoffexploration durch ein dichtes Netz

seismischer Daten und einige Bohrungen erschlossen, die die Industrie für dieses Projekt verfügbar machte. Weitere Arbeiten im Vorfeld hatten die heutige Struktur der kristallinen Kruste unter dem Coloradobecken abgebildet (z. B. Hinz et al., 1999; Franke et al., 2006).

Die vorliegenden seismischen und seismologischen Daten sowie Bohrungsdaten waren in einer ersten Projektphase in ein dreidimensionales Strukturmodell integriert worden, das zusätzlich durch gravimetrische und thermische Modellierungen überprüft wurde. Mit diesem Modell des Coloradobeckens wurden die Hauptmerkmale der strukturellen Konfiguration vom Meeresboden bis hin zur Lithosphären-Asthenosphären-grenze, die Verteilung der physikalischen Eigenschaften und die Temperaturverteilung abgebildet (z. B. Autin et al., 2013, 2016; Abb. 2 und 3). Entsprechend löst das Modell eine Reihe von Elementen auf: verschiedene sedimentäre Einheiten der initialen Dehnungsphase (Riftphase) und der nachfolgenden Absenkungsgeschichte (Postriftphasen), eine hinsichtlich ihrer geophysikalischen Eigenschaften heterogene kristalline Kruste und den unterlagernden lithosphärischen Mantel.

Trotz der umfassenden Datenlage im Vorfeld war die Entwicklungsgeschichte des Beckens noch nicht verstanden worden.

Dabei war es insbesondere fraglich, wie stark und mit welchen Raten der passive Kontinentalrand Argentiniens während seiner rund 125 Mio. Jahre andauernden Postriftphase abgesunken ist. Um dieser Frage nachzugehen, wurde eine Rückwärtsmodellierung der Absenkungsgeschichte des Coloradobeckens durchgeführt.

Methodischer Ansatz zur Rekonstruktion der Absenkungsgeschichte

Als Basis für die Rekonstruktion der Absenkungsgeschichte der letzten 125 Ma wurde das 3D-Strukturmodell von *Autin et al. (2013, 2016)* verwendet. Dabei erfolgte die Rekonstruktion unter Anwendung einer Rückwärtsmodellierung. Diese Methode hat den Vorteil, dass keine theoretischen Annahmen zur Konfiguration des initialen Zustands (zum Beginn der Postriftphase vor 125 Ma) getroffen werden müssen, sondern – ausgehend von heutigen Beobachtungen – bekannte Anteile der Absenkung (Subsidenz) berechnet und schrittweise rückgängig gemacht werden.

Ziel der Modellierung war die Rekonstruktion von Paläowassertiefen für einzelne Zeitschritte, die den Verlauf der Absenkungsgeschichte abbilden. Dafür müssen vor allem zwei Hauptkomponenten der Subsidenz berücksichtigt werden: die lastinduzierte isostatische Subsidenz und die thermische Subsidenz. Die thermische Subsidenz ist das Resultat der Abkühlung der Lithosphäre nach der thermischen Destabilisierung in der initialen Dehnungsphase (Synriftphase). Die thermische Subsidenz hängt deshalb primär vom Ausmaß der initialen Dehnung ab. Ein Maß für diese Dehnung ist der Dehnungsfaktor, der sich aus dem Verhältnis der initialen (ungedehnten) Krustenmächtigkeit und der heute beobachteten Mächtigkeit der kristallinen Kruste (Krustenmächtigkeit nach der Dehnung) ergibt. Die lastinduzierte Subsidenz ergibt sich aufgrund der durch die abgelagerten Sedimente wirksamen Last.

Im Zuge der Rückwärtsmodellierung wird durch sukzessives Entfernen der einzelnen sedimentären Einheiten („Backstripping“) zunächst die lastinduzierte Subsidenz herausgerechnet. Das Entfernen der Last hat einen isostatischen Ausgleich zur Folge, d. h. einen dichtekontrollierten Auftrieb, wie er z. B. auch von Eisbergmodellen bekannt ist. Zusätzlich wird die durch die Auflast bedingte Kompaktion rückgängig gemacht: Nach Wegnahme einer Schicht werden die unterlagernden Schichten dekomprimiert, was sich in einer höheren Mächtigkeit bei geringerer Dichte manifestiert. Um diese Berechnungen durchzuführen, müssen die lithologische Zusammensetzung der Schichten und die damit zusammenhängenden Porositäts-gesetze berücksichtigt werden. Die dafür erforderlichen Informationen über die gesteinsphysikalischen Eigenschaften für das Coloradobecken wurden dem 3D-Modell von *Autin et al. (2013)* entnommen.

Während beim Backstripping auf diese Weise die lastinduzierte Subsidenz korrigiert wird, bleibt der Betrag der thermischen Subsidenz noch unberücksichtigt. Zur Bestimmung der Paläowassertiefe muss das Modell deshalb zusätzlich um den Betrag der thermischen Subsidenz für den entsprechenden Zeitschritt korrigiert werden. Diese Berechnung wurde nach dem Modell der Lithosphärendehnung von *McKenzie (1978)* durchgeführt.

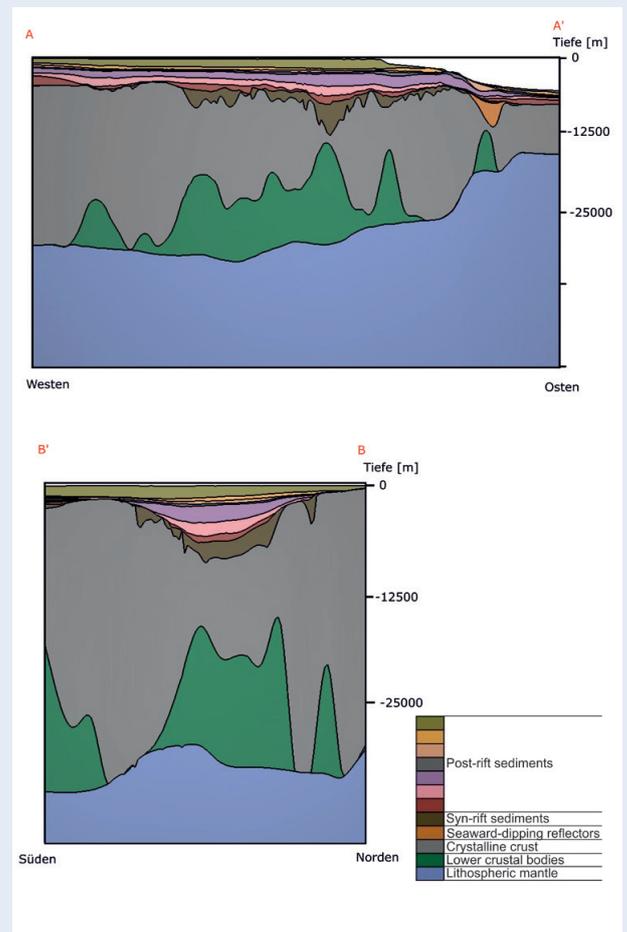


Abb. 3: 2D-Profil für das Coloradobecken (nach *Autin et al., 2013, 2016*). A) Ost-West verlaufendes Profil; B) Nord-Süd verlaufendes Profil. Abbildung 2 zeigt die Lage der Profile im Untersuchungsgebiet.

Fig. 3: 2D cross sections in the Colorado Basin (after Autin et al., 2013, 2016). A) East-west extending cross section. B) North-south extending cross section. See Fig. 2 for the locations of the cross sections.

Erkenntnisse

Durch beide Korrekturen (thermische und lastinduzierte Subsidenz) lassen sich Paläowassertiefen für einzelne Zeitschritte rekonstruieren, die in ihrer Abfolge die Subsidenzentwicklung abbilden, wenn das Gebiet durch keine weiteren tektonischen Ereignisse beeinflusst worden ist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der passive Kontinentalrand Argentiniens während der letzten 125 Ma kontinuierlich abgesunken ist, wobei die Wassertiefe, ebenfalls kontinuierlich, bis heute zunahm. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen, die für den konjugierten Kontinentalrand vor Südafrika erzielt wurden. Dort ergab die gleiche Methode der Rückwärtsmodellierung (Dressel et al., 2015) eindeutige Hinweise zu Hebungsphasen, die

die Absenkungsgeschichte zeitweise unterbrochen haben und zu signifikanten Aufwärtsbewegungen (bis zu 1200 m, Abb. 4 A) geführt haben.

Durch den Vergleich der rekonstruierten Absenkungsgeschichten an beiden konjugierten passiven Kontinentalrändern lassen sich etwaige Mechanismen diskutieren, die diesen unterschiedlichen Absenkungsgeschichten zu Grunde liegen. Dressel et al. (2016) diskutieren den Einfluss des „Ridge-push“, eine durch die Spreizung des Südatlantiks wirksame Intraplattenkraft. Diese Kraft wirkt senkrecht zur Spreizungsachse des mittelatlantischen Rückens und induziert kompressive Span-

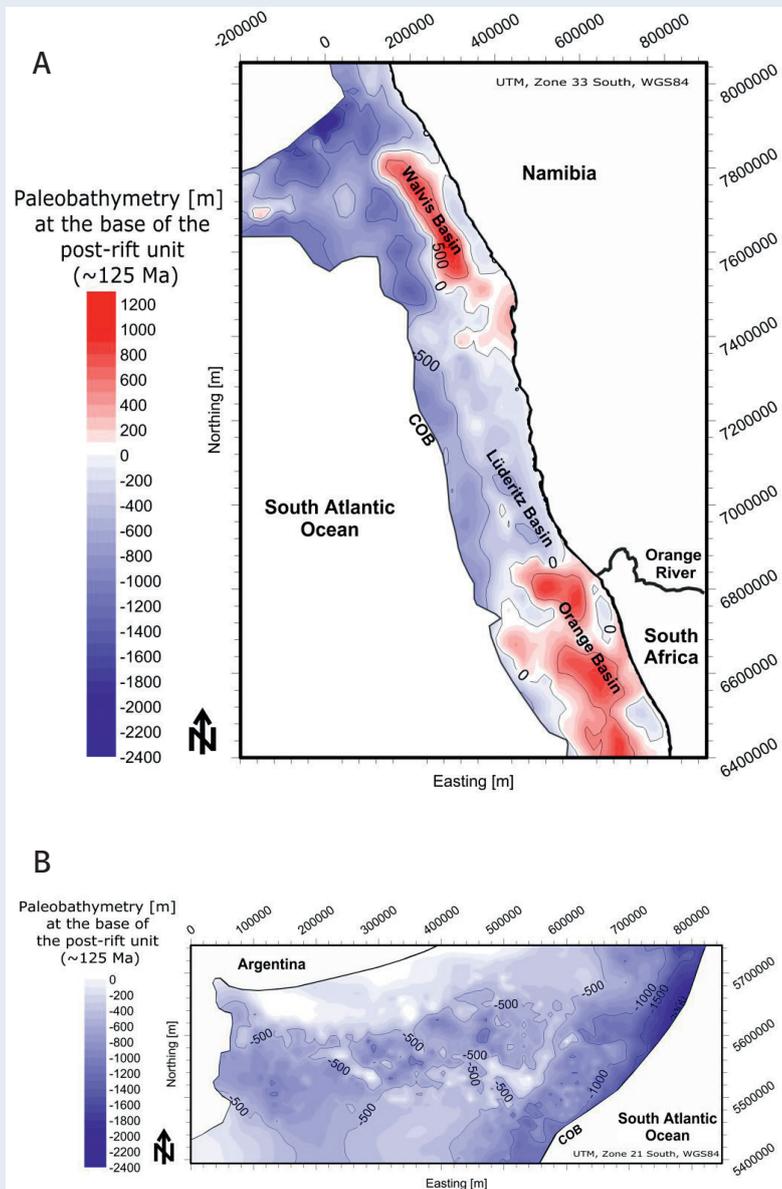


Abb. 4: Vergleich der Paläowassertiefen zu Beginn der Postriftphase (125 Ma): A) am Kontinentalrand vor Südafrika und Namibia (nach Dressel et al., 2015), B) am Kontinentalrand vor Argentinien (nach Dressel et al., 2016). Die Paläowassertiefen vor Argentinien deuten auf einen Ablagerungsraum zwischen 200 m und 2400 m unterhalb des Meeresspiegels und auf kontinuierliche Absenkung hin. Dagegen weisen die rekonstruierten Paläowassertiefen vor Südafrika und Namibia im Süden und im Norden Bereiche oberhalb des Meeresspiegels auf, welche einen Indikator für vertikale Aufwärtsbewegungen darstellen.

Fig. 4: Comparison of the paleobathymetries of the early post-rift phase (125 Ma). A) Paleobathymetry at the South African and Namibian continental margin (after Dressel et al., 2015). B) Paleobathymetry at the Argentinian continental margin (after Dressel et al., 2016). The paleobathymetry of the Argentinian margin indicates a sediment accommodation space of 200 m to 2400 m below sea level and a continuous subsidence. In contrast, the reconstructed paleobathymetry of the South African and Namibian margin in the South and North shows areas above sea level, which are indicators of vertical upward movements.

nungen an den Kontinentalrändern. Alternativ wird ein lokaler Mantelmechanismus im Bereich von Südafrika als Ursache für die dortige Hebung des Kontinentalrands in Betracht gezogen. Bei Letzterem werden Aufwärtsbewegungen an der Oberfläche durch aufsteigende Bewegungen im tiefen Mantel bewirkt. Dabei schlussfolgern Dressel *et al.* (2016), dass Ridge-push nicht die einzige Ursache für vertikale Bewegungen entlang der konjugierten passiven Kontinentalränder sein kann, da diese näherungsweise einen ähnlichen Einfluss auf beide Kontinentalränder haben müsste. Dies ist jedoch nur durch Aufwärtsbewegungen vor Südafrika, aber nicht vor Argentinien belegt. Somit ist es wahrscheinlicher, dass ein Mechanismus, wie z. B. eine thermische Anomalie, im Erdmantel unter Südafrika für die Aufwärtsbewegungen verantwortlich ist. Die Ergebnisse der Modellierung des argentinischen Kontinentalrands lassen hingegen einen solchen Mechanismus nicht erkennen.

Ausblick

Obwohl mit den oben beschriebenen Arbeiten von Dressel *et al.* (2015, 2016) und denen des gesamten SAMPLE-Schwerpunktprogramms zahlreiche Fragen in Bezug auf die Entwicklung des Südatlantiks beantwortet wurden, wäre es von großem wissenschaftlichen, aber auch wirtschaftlichem Interesse, die Erforschung der südatlantischen Sedimentbecken fortzusetzen, um so weitere Erkenntnisse über die Entwicklung des Südatlantiks zu erzielen. Insbesondere die Sedimentbecken nördlich des Coloradobeckens am Kontinentalrand Brasiliens stellen weitere Archive der Vergangenheit dar und könnten mit der bereits bekannten Konfiguration und Entwicklungsgeschichte der Sedimentbecken vor dem westlichen Afrika verglichen werden. Dadurch ließen sich weitere Erkenntnisse über die Entwicklung der Kontinentalränder im zentralen Bereich des Südatlantiks gewinnen. Auch wären weitere Studien des Zusammenhangs zwischen der Entwicklung der Paläowassertiefe und der Dynamik der Ozeanströmungen bzw. der Klimageschichte der letzten 65 Mio. Jahre eine sinnvolle Ergänzung. Ebenso müssen Studien zur Entwicklung der Anden und der damit verbundenen Deformation im Innern des Kontinents auch die Einflüsse der Entwicklung des Atlantiks berücksichtigen. Erste Schritte dazu werden bereits im Forschungsverbund „SuRfAce processes, Tectonics and Georeources in the Andean Foreland Basin of Argentina – StRATEGy“ (<http://irtg-strategy.de>) unternommen. StRATEGy ist ein internationales DFG-Graduiertenkolleg des GFZ gemeinsam mit der Universität Potsdam und mehreren argentinischen Universitäten sowie Forschungseinrichtungen. Möglichkeiten einer fortgesetzten Zusammenarbeit mit argentinischen Forscherinnen und Forschern werden zurzeit gemeinsam mit dem BMBF und der DFG auf deutscher Seite sowie CONICET und Universitäten auf argentinischer Seite diskutiert.

Literatur

- Autin, J., Scheck-Wenderoth, M., Götze, H.-J., Reichert, C., Marchal, D. (2016): Deep structure of the Argentine margin inferred from 3D gravity and temperature modelling, Colorado Basin. - *Tectonophysics*, 676, pp. 198-210.
- Autin, J., Scheck-Wenderoth, M., Loegering, M., Anka, Z., Vallejo, E., Rodriguez, J. F., Dominguez, F., Marchal, D., Reichert, C., di Primio, R., Götze, H.-J. (2013): Colorado Basin 3D structure and evolution, Argentine passive margin. - *Tectonophysics*, 604, pp. 264-279.
- Brune, S., Williams, S. E., Müller, R. D., Sobolev, S. (2016): Aus eins mach zwei: Geodynamische Modelle beschreiben Südamerikas Trennung von Afrika. – *System Erde*, 6, 2, pp. 4-9.
- Dressel, I., Scheck-Wenderoth, M., Cacace, M. (2016 online first): Backward modelling of the subsidence evolution of the Colorado Basin, offshore Argentina and its relation to the evolution of the conjugate Orange basin, offshore SW Africa. - *Tectonophysics*. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.007>
- Dressel, I., Scheck-Wenderoth, M., Cacace, M., Lewerenz, B., Götze, H.-J., Reichert, C. (2015): Reconstruction of the southwestern African continental margin by backward modeling. - *Marine and Petroleum Geology*, 67, pp. 544-555.
- Franke, D., Neben, S., Schreckenberger, B., Schulze, A., Stiller, M., Krawczyk, C. M. (2006): Crustal structure across the Colorado Basin, offshore Argentina. - *Geophysical Journal International*, 165, 3, pp. 850-864.
- Hinz, K., Neben, S., Schreckenberger, B., Roeser, H. A., Block, M., Goncalves de Souza, K., Meyer, H. (1999): The Argentine continental margin north of 48°S: sedimentary successions, volcanic activity during breakup. – *Marine and Petroleum Geology*, 16, 1, pp. 1-25.
- McKenzie, D. (1978): Some remarks on the development of sedimentary basins. – *Earth and Planetary Science Letters*, 40, 1, pp. 25-32.
- Schulz, H.-M., Scheck-Wenderoth, M., Sippel, J., Horsfield, B. (2014): Sedimentbecken im südlichen Afrika und ihre fossilen Kohlenwasserstoff-Ressourcen. - *System Erde*, 4, 2, pp. 26-31.