

# System Erde

GFZ-Journal

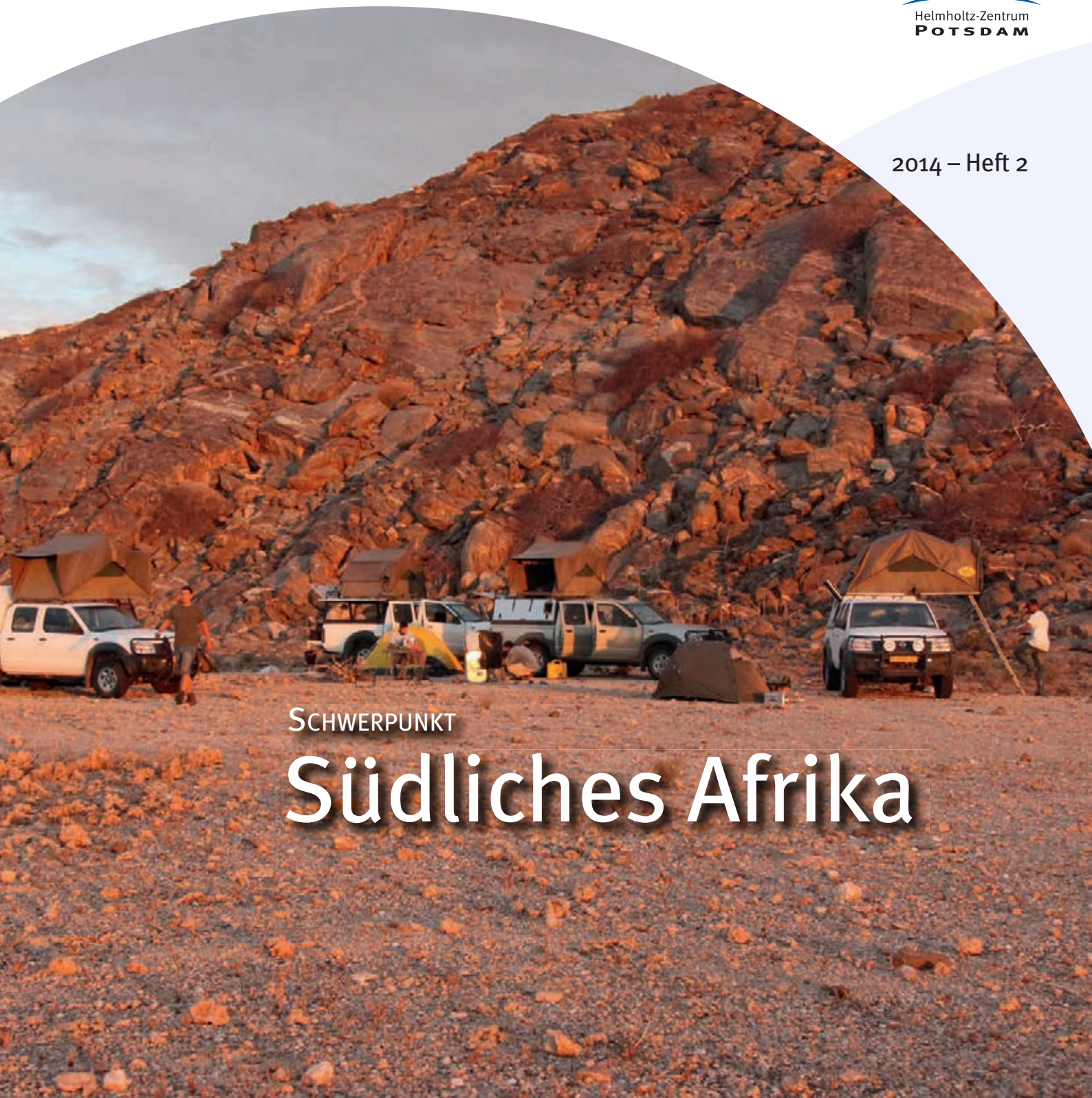
**GFZ**

Helmholtz-Zentrum  
**POTS DAM**

2014 – Heft 2

SCHWERPUNKT

**Südliches Afrika**





## Titelbild

*In den Jahren 2010 und 2011 fanden im Rahmen des DFG-finanzierten Schwerpunktprogramms SAMPLE umfangreiche amphibische geophysikalische Messungen in Namibias Norden und entlang des Atlantiks statt. Ziel dieser Messungen war es, die Strukturen der Kruste und des oberen Erdmantels im Zusammenhang mit der Öffnung des Südatlantiks vor rund 130 Mio. Jahren zu verstehen. Zu diesem Zweck wurden an Land seismische Messungen im Kaokoland und an der sogenannten Skelettküste, einer nahezu menschenleeren Region Namibias, durchgeführt. Für die Messungen wurden 200 seismische Stationen des Geophysikalischen Instrumentenpools (GIPP) vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ entlang von Profilen über insgesamt 900 km aufgebaut. Während der Feldmessungen wurde jeden Abend ein Feldcamp eingerichtet.*

*(Foto: Dr. Trond Ryberg, GFZ)*

## Impressum

### Herausgeber:

Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard Hüttl  
Dr. Stefan Schwartze

Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

### Redaktion:

Dr. Dietlinde Friedrich (Koordination)  
Dr. Oliver Bens  
Franz Ossing (V.i.S.d.P.)

### Layout:

UNICOM Werbeagentur GmbH  
Grit Schwalbe, GFZ

### Druck:

Brandenburgische Universitätsdruckerei, Golm

© Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ 2014  
ISSN 2191-8589



Alle Artikel auch im Internet verfügbar:  
[systemerde.gfz-potsdam.de](http://systemerde.gfz-potsdam.de)

# Editorial

## Schlüsselregion südliches Afrika



Das südliche Afrika mit seinen passiven Kontinenträndern zum Atlantik und zum Indik hin ist für die modernen Geowissenschaften ein paradigmatischer Raum zur Untersuchung der Prozesse, die vor Hunderten von Millionen Jahren zum Auseinanderbrechen des Urkontinents Gondwana geführt haben. Diese Prozesse und ihre Resultate umgreifen das gesamte System Erde, vom Erdkern bis ins Weltall. Während die heute aktiven Konvergenzränder der Kontinente uns Einblick in das aktuelle Geschehen der Plattentektonik geben, eröffnet Afrika einen anderen Blick in die Erdgeschichte, nämlich in die Entstehung von neuen Platten und damit verbunden die Entwicklung der Erdoberfläche in der wechselnden Konfigura-

tion von Kontinenten und Ozeanen. Die Forschungsergebnisse der letzten Dekaden zeigen uns, dass das Auseinanderbrechen des Urkontinents ein höchst komplexer Vorgang war und dass die neu entstandenen, gemeinhin „passiv“ genannten Kontinentränder keineswegs passiv sind, sondern eine dynamische Entwicklung mit vorherrschenden Vertikalbewegungen (Hebung, Senkung) durchlaufen. Das Wechselspiel von Hebung und Senkung steuert die Entwicklung der Landoberfläche durch Abtrag und Sedimenttransport vom Land ins Meer, wo tiefe Sedimentbecken entstehen, die wichtige Energieressourcen enthalten.

Die gängige Vorstellung eines gigantischen Mantelplumes, der den Urkontinent Gondwana so lange aufheizt bis er zerbricht, ist als Grundmuster zwar nicht falsch; im Detail jedoch sind diese Vorgänge bis heute noch nicht verstanden. Sie zu erklären, ist nicht nur geowissenschaftlich interessant: die Rohstoffe Afrikas, seine Gold-, Diamanten-, Seltene-Erden- und Platinvorkommen an Land sowie die Öl- und Gasressourcen offshore sind eng mit diesen Prozessen verbunden. Die Untersuchung der damit zusammenhängenden geowissenschaftlichen Fragestellungen ist eine Aufgabe, an der das GFZ, eingebunden in nationale und internationale Netzwerke, vor allem mit afrikanischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, arbeitet.

Vor diesem Hintergrund und zunehmend auch mit Blick auf den globalen Wandel wird verständlich, welche geostrategisch wichtige Position gerade das südliche Afrika einnimmt. Die zahlreichen Kooperationen mit Südafrika sind lebendiger Ausdruck für den aktiven wissenschaftlichen und kulturellen Austausch. Unter Führung des GFZ war „Inkaba yeAfrica“ von 2003 bis 2013 das zentrale Projekt des wissenschaftlichen Austauschs und eine der wichtigsten Säulen der Zusammenarbeit mit dem südlichen Afrika. „Inkaba“ ist ein Wort aus der Sprache der Xhosa das wörtlich übersetzt „Nabel“ bedeutet, im weiteren Sinn aber auch einen zentralen Ausgangspunkt bezeichnet, von dem Energie, Material und Wissen ausgehen und immer wieder regeneriert werden. Es bezeichnet so den umfassenden Ansatz, mit dem die Prozesse des Systems Erde vom Erdkern bis zum All erforscht werden. Das Deutsch-Südafrikanische Wissenschaftsjahr 2013 bekräftigte die Bedeutung dieser Kooperationen sowie deren Fortsetzung. Die Afrika-Strategie des BMBF 2014-2018 stellt Afrika als Partner in Bildung und Forschung in den Fokus.

Heute ist das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ im südlichen Afrika mit den wissenschaftlichen Aktivitäten SPACES, AMREP, SPP-SAMPLE, mit den ICDP-Bohrprojekten Barberton und Bushveld sowie mit Honorarprofessuren mit zwei Universitäten in Johannesburg, Südafrika, aktiv. Die vorliegende Ausgabe des GFZ-Journals zeigt einen Ausschnitt aus der umfassenden Forschung des GFZ in dieser Schwerpunktregion.

Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard F. Hüttl  
Wissenschaftlicher Vorstand

Dr. Stefan Schwartz  
Administrativer Vorstand



# Inhalt

**6** Das Entstehen und Auseinanderbrechen von Kontinenten  
Mit Geophysik auf den Spuren geodynamischer Prozesse im südlichen Afrika  
*Ute Weckmann, Sissy Kütter, Oliver Ritter, Trond Ryberg, Michael Weber*

**14** Manteldynamik und das Aufbrechen von Gondwana  
*Bernhard Steinberger, René Gaßmüller, Robert Trumbull, Stephan Sobolev, Michael Weber*

**20** Die lange Geburt eines Ozeans  
Numerische und plattentektonische Modelle beleuchten das Wie und Warum der Südatlantiköffnung  
*Sascha Brune, Christian Heine, Stephan Sobolev*

**26** Sedimentbecken im südlichen Afrika und ihre fossilen Kohlenwasserstoff-Ressourcen  
*Hans-Martin Schulz, Magdalena Scheck-Wenderoth, Judith Sippel, Brian Horsfield*

**32** Die Erosion des südafrikanischen Hochplateaus  
Folgerungen für Tektonik, Klimageschichte und die Nachhaltigkeit der Bodenbewirtschaftung  
*Samuel Niedermann, John Decker, Alexandre Kounov, Maarten de Wit*

## 62 Netzwerk

62 Wissenstransfer nach Südafrika: wissenschaftlicher Nachwuchs bekommt Einblick in die SIMS-Technologie

64 Internationales Forschungsprogramm zu Shale Gas in Südafrika

65 ICDP-Projekte in Südafrika

65 Weitere aktuelle internationale Kooperationen

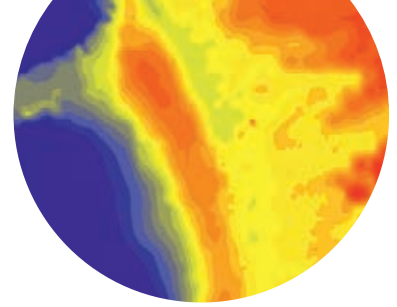
66 Wichtige internationale Besuche am GFZ

67 Untersuchung der Sonnenkorona mit Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

68 Iquique-Bebenereignis in Chile

69 Schluchten verschwinden durch flussabwärts fortschreitende Erosion

69 Tektonischer Staudamm



**38** Landschaftsentwicklung und Klimawandel im südlichen Afrika  
*Heinz Wilkes, Oliver Bens, Sabine Chabrilat, Kai Mangelsdorf, Jörg Völkel, Dirk Wagner, Achim Wehrmann*

**50** Anwendung der Fernerkundung in der Exploration und im Haldenmonitoring im südlichen Afrika  
*Christian Mielke, Christian Rogass, Nina Boesche, Hermann Kaufmann, Luis Guanter*

**46** Der Bushveld-Komplex: die größte Intrusion der Erde und wichtigste Quelle für mineralische Rohstoffe der Platinmetalle  
*Robert B. Trumbull, Ilya V. Veksler, David L. Reid*

**58** Magnetfeldbeobachtung im südlichen Afrika: regionale Daten zum Verständnis globaler Änderungen  
*Monika Korte*

70 Hochauflösende Karte des Grundgesteins der Antarktischen Halbinsel  
71 Wissenschaftlicher Feldversuch zur Rückförderung von CO<sub>2</sub>  
72 Pfannkuchen aus Lava  
73 ICDP-Trainingskurs „Wissenschaftliches Bohren in aktiven Störungszonen“

73 Seismologie-Trainingskurs: Hilfe zur Selbsthilfe  
74 Technologietransfer  
74 Neue Projekte  
**75 Ausgezeichnet**

# Das Entstehen und Auseinanderbrechen von Kontinenten

Mit Geophysik auf den Spuren geodynamischer Prozesse im südlichen Afrika

*Ute Weckmann, Sissy Kütter, Oliver Ritter, Trond Ryberg, Michael Weber  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

*Southern Africa in particular is a very special natural laboratory for a journey through the Earth's geo-archive. We can study tectonic processes on Early Earth as well as continental collision and breakup; and we learn how and why the African continent was blessed with mineral resources, such as diamonds or gold. With the beginning of the 20th century, geoscientists have started to set up observatories in South Africa to record earthquakes (since 1910) or conduct magnetic national surveys (Beattie, 1909). In Africa these geo-scientific pioneers found an ideal environment to study different tectonic units such as Cratons – ancient nuclei of continents, younger fold and orogenic belts as well as sediment basins and to investigate and classify their physical properties. The physical parameters applied were (i) elastic properties of rocks, which can be resolved using seismic and seismological observations and which allow to infer density information of rock formations, (ii) electrical conductivities which can be sensed using geo-electric, magnetotelluric (MT) und magnetometer-array measurements, (iii) magnetic properties, i.e. the ability of rocks to get magnetized, und (iv) the density of rocks which can directly be measured using gravity. The geophysics groups of the German Research Centre for Geosciences (GFZ) have been very active in South Africa since 2004 and have studied imprints of past continental collisions in the Earth crust and mantle along several traverses.*



Schon seit dem 15. Jahrhundert erkundeten Seefahrer die Küsten Afrikas. Die Entdeckungsreisen von Afrikaforschern erreichten später auch das Innere des Kontinents und dienten neben Vorbereitungen für die Kolonisierung des Kontinents vor allem auch der geowissenschaftlichen Erkundung.

Bis zur Gestaltung seiner heutigen Form hat der afrikanische Kontinent – wie jeder andere Kontinent auf der Erde – eine bewegte geodynamische Entwicklung erfahren. Dabei ist das südliche Afrika ein ganz besonderes natürliches Laboratorium, um diese Zeitreise durch das Geo-Archiv unserer Erde anzutreten. Hier lässt sich die Frühgeschichte der Erde untersuchen, das Zusammenschweißen und Auseinanderbrechen von Kontinenten besser verstehen und erfahren, wie Afrika zu dem Reichtum an Georessourcen, wie z. B. Diamanten oder Gold gekommen ist.

Schon seit Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts haben Geowissenschaftler begonnen, Observatorien aufzubauen, um z. B. Erdbeben aufzuzeichnen (ab 1910) oder das südliche Afrika magnetisch zu vermessen (Beattie, 1909). Die erstmalig durch Sir John Carruthers Beattie gefundene magnetische Anomalie, die in Südafrika den gesamten Kontinent in Ost-West-Richtung quert und sich in die heutige Antarktis und nach Südamerika fortsetzt, ist bis heute in ihrer Entstehung und Bedeutung nicht vollständig verstanden.

Die Beattie-Anomalie inspirierte Mitte des 20. Jahrhunderts neue Untersuchungen mit einem Netzwerk von hunderten von magnetischen Stationen im gesamten südlichen Afrika. Neben der magnetischen Anomalie fanden diese Geoforscher eine ebenso große elektrische Leitfähigkeitsanomalie, die in weiten Teilen räumlich mit der magnetischen zu korrelieren schien. Die Pioniere der geophysikalischen Erkundung fanden hier im südlichen Afrika eine ideale Umgebung, um verschiedene tektonische Einheiten, wie Kratone, die alten Kerngebiete von Kontinenten, die jüngeren Gebirgs- und Faltengürtel und Sedimentbecken, ganz grundsätzlich in ihren physikalischen Eigenschaften zu beschreiben und zu klassifizieren. Die dazu verwendeten Messgrößen, waren (i) die elastischen Eigenschaften

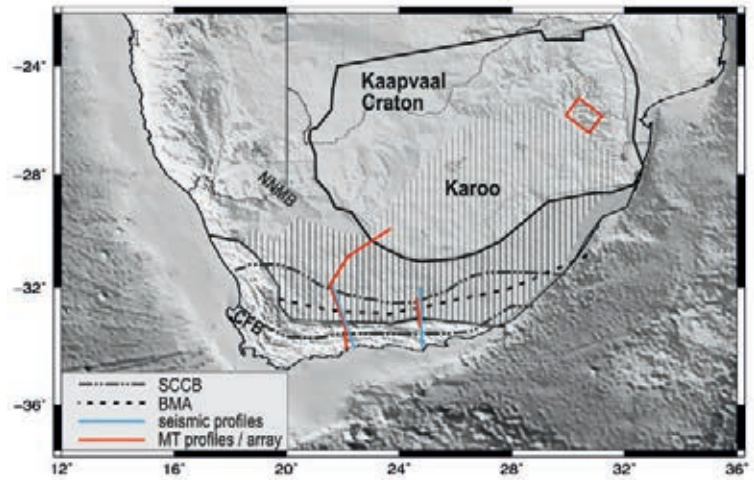


Abb. 1: Die südliche Spitze des afrikanischen Kontinents mit seinen großen tektonischen Einheiten, dem Kaapvaal-Kraton, dem Namaqua Natal Mobile Belt (NNMB) und dem Cape Fold Belt (CFB). Der schraffierte Bereich zeigt die Überdeckung des Grundgebirges mit den Sedimenten des Karoo-Beckens. Rote Linien markieren den Verlauf magnetotellurischer Profile. Blaue Linien zeigen den Verlauf seismischer Profile. Das rote Rechteck markiert den Umriss des Barberton MT-Stationsnetzwerks. BMA: Beattie Magnetic Anomaly, SCCB: Southern Cape Conductive Belt

Fig. 1: Southern Tip of the African continent with its major tectonic units, the Kaapvaal Craton, the Namaqua Natal Mobile Belt (NNMB) and the Cape Fold Belt (CFB). The hatched area indicates the sediments of the Karoo Basin overlying bedrocks. Red lines mark magnetotelluric profiles, blue lines indicate collinear seismic sections. The red square outlines the Barberton MT station array. BMA: Beattie Magnetic Anomaly, SCCB: Southern Cape Conductive Belt

ten der Gesteine, die sich mittels seismischer und seismologischer Messungen erschließen lassen und Rückschlüsse auf die Dichte der Gesteinsformationen zulassen, (ii) die elektrischen Eigenschaften (elektrische Leitfähigkeit), die mit magnetotellurischen (MT) und Magnetometer-Netzwerk-Messungen gewonnen werden, (iii) die magnetischen Eigenschaften – also die Fähigkeit eines Gesteins, sich magnetisieren zu lassen, und (iv) die Dichte der Gesteine, die sich direkt aus gravimetrischen Messungen ermitteln lässt.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ ist mit seiner Geophysik seit 2004 in Südafrika aktiv und hat seither verschiedene Geo-Traversen vermessen, um Spuren früherer Kontinentalkollisionen in Erdkruste und -mantel abzubilden (Weckmann et al., 2012).

Links: Magnetotellurische Station in der südafrikanischen Savanne im Barberton-Grünsteingürtel, Mpumalanga (Foto: G. Schmidt, GFZ)

Left: Magnetotelluric station in South Africa's savanna within the Barberton greenstone belt, Mpumalanga



Kontakt: U. Weckmann  
(ute.weckmann@gfz-potsdam.de)

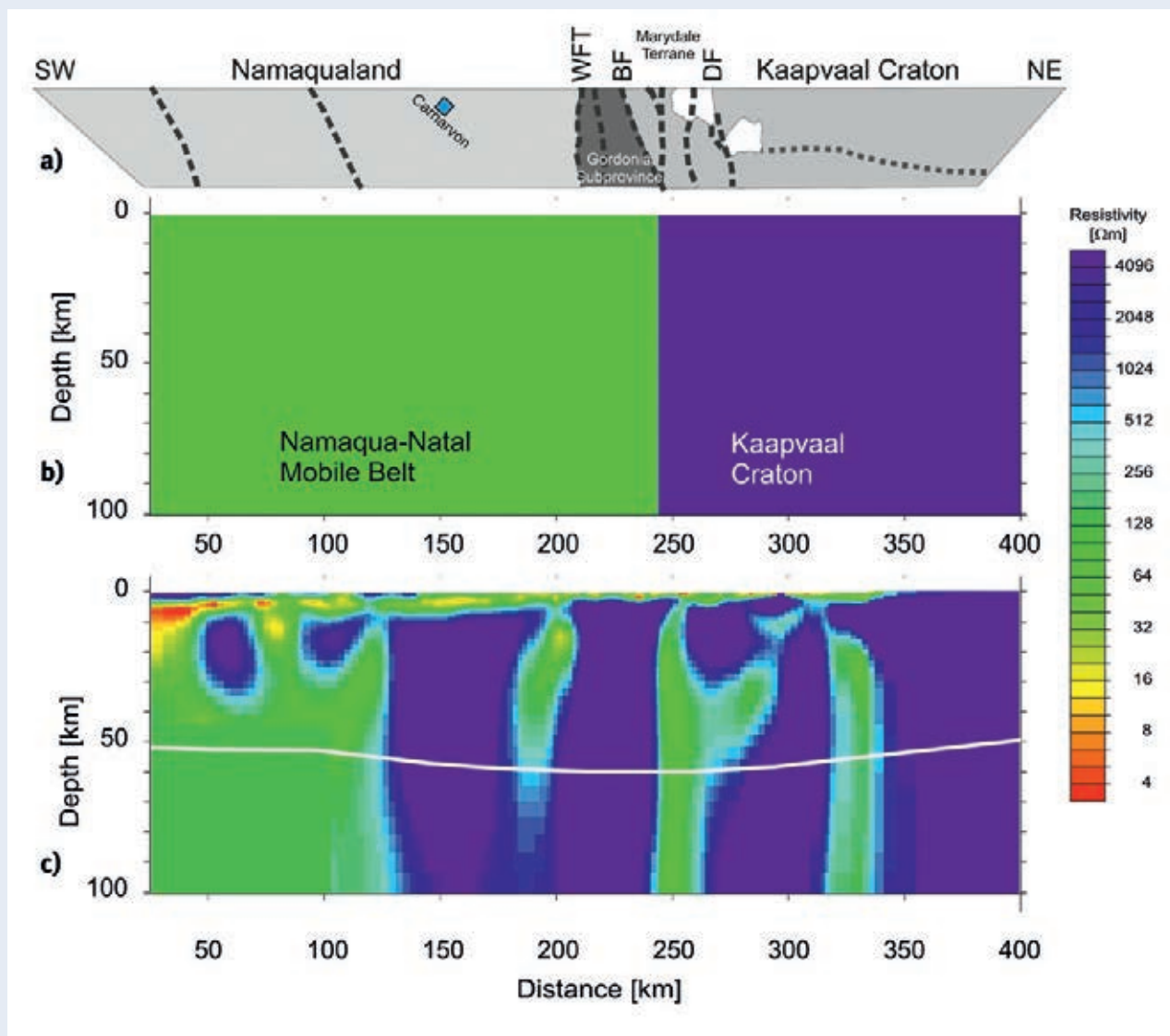


Abb. 2: a) MT-Profil über die Grenze zwischen Kaapvaal-Kraton und Namaqua Natal Mobile Belt. Wegen der Sedimentüberdeckung ist es schwierig, den Grenzverlauf zu kartieren; er wurde aufgrund von Untersuchungen weiter nördlich mit der Brakbos-Scherzone (BF) in Verbindung gebracht.  
 b) Aufgrund der normalerweise geringen elektrischen Leitfähigkeiten von archaischen Gesteinen (blau) sollte die Grenze zu dem jüngeren und besser leitenden Gebirgsgürtel (grün) durch einen scharfen vertikalen Kontrast markiert sein (siehe b).  
 c) Die Inversionsmodelle der MT-Daten zeigen dagegen extrem schlecht leitende Bereiche (blau) bis zu einer weiteren Störungszone weiter im Südwesten, was auf eine um rund 100 km weiter südlich liegende Kratongrenze schließen lässt.

Fig. 2: a) MT sections across the boundary between the Kaapvaal Craton and the Namaqua Natal Mobile Belt. Due to thick sedimentary cover, the exact boundary is difficult to map at surface. Geological mapping farther north suggested the Brakbos Fault (BF) as the boundary.  
 b) The old and dry cratonic rocks NE of the fault are expected to be resistive (blue colours) in contrast with lower resistivity (green colours) associated with rocks of the mobile belt.  
 c) The inversion model of MT data clearly show, however, high resistive structures (blue colours) reaching farther SW which suggests the craton boundary approx. 100 km farther SW.



## Die Frühgeschichte der Erde – wie haben sich Kontinente gebildet?

Der Begriff „Frühgeschichte“ umfasst die Zeitspanne des Hadaikums, dem Erdzeitalter vor mehr als 4 Mrd. Jahren, und des Archaikums vor 4 bis 2,5 Mrd. Jahren. Viele tektonische Prozesse, die wir heute auf der Erde beobachten, wie z. B. die Plattentektonik oder die Entwicklung kontinentaler Kruste, begannen bereits in der frühen Erdgeschichte. Besonders das erstmalige Einsetzen der Plattentektonik, also das Bewegen, Zusammenstoßen und Aufbrechen kontinentaler Blöcke, im Gegensatz zu im Wesentlichen vertikalen Massenverlagerungen und anschließender Abkühlung, wird kontrovers diskutiert (z. B. *van Kranendonk 2007, Hamilton 2003, de Wit 1993*). Der 3,2 Mrd. Jahre alte Barberton-Grünsteingürtel in Südafrika bietet ideale Voraussetzungen, um mögliche Spuren ehemaliger Plattenkollisionen in der Frühzeit der Erde aufzuspüren. Entscheidende Hinweise auf frühe tektonische Aktivität geben dabei entstandene Störungszonen und Abschiebungshorizonte in der Erdkruste. Obwohl diese Region geologisch gut untersucht ist, fehlten dazu bisher genaue geophysikalische Abbilder des tieferen Untergrunds, um ein konsistentes Erdmodell zu entwickeln.

In 2010 und 2011 hat das GFZ dort MT-Messungen mit flächiger Stationsüberdeckung durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen eine Reihe vertikaler, gering leitender Strukturen, die mit der Entstehung und Platznahme von Plutonen erklärt werden können. Störungszonen können hingegen nur in den oberen 5 km nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis deutet auf zwei mögliche Entwicklungsszenarien hin: (i) die Störungszonen waren vor mehr als 3,2 Mrd. Jahren bereits vorhanden und erleichterten den Aufstieg von heißem plutonischem Gestein oder (ii) die Störungszonen haben sich erst nach der Platznahme der Plutone im weiteren Verlauf der Erdgeschichte gebildet. Eine Antwort lässt sich hier nur mit Hilfe von Altersdatierungen der Gesteine finden.

## Der Kontinent Gondwana wächst

Im Laufe der Erdgeschichte kam es immer wieder zur Kollision von Kontinentalblöcken, die heute den robusten alten Kern der Kontinente bilden. Besonders im Proterozoikum vor rund 2,5 Mrd. Jahren kollidierten ozeanische Platten und jüngere Kontinentalblöcke mit dem kratonischen Nukleus und es entstanden hohe, stark deformierte Gebirge. Diese sogenannten Gebirgsgürtel waren in ihrem Verformungsverhalten insgesamt nachgiebig und verformbar, weshalb sie auch häufig als Schwächezone beschrieben werden, die z. B. Spannungen in der Erde besser absorbieren können. Diesen fundamentalen Unterschied haben schon die geophysikalischen Pioniere erkannt und untersucht. Allerdings verstehen wir erst heute mit

modernen geophysikalischen Messungen den Bauplan dieser tektonischen Einheiten. Die Agulhas Karoo-Traversen (Abb. 1) über dem südlichen Kontinentalrand Südafrikas erstrecken sich vom ozeanischen Agulhas-Plateau bis in den Kaapvaal-Kraton. Entlang dieser Traverse wurden magnetotellurische (MT) und seismische Messungen durchgeführt. Abbildung 2 zeigt ein Segment dieser Untersuchungen, den Übergang vom Namaqua Natal Mobile Belt (NNMB) in den Kapvaal-Kraton. Neben seiner Bedeutung für die Entwicklung des afrikanischen Kontinents kommt dem Kaapvaal-Kraton enorme wirtschaftliche Bedeutung zu. Mineralische Lagerstätten, inklusive Gold- und Diamantenvorkommen, sind an Kratone gebunden, da sie die dort herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen zur Entstehung benötigen. Die genaue Kenntnis der Kratongrenze ist daher von großem Interesse.

Der nördliche Teil der westlichen Agulhas Karoo-Traverse überquert diese Kratongrenze, die aber aufgrund der Überdeckung mit Karoo-Sedimenten nur schwer an der Oberfläche zu kartieren ist. Untersuchungen in besser zugänglichen Regionen legten die Brakbos-Verwerfung als Kratongrenze nahe. Da sich die elektrischen Leitfähigkeiten von kratonischen und den jüngeren Gesteinen der Faltengürtel um Größenordnungen unterscheiden, lässt sich diese Grenzregion mit magnetotellurischen Messungen gut abbilden. Abbildung 2b zeigt eine Skizze der zu erwartenden prinzipiellen Leitfähigkeitsverhältnisse: Die kratonischen Gesteine rechts der Störungszone sind durch geringe elektrische Leitfähigkeiten (blau) gekennzeichnet, während links davon die besser leitenden Gesteine des NNMB zu erwarten wären. Das tatsächliche, auf neuen MT-Daten basierende Widerstandsmodell (Abb. 2c) zeigt, dass sich gering leitendes Material auch weiter südwestlich der postulierten Kratongrenze befindet. Solche Ergebnisse sind wichtig für die Rohstoffexploration, sie zeigen, dass z. B. Diamantvorkommen auch weiter südwestlich erwartet werden können. Allerdings zeigt das Modell in Abb. 2c auch ein Problem für einen möglichen Rohstoffabbau: die grünliche Sedimentschicht über den kratonischen Gesteinen ist mit 5 bis 7 km Dicke zu mächtig, um solche Vorkommen wirtschaftlich rentabel zu erschließen.

Weiter im Süden überquert die Agulhas Karoo-Traverse die bereits erwähnte Beattie-Magnetikanomalie (BMA) und die bisher nicht erklärbare elektrische Leitfähigkeitsanomalie des südlichen Kaps (SCCB). Zu Zeiten der ersten Vermessung dieser Anomalie wurde eine gemeinsame Quelle von magnetischer und elektrischer Anomalie postuliert.

Die neueren MT-Daten des GFZ (Abb. 3b) mit einer rund 20-mal höheren Vermessungsdichte zeigen eine Zone stark erhöhter elektrischer Leitfähigkeit in einer Tiefe von 5 bis 10 km. Diese Struktur scheint generell mit der Lage der BMA übereinzustimmen (*Weckmann et al., 2007*). Die Modellierung vorhandener

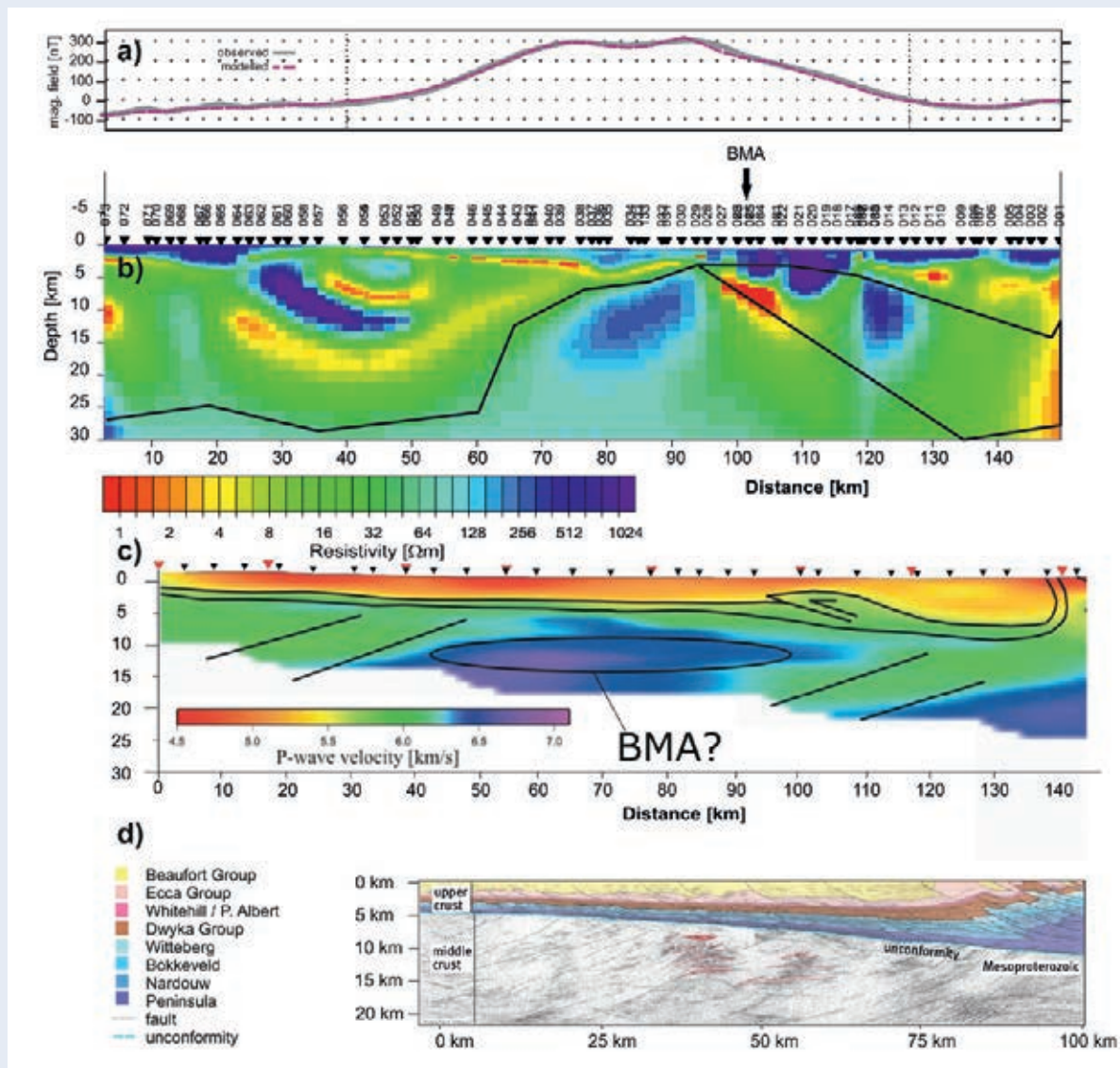


Abb. 3: Zusammenstellung der unterschiedlichen geophysikalischen Ergebnisse entlang des Westprofils:

a) Beobachtete und durch eine magnetisch anomale Struktur (schwarze Linie in b) modellierte magnetische Daten.

b) 2D-Inversionsergebnis der elektrischen Leitfähigkeit. Unter dem Maximum der Beattie-Magnetikanomalie ist eine Zone erhöhter Leitfähigkeit erkennbar (in roten Farben). Um die magnetischen Messdaten zu erklären, wird ein viel breiterer Block (schwarze Linie) mit erhöhter magnetischer Suszeptibilität benötigt, welcher mit schlecht leitenden Strukturen (in blauer Farbe) korreliert. Dies deutet darauf hin, dass die Zone erhöhter Leitfähigkeit eine krustale Scherzone innerhalb der Magnetikanomalie darstellt.

c) Seismische Tomographie, die einen Hochgeschwindigkeitskörper (in blauer Farbe) im Bereich der magnetisch anomalen Struktur zeigt.

d) Reflexionsseismisches Ergebnis, bei dem Schichtgrenzen und Zonen erhöhter Reflektivität sichtbar werden. Eine solche scheint mit der Lokation der Leitfähigkeitsanomalie (in b) zu korrelieren und zeigt somit ebenfalls eher eine krustale Störungszone innerhalb der Beattie-Magnetikanomalie.

Fig. 3: Compilation of different geophysical results along the western profile:

a) Observed and modelled magnetic data. The 2D magnetic model consist of a mid-crustal body of anomalous magnetic susceptibility (outlined by black lines in b).

b) 2D inversion result of the electrical conductivity distribution. Beneath the maximum of the Beattie Magnetic Anomaly a zone of high electrical conductivity (in red colours) can be observed. To explain the observed magnetic data, a broad crustal body (black line) with increased magnetic susceptibility encompassing resistive structures (blue colours) is required. This suggests that the high conductivity anomaly might be a crustal scale shear zone within the magnetized body.

c) Seismic tomography image shows a high velocity body (in blue colours) correlating with the region of the magnetic anomaly. d) Reflexion seismic result, showing formation boundaries and zones of high reflectivity; one of the latter seems to correlate with the location of the high electrical conductivity feature in b) and seems to support the existence of a shear zone.

Magnetikdaten legt aber nahe, dass die lateral ausgedehnte Anomalie von mehr als 300 nT (Abb. 3a) nur durch eine mehr als 100 km breite magnetisch anomale Zone in der mittleren und unteren Erdkruste erklärt werden kann (schwarze Linie in Abb. 3b). Die Leitfähigkeitsanomalie kann aber nur mit einer viel kleinräumigeren Struktur, etwa einer nach Süden hin einfallenden Störungszone, erklärt werden. Ein konsistentes Modell für diese beiden Beobachtungen schließt daher eine gemeinsame Quelle für beide Anomalien aus.

Komplementäre seismische Daten wurden in einem amphibischen Experiment (Land-Ozean-Messungen) beider Traversen aufgenommen. Mit dieser geophysikalischen Methode wurden die elastischen Eigenschaften der Gesteine im Untergrund gemessen, die sich über verschiedenen schnelle Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen bestimmen lassen. Die seismischen Druck- und Scherwellen werden durch Sprengungen in Bohrlöchern angeregt, die dann durch die unterschiedlichen Gesteinsformationen im Untergrund laufen und mit Seismometern aufgezeichnet werden (Abb. 5). Mit Hilfe

mathematischer Verfahren ist es möglich, die Geschwindigkeitsverteilung im Untergrund zu berechnen. Abbildung 2c zeigt ein solches Modell (Stankiewicz et al., 2008), das durch mehrere Geschwindigkeitsanomalien gekennzeichnet ist. Die vergleichsweise lockeren Sedimente des Karoo-Beckens und der Cape Supergroup sind als Strukturen mit langsamer Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (rot) gut von den dichteren Gesteinen des Grundgebirges, die höhere Geschwindigkeiten (blau) zeigen, zu unterscheiden. Das verwendete Verfahren der Refraktionsseismik erlaubt leider nur die Auflösung großräumiger Strukturen. Um hochaufgelöste Abbilder des Untergrunds zu erhalten, kam ein weiteres Messverfahren, die Reflexionsseismik, an einem ausgewählten Segment der westlichen Messlinie zur Anwendung. Mit dieser Methode können Geschwindigkeitskontraste, d. h. Grenzen zwischen geologischen Einheiten abgebildet werden. Abbildung 3d zeigt das Ergebnis entlang des gleichen Profils (Lindeque et al., 2007), das die Strukturen der Karoo-Sedimente sowie die darunterliegenden, komplexen Strukturen des Grundgebirges darstellt.

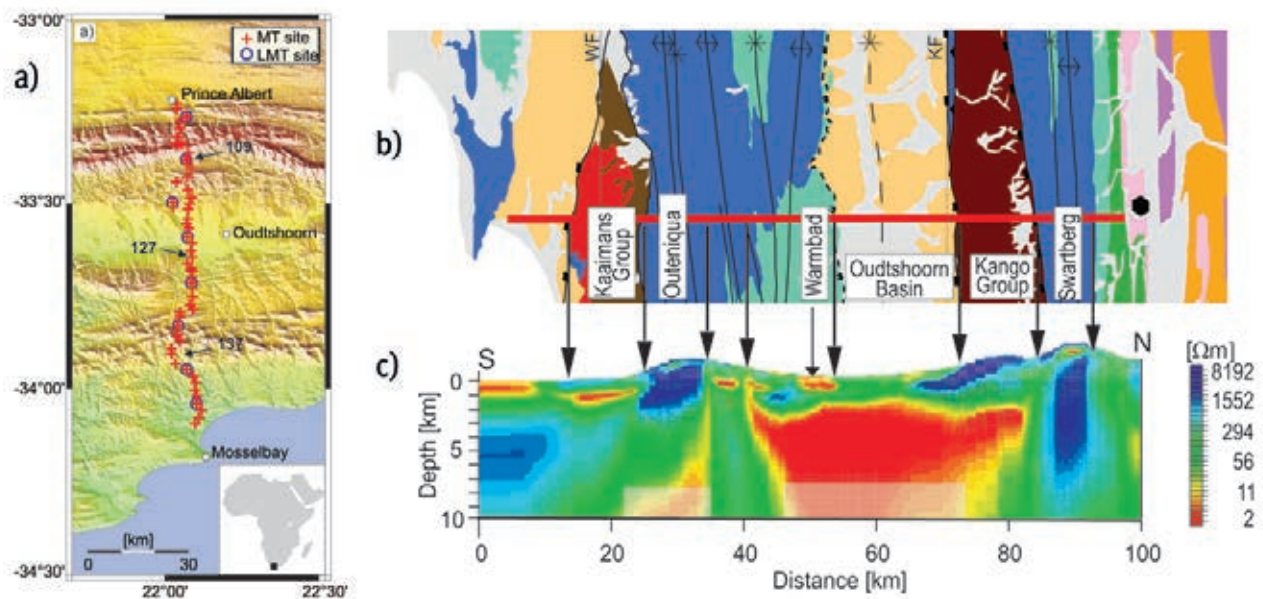


Abb. 4: a) Topographische Karte des Cape Fold Belts in Südafrika mit magnetotellurischen Messstationen (rote Kreuze).

b) Oberflächengeologie entlang des in a) gezeigten Stationsprofils.

c) Im Abbild der elektrischen Leitfähigkeit zeigen Gebirgszüge, wie der Swartberg und die Outeniqua-Berge gering leitende Gebirgsurzeln (blaue Farbe) bis in 2 km bzw. 7 km Tiefe. Unterhalb des Oudtshoorn-Beckens erscheint eine große Leitfähigkeitsanomalie (rote Farbe) ab einer Tiefe von etwa 3 km, die wahrscheinlich von heißen (und salzhaltigen) Wässern hervorgerufen wird.

Fig. 4: a) Topographical map of the Cape Fold Belts in South Africa with magnetotelluric stations (red crosses).

b) Surface geology along the profile shown in a).

c) In the image of electrical conductivity mountain ranges, like the Swartberg and the Outeniqua Mountains show poorly conductive roots (blue colours) down to depths of 2 km and 7 km, respectively. Below the Oudtshoorn Basin a large high conductivity anomaly (red colour) appears at a depth of about 3 km, possibly caused by hot (and saline) water.

Die Synthese aller geophysikalischen Ergebnisse ergibt, dass es sich bei der Quellregion der Beattie-Magnetikanomalie um einen mehr als 100 km breiten Körper mit erhöhter magnetischer Suszeptibilität handeln muss. Die Magnetikanomalie kann somit nicht ursächlich mit der beobachteten kleineren Hochleitfähigkeitszone korrelieren, sondern umfasst gering leitende Strukturen ebenso wie den Hochgeschwindigkeitskörper aus den seismischen Abbildern. Die unter dem Maximum der Beattie-Magnetikanomalie befindliche Zone erhöhter Leitfähigkeit sowie die erhöhte seismische Reflektivität lassen sich durch die Existenz einer krustalen Scherzone erklären, die durch den magnetischen Körper verläuft und eine kleine Undulation in den magnetischen Messdaten erzeugt.

### Jüngere Falteingürtel und Sedimentbecken

Abbildung 4 a zeigt die Stationsverteilung eines MT-Profiles durch den Cape Fold Belt in Südafrika (Weckmann *et al.*, 2012), der als letzte größere tektonische Einheit mit dem damaligen Superkontinent Gondwana vor etwa 250 Mio. Jahren kollidierte. Durch die enormen Kräfte bei der Kollision sind zwei Gebirgsketten (blaue/braune Farben in Abb. 4 b) aufgeschoben worden. Die Swartberge (Abb. 6) und die Outeniqua-Berge besitzen tiefe Gebirgswurzeln (Abb. 4 c), wogegen die Kango-Gruppe aufgrund dieses Leitfähigkeitsabbilds eher als flache Überschiebungsdecke zu interpretieren ist. Von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung für die Region könnte die große Leitfähigkeitsanomalie unterhalb des Oudtshoorn-Beckens sein. Sie zeigt höchst wahrscheinlich einen heißen (salinaren) Wasserspeicher in mehr als 3 km Tiefe an. Diese Beobachtung wird auch durch heiße Quellen, wie etwa im Ort Warmbad, gestützt.

### Ausblick

Generell helfen diese neuen Abbilder der tieferen Erdkruste existierende geologische Modelle, die vor allem auf Oberflächenbeobachtungen basieren, zu modifizieren und neue Erkenntnisse für die Entstehung von Kontinenten abzuleiten. Mit ihnen lässt sich ebenso das Ressourcenpotenzial, z.B. für Wassernutzung oder geothermische Energiegewinnung abschätzen. Zu diesen Themen sind weitere Experimente in Kombination mit flachen Bohrungen im Karoo- und Oudtshoorn-Becken von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des GFZ in Kooperation mit Partnern in Südafrika geplant.



Abb. 5: Blick aus dem Karoo-Becken auf das Eskarpment (Tafelberge) im Norden. Im Karoo-Becken und Kap-Falteingürtel wurden geophysikalische Experimente einschliesslich seismischer und magneto-tellurischer Messungen mit dem Ziel durchgeführt, die Struktur der Erdkruste zu erkunden. (Foto: T. Ryberg, GFZ)

Fig. 5: View from the Karoo Basin to the escarpment (table mountains) in the North. Through the Karoo Basin geophysical experiments, including seismic and magneto-telluric surveys, had been conducted to study the subsurface crustal structures.



Abb. 6: Stark gefaltete, 200 bis 300 Mio. Jahre alte Sedimente der Karoo-Supergruppe am Swartberg-Pass, nahe Prince Albert im südafrikanischen Kap-Faltengürtel (Foto: T. Ryberg, GFZ)

Fig. 6: Highly folded 200-300 Million years old sediments of the Karoo-Supergroup at the Swartberg Pass near Prince Albert in the Cape Fold Belt, South Africa

## Literatur

- Beattie, J. C. (1909): Report of the magnetic survey of South Africa, London: Cambridge University Press, 235 p.
- de Wit, M. J. (1998): On Archean granites, greenstones, cratons and tectonics: does the evidence demand a verdict?. - *Precambrian Research*, 91, 1-2, p. 181–226. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00043-6](http://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00043-6)
- Hamilton, W. B. (1998): Archean magmatism and deformation were not products of plate tectonics. - *Precambrian Research*, 91, 1-2, p. 143–179. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00042-4](http://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00042-4)
- van Kranendonk, M. J., Smithies, H., Bennett, V. (Eds.) (2007): Earth's oldest rocks, (Developments in Precambrian Geology; 15), Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 1307 p.
- Lindeque, A. S., Ryberg, T., Stankiewicz, J., Weber, M., de Wit, M. J. (2007): Deep Crustal Seismic Reflection Experiment Across the Sothorn Karoo Basin, South Africa. - *South African Journal of Geology*, 110, 2-3, p. 419-438. DOI: <http://doi.org/10.2113/gssajg.110.2-3.419>
- Stankiewicz, J., Parsieglä, N., Ryberg, T., Gohl, K., Weckmann, U., Trumbull, R., Weber, M. (2008): Crustal Structure of the Southern Margin of the African Continent: Results from Geophysical Experiments. - *Journal of Geophysical Research*, 113, B10313. DOI: <http://doi.org/10.1029/2008JB005612>
- Weckmann, U., Ritter, O., Jung, A., Branch, T., de Wit, M. (2007): Magnetotelluric measurements across the Beattie magnetic anomaly and the Southern Cape Conductive Belt, South Africa. - *Journal of Geophysical Research*, 112, B05416. DOI: <http://doi.org/10.1029/2005JB003975>
- Weckmann, U., Ritter, O., Chen, X., Tietze, K., de Wit, M. (2012): Magnetotelluric image linked to surface geology across the Cape Fold Belt, South Africa. - *Terra Nova*, 24, 3, p. 207-212. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.01054.x>
- Weckmann, U. (2012): Making and Breaking of a Continent: Following the Scent of Geodynamic Imprints on the African Continent Using Electromagnetics. - *Surveys in Geophysics*, 33, 1, p. 107-134. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10712-011-9147-x>
- Weckmann, U., Jung, A., Branch, T., Ritter, O. (2007): Comparison of electrical conductivity structures and 2D magnetic modelling along two profiles crossing the Beattie Magnetic Anomaly, South Africa. - *South African Journal of Geology*, 110, 2-3, p. 449-464. DOI: <http://doi.org/10.2113/gssajg.110.2-3.449>

# Manteldynamik und das Aufbrechen von Gondwana

Bernhard Steinberger, René Gaßmüller, Robert Trumbull, Stephan Sobolev, Michael Weber  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Southern Africa was part of Gondwanaland until the Mesozoic, when this supercontinent broke up into fragments that evolved into today's southern continents. In particular, around 140 Ma, rifting started between southern Africa and South America, followed by the opening of the South Atlantic after ~130 Ma. What caused this breakup is a subject of ongoing research. In particular, it is unclear whether, and to what extent, plumes from the deep mantle are a cause for, or at least assisted in the breakup, or whether, on the contrary, the flood basalt provinces attributed to plumes are a consequence of breakup. The Paraná and Etendeka flood basalts erupted ~132 Ma ago at a location nearly vertically above the margin of the African "Large Low Shear Velocity Province" in the lowermost mantle, indicative of a deep mantle plume. Plate reconstructions show that the plume was initially beneath the South American plate, but close to the breakup location, such that plume material could flow to and erupt at the developing spreading ridge. The plume was overridden by the ridge at ~90 Ma and has been under the African plate ever since. Plume-lithosphere interaction can also be addressed through active seismic surveys on land, and in combination with petrologic and geochemical studies of the flood basalts and dyke swarms, this work has led to many important new insights. In particular, it has been shown that mantle temperatures beneath Etendeka province were about 150 °C higher than the global mid-oceanic ridge average, thus further supporting the mantle plume hypothesis.*



Seit dem Präkambrium und bis vor rund 180 Mio. Jahren waren die südlichen Kontinente Südamerika, Afrika, Arabien, Madagaskar, Indien, Australien und Antarktis im Superkontinent Gondwanaland vereinigt. Schon Wegener (1915) rekonstruierte aufgrund geologischer Indizien die relative Lage der Kontinente in Gondwanaland auf eine Weise, die sich nur wenig von modernen Rekonstruktionen (siehe z. B. Abb. 1) unterscheidet.

Was dagegen die Gründe für das Auseinanderbrechen waren, und wie die Trennung in die heutigen Kontinente genau ablief, ist weiterhin das Thema aktueller Forschungen (vgl. Beitrag von *Brune et al. in diesem Heft*). Insbesondere wird kontrovers diskutiert, welche Rolle dabei Mantelplumes, d. h. zylinderförmige Aufströme aus dem untersten Erdmantel spielen, die unter zahlreichen sogenannten „Hotspots“ (Regionen mit Vulkanismus abseits der Plattengrenzen, wie Hawaii oder Tristan da Cunha, oder mit besonders intensivem Vulkanismus entlang der Plattengrenzen, wie Island) vermutet werden. Vor etwa 140 Mio. Jahren begannen Südamerika und Afrika sich voneinander wegzubewegen. Die Paran- und Etendeka-Flutbasalte (Foto links) entstanden etwa vor 132 Mio. Jahren und sind die ältesten voluminösen Basalte, die mit dem Mantelplume in Verbindung gebracht werden, der jetzt unter der Inselgruppe Tristan da Cunha vermutet wird. Wegen dieser zeitlichen Abfolge erscheint es unwahrscheinlich, dass der sogenannte Tristan-Plume tatsächlich die Ursache der Fragmentierung des südlichen Teils des Superkontinents ist. Jedoch bewegten sich die Kontinentfragmente nach der Eruption der Flutbasalte schneller voneinander weg, und erst danach begann der Südatlantik auf seiner gesamten Länge aufzubrechen. Dies deckt sich mit der Interpretation von *Buiter (2014)*, die aufgrund neuerer Forschungen die These vertritt, dass Plumes an sich keine Kontinente auseinanderbrechen können, aber dass, wenn sie auf einen Kontinent treffen, der sich bereits in langsamer Extension befindet, sich die Verformung über den Plumes konzentriert. Sie können daher ein entscheidender Faktor für das Auseinanderbrechen kontinentaler Platten sein. Eine wichtige Rolle scheinen auch bestehende Schwächezonen zu spielen, die z. B. an den „Schweinahnten“ entlang der Zonen früherer Kollisionen von Kontinenten, aus

denen Gondwana hervorgegangen ist, bestehen. Die Auswirkungen und geophysikalischen Signaturen solcher Kollisionszonen werden in dem Beitrag von *Weckmann et al. in diesem Heft* behandelt.

Innerhalb des DFG-Schwerpunktprogramms (SPP) „SAMPLE“ (South Atlantic Margin Processes and Links with onshore Evolution) werden am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ gemeinsam mit Partnerinstitutionen Forschungen durchgeführt, die dabei helfen sollen, besser zu verstehen, wie insbesondere der Tristan-Plume das Aufbrechen des Südatlantiks beeinflusst hat. Die Fragestellungen werden multidisziplinär behandelt; insbesondere werden sowohl numerische Modellierungen durchgeführt, als auch in Feldkampagnen zu Land und auf See neue Beobachtungsdaten (z. B. seismisch und magnetotellurisch) gesammelt, die dann mit Modellrechnungen verglichen, oder als Randbedingungen für die Modelle vorgegeben werden können.

## Entstehung von Plumes im untersten Erdmantel

Da sich oberhalb der Kern-Mantel-Grenze eine thermische Grenzschicht mit rund 1000 K Temperaturkontrast befindet, bilden sich in numerischen Modellen der Mantelkonvektion, die diese Grenzschicht enthalten, dort zumeist Aufstrome in der Form von Mantelplumes. Diese beginnen typischerweise mit dem Aufsteigen eines großen Plumekopfs, der dann von einem dünneren Plumekanal gefolgt wird. Letzterer kann sehr stabil für 100 Mio. Jahre und länger sein. Allerdings bilden sich in Modellen, die Plattenrekonstruktionen als obere Randbedingung für die Geschwindigkeit vorgeben, diese Plumes üblicherweise nicht spontan, sondern werden zumeist durch subduzierte Lithospharensegmente, sogenannte Slabs, ausgelöst, wenn diese in den unteren Mantel eintauchen und besenartig dabei die thermische Grenzschicht vor sich herschieben (vgl. *Sobolev und Steinberger, 2012*).

Auch gibt es Indizien dafür, dass sich im untersten Mantel chemisch unterschiedliches, schwereres Material befindet. Wenn dieses ebenfalls in den numerischen Modellen berücksichtigt wird, wird es von den Slab-„Besen“ im wesentlichen zu zwei thermochemischen Haufen zusammengefeht, einer unter Afrika und einer unter dem Pazifik, in ähnlicher Lage wie die beiden Groprovinzen erniedrigter Scherwellengeschwindigkeit (Large Low Shear Velocity Provinces, LLSVP) im untersten Mantel (vgl. Abb. 3, oben Mitte und rechts). Plumes bilden sich dann zumeist an deren Rändern (vgl. Abb. 3, oben links und Mitte). Der westliche Rand des afrikanischen Haufens befindet sich ziemlich genau dort, wo der Südatlantik vor rund 130 Mio. Jahren aufgebrochen ist. An diesem Rand ergibt sich im Modell ein Aufstrom, der flächenförmig im unteren Mantel beginnt, aber

Links: Die Tafelberge der Etendeka-Flutbasalte in Namibia entstanden aus Schmelzbildung im Erdmantel vor rund 132 Mio. Jahren, also zu der Zeit, als sich der Südatlantik zu öffnen begann. (Foto: I. Veksler, GFZ)

Left: The Etendeka flood basalts in Namibia formed by mantle melting around 132 Ma ago, at the time when the southern Atlantic began opening.



Kontakt: B. Steinberger  
(bstein@gfz-potsdam.de)

nach oben hin schmaler und zylinderförmiger wird und sich in einer ähnlichen Position wie der Mantelplume unter Tristan da Cunha befindet.

### Die Paraná- und Etendeka-Flutbasalte als Folge des Mantelplumes

Neben mechanischen Prozessen wie Hebung, Ausdünnung oder Bruchbildung in der Lithosphäre, kann ein aufsteigender Plume auch Bereiche des oberen Mantels partiell aufschmelzen. Es entstehen magmatische Provinzen gewaltigen Ausmaßes, die „Large Igneous Provinces“ (LIP), die durch die weit ausgedehnten Lavafelder der so genannten Flutbasalte bekannt sind. Die Paraná-Etendeka-Flutbasaltprovinz ist ein Beispiel dafür. Nach mehr als 130 Mio. Jahren Erosion sind heute nur noch Reste der Flutbasaltfelder erhalten: die markanten Tafelberge in NW-Namibia und Brasilien (Foto Seite 14). Es treten aber vielerorts auch basaltische Intrusivgänge auf, welche die Förderspalt für die inzwischen meist erodierten Flutbasaltdecken darstellen.

Ein Hauptziel der Forschung im SPP-SAMPLE lag in der Ermittlung der Temperatur- und Druckbedingungen der Schmelzbildung im Mantel durch petrologische Untersuchungen der Flutbasalte bzw. der Intrusivgänge. So konnten *Keiding et al. (2011)* zeigen, dass die Manteltemperaturen unter der Etendeka-Flutbasaltprovinz etwa 150 °C höher lag als der globale Durchschnittswert für die mittelozeanischen Rücken. Ähnlich hohe Temperaturen wie in der Etendeka-Provinz wurden für die klassischen Hotspot-Inseln wie Hawaii und Island ermittelt, was die Hypothese eines Mantelplumes unter der Paraná-Etendeka-Provinz bestätigt.

Da sich die rekonstruierte Position für die Entstehung der Paraná- und Etendeka-Flutbasalte vor rund 132 Mio. Jahren, ebenso wie für zahlreiche weiterer Flutbasalte während der letzten 300 Mio. Jahre, über dem Rand einer LLSVP befindet, schließen Torsvik et al. (2008) daraus, dass sich die entsprechenden Haufen seit ~300 Ma oder länger in annähernd der gleichen Lage befunden haben. Die Modellergebnisse liefern also weitere Hinweise darauf, dass der Tristan-Hotspot und die Paraná- und Etendeka-Flutbasalte einen Ursprung im tiefen Erdmantel haben und mit der Öffnung des Südatlantiks primär in Zusammenhang stehen.

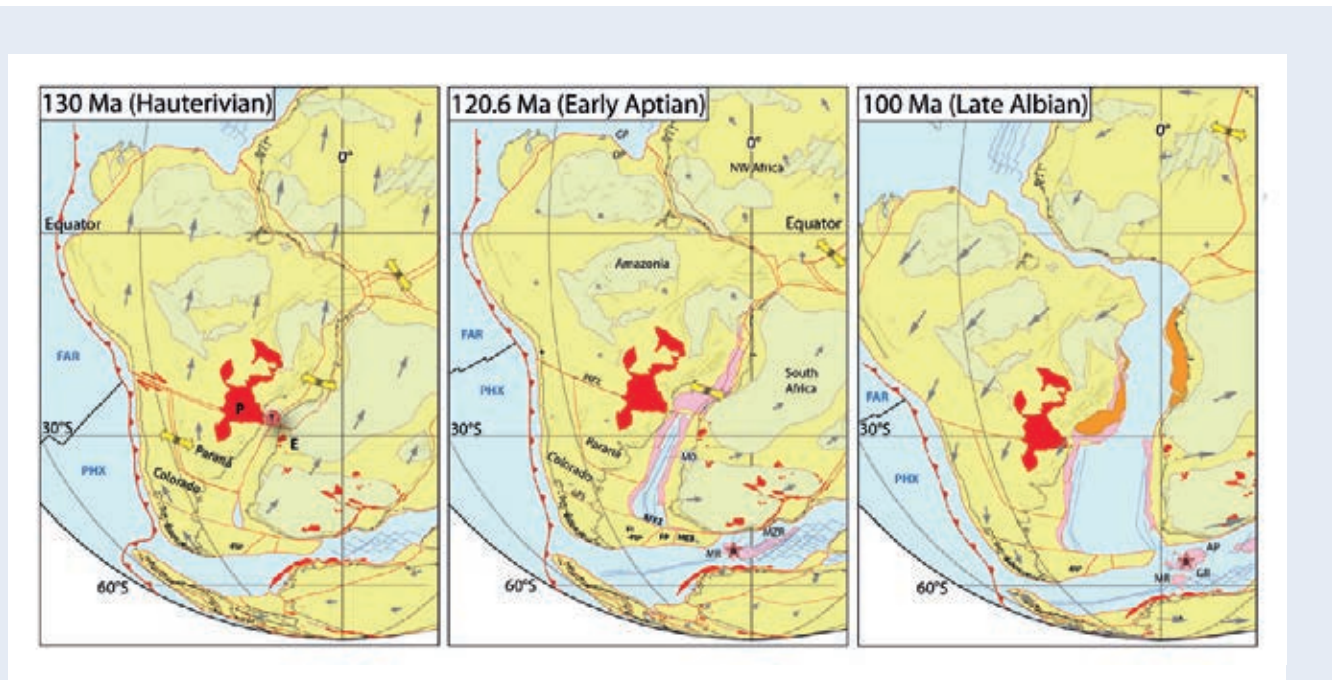


Abb. 1: Plattentektonische Rekonstruktion für den Südatlantik und Nachbarkontinente. Zwischen 140 und 120 Mio. Jahren vor heute bewegen sich die Paraná- und Colorado-Platten unabhängig von der Südamerikanischen Platte; deshalb öffnete sich der südliche Teil des Südatlantiks zuerst. Nach Torsvik et al. (2009)

Fig. 1: Plate tectonic reconstruction for the South Atlantic and neighbouring continents. Between 140 Ma and 120 Ma Paraná and Colorado plates moved separately from South American plate; thus southern part of South Atlantic opened first. After Torsvik et al. (2009)



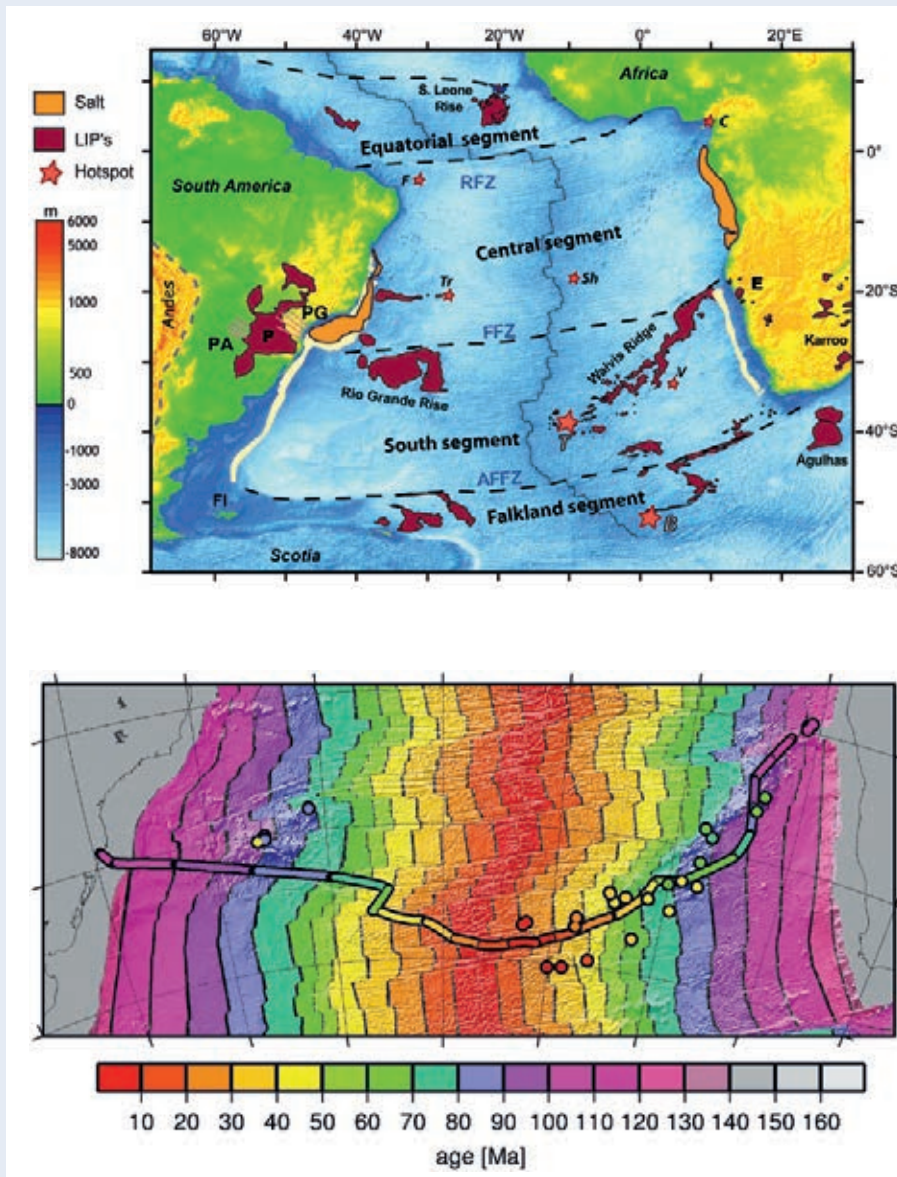


Abb. 2: Oben: Verteilung von vulkanischen Großprovinzen (LIP) im Südatlantik und benachbarten Kontinenten (P=Paraná, E=Etendeka). Außerdem gezeigt sind Bruchzonen (FFZ=Florianopolis-Bruchzone) und aktive Hotspots (rote Sterne; T=Tristan, B=Bouvet). Reproduziert von Torsvik et al. (2009). Unten: Ozeanbodenalter (www.earthbyte.org). Auf derselben Farbskala gezeigt sind eine Kompilation gemessener Altersdaten (Kreise) sowie die berechnete Spur direkt über dem Tristan-Plume (Dobrovine et al., 2012) auf der Afrikanischen und Südamerikanischen Platte.

Fig. 2: Above: Distribution of Large Igneous Provinces (LIPs) in the South Atlantic and neighbouring continents (P=Parana, E=Etendeka). Also shown are fracture zones (FFZ=Florianopolis Fracture Zone) and active hotspots as pink stars (T=Tristan, B=Bouvet). Reproduced from Torsvik et al. (2009). Below: Sea floor age (www.earthbyte.org). Shown with the same color scale is a compilation of measured age dates (circles) and the computed track directly above the Tristan plume (Dobrovine et al., 2012) on the African and South American plates.

### Die Lage des Tristan-Plumes relativ zum mittelatlantischen Rücken

Um den Zusammenhang zwischen dem Tristan-Plume und der Öffnung des Südatlantiks besser zu verstehen, ist es zunächst wichtig, eine Vorstellung über deren relative Lage zu haben. Dazu dienen plattentektonische Rekonstruktionen. Ursprünglich wurden diese Rekonstruktionen unter der Annahme erstellt, dass sich Mantelplumes und die darüber liegenden Hotspots nicht bewegen. Aus der gemessenen Altersabfolge von Vulkaniten entlang der Hotspot-Spuren (siehe z. B. Kreise in Abb. 2, unten) lassen sich dann absolute Plattenbewegungen ableiten. Hotspots sind jedoch nur annähernd ortsfest und es zeigt sich,

dass die Rekonstruktionen verbessert werden, wenn man die Bewegung der Plumes berücksichtigt. Diese im Vergleich zu Plattenbewegungen langsamen Bewegungen lassen sich aufgrund von Modellen der Mantelströmung und Annahmen darüber, wie Plumes durch den konvektierenden Mantel aufsteigen, berechnen. Indem berechnete und beobachtete Altersabfolgen entlang verschiedener Spuren von Hotspots (inkl. Tristan) möglichst gut zur Übereinstimmung gebracht werden, lässt sich so ein absolutes Bezugssystem für Plattenbewegungen ermitteln. Abbildung 2 unten zeigt die so berechnete Spur und Altersabfolge für den Tristan-Hotspot seit 120 Mio. Jahren auf sowohl der Südamerikanischen als auch der Afrikanischen Platte. Diese kann strenggenommen nur dann einer tatsächlichen

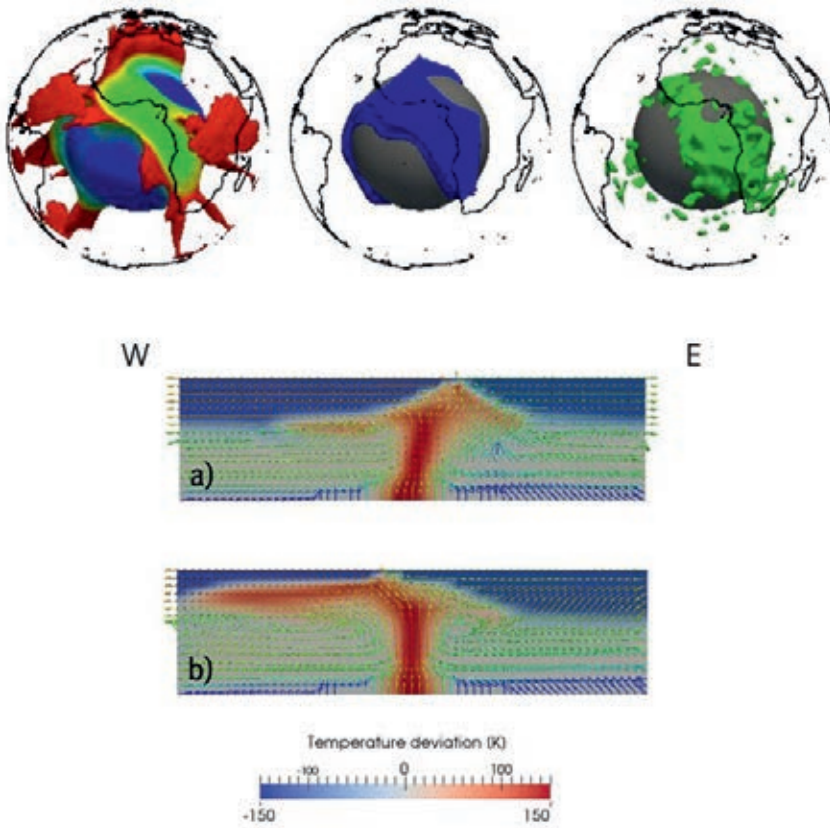


Abb. 3: Ergebnisse von numerischen Rechnungen zur Entstehung von Plumes und der Wechselwirkung mit mittelozeanischen Rücken. Oben links: Berechnete gegenwärtige Verteilung von Mantelplumes, gezeigt als 250 K-Isofläche der Temperaturanomalie. Die Farbe entspricht der Höhe über der Kern-Mantel-Grenze. Oben Mitte: Berechnete Lage von thermochemischen Haufen oberhalb der Kern-Mantel-Grenze. Oben rechts: Zum Vergleich die Afrikanische „Large Low Shear Velocity Province“ (LLSVP) gezeigt als -1,5 %-Isofläche des S40RTS-Tomographiemodells. Unten: Berechnete West-Ost-Querschnitte durch den Tristan-Plume im oberen Mantel für 100 Mio. Jahre (a) und 80 Mio. Jahre vor heute (b).

Fig. 3: Numerical modeling results concerning the generation of plumes and their interaction with mid-oceanic ridges. Top left: Computed present-day distribution of mantle plumes, shown as 250 K temperature anomaly isosurface. Color corresponds to height above the core-mantle boundary (CMB). Top center: Computed position of thermochemical piles above the CMB. Top right: For comparison, the African "Large Low Shear Velocity Province" (LLSVP) shown as -1.5 % isosurface of the S40RTS tomography model. Bottom: Computed West-East cross sections through the Tristan plume in the upper mantle at 100 Ma (a) and 80 Ma (b).

Spur entsprechen, wenn sich der Hotspot zu einer gegebenen Zeit tatsächlich unter der entsprechenden Platte befunden hat. Falls sich der Hotspot jedoch in der Nähe des Rückens befindet, kann gleichzeitig eine Spur auf beiden Platten (für den Tristan-Hotspot: Rio Grande Rise auf der südamerikanischen, Walvis-Rücken auf der afrikanischen Seite) entstehen, indem Material dort zum Rücken fließt, wo die Lithosphäre am dünnsten ist und hier zu vermehrtem Vulkanismus führt. Dieses Phänomen wird von *Sleep (1997)* beschrieben und als „upside down drainage“ (umgedrehtes Abfließen) bezeichnet. Aus dem Vergleich des Alters entlang der Hotspot-Spur mit dem (in Abb. 2 auf derselben Farbskala dargestellten) Ozeanbodenalter lässt sich der Abstand zwischen Plume und Rücken zur entsprechenden Zeit ableiten.

Entsprechend der in Abb. 2 dargestellten Hotspot-Spur und der Rekonstruktion in Abb. 1 ergibt sich folgendes Szenario: Der Plume befand sich zunächst, als vor rund 132 Mio. Jahren die Paran- und Etendeka-Basalte entstanden, unter der S-amerikanischen Platte, rund 500 km nordwestlich der Zone, wo

Afrika und S-amerika begannen auseinanderzubrechen. Dies ist konsistent damit, dass die Paran-Flutbasalte auf der S-amerikanischen Platte wesentlich ausgedehnter sind als die Etendeka-Provinz auf afrikanischer Seite. Da beide Platten sich nach Norden bewegten, befand sich der Plume spätestens seit etwa 120 Mio. Jahren südlich der Florianopolis-Bruchzone (FFZ, Abb. 2 oben). Letztere entstand aus einer Blattverschiebung, entlang derer sich die Paran- und Colorado-Platten bis etwa 120 Mio. Jahre relativ zur S-amerikanischen Platte westwärts verschoben (Abb. 1, links). Dadurch öffnete sich der Südatlantik zunächst hauptsächlich südlich der Verschiebung. Ab etwa 120 Mio. Jahre wurden die Paran- und Colorado-Platten Teil der S-amerikanischen Platte, d. h. es erfolgten keine relativen Verschiebungen mehr und der Südatlantik öffnete sich gleichmäßig auf der ganzen Länge.

Zur Zeit der Öffnung des Südatlantiks ist also vermehrter Offshore-Vulkanismus südlich der FFZ zu erwarten, weil (1) diese einer rechtslateralen Blattverschiebung entlang des Rückens entspricht, so dass sich südlich davon der Rücken näher am Hotspot befand, und (2) sich südlich davon der Atlantik

bereits weiter geöffnet und deshalb die Lithosphäre stärker verdünnt hat. Aus beiden Gründen konnte also mehr Material südlich davon durch „upside down drainage“ zum Rücken fließen. Im Laufe der Zeit wanderte der Rücken zunehmend weiter nach Westen, weil sich Südamerika vergleichsweise schnell westwärts bewegte, während sich Afrika nur langsam ostwärts verschob. Zudem spielte eine Rolle, dass in der Anfangsphase das Auseinanderbrechen asymmetrisch verlief: Die Rift-Achse verlagerte sich dadurch in einem Zeitraum von 20 Mio. Jahren zusätzlich mehr als 200 km Richtung Südamerika (vgl. Beitrag von *Brune et al. in diesem Heft*). Vor etwa 90 Mio. Jahren bewegte sich der Rücken über den Plume hinweg und seitdem befindet sich der Plume unter der Afrikanischen Platte. Dies entspricht in etwa einer Änderung des Charakters des Walvis-Rückens: Der ältere Teil (demnach am Spreizungsrücken entstanden) ist vergleichsweise breit und glatt, während der jüngere Teil aus einzelnen untermeerischen Vulkanen, sogenannten Seamounts besteht, die in Ketten angeordnet sind und durch Intraplattenvulkanismus entstanden sind.

Abbildung 3 (unten) zeigt vertikale Ost-West-Schnitte durch eine numerische 3D-Simulation dieses Prozesses: Vor 100 Mio. Jahren (a) befindet sich der Plume noch unter der Südamerikanischen Platte, es fließt aber bereits Material zum Rücken. Vor 80 Mio. Jahren (b) ist der Plume über den Rücken hinweggewandert. Die Strömung vom Plume zum Rücken ist zu diesem Zeitpunkt stärker, weil wegen der vergleichsweise schnellen Westwärtsbewegung der Südamerikanischen Platte auch Material in der den Platten unterliegenden Asthenosphäre leichter westwärts strömt. Auch ist als Nachwirkung von der Zeit, zu der der Plume unter der Südamerikanischen Platte lag, die Lithosphärenplatte (in blau) auf südamerikanischer Seite dünner und die Asthenosphäre heißer (in rot).

## Fazit

Das hier vorgestellte Modell erklärt einige Beobachtungen der Manteldynamik im Bereich des Südatlantiks recht gut, es bleiben aber auch Fragen offen. Zum Beispiel bleibt ungeklärt, warum sich auf dem älteren Ozeanboden auf südamerikanischer Seite (westlich des Rio Grande Rise) kein extensiver Vulkanismus findet, obwohl doch zu der Zeit, als sich dieser Ozeanboden bildete, der Hotspot unter der Südamerikanischen Platte in der Nähe des Rückens befand. Auch ist es schwierig zu erklären, warum der jüngere Teil des Walvis-Rückens zum Teil aus mehreren parallelen Seamount-Ketten besteht. Da der angenommene Tristan-Mantelplume nicht direkt beobachtet werden kann, ist nicht klar, ob es sich dabei um einen isolierten Aufstrom aus dem tiefsten Mantel handelt, oder ob er vielleicht Teil eines mehr flächigen Aufstroms ist, der sich im oberen Mantel in mehrere Teile aufspaltet und so zu mehreren parallelen Vulkanketten führt. Die Forschungsarbeiten innerhalb des SPP SAMPLE werden weiterhin zur Klärung von

diesen und anderen offenen Fragen beitragen. Derzeit werden insbesondere in einer Zusammenarbeit von Seismologen und geodynamischen Modellierern seismische Beobachtungen aus dem tiefen Erdmantel, die indirekt Hinweise auf den Einfluss eines Mantelplumes geben können, analysiert und mit geodynamischen Modellergebnissen verglichen.

Ein besseres Verständnis dessen, wie die Öffnung des Südatlantiks begann und welche Rolle dabei Plumes sowie damit verbundene mögliche Hebungen und Senkungen spielten, kann für die Rohstoffexploration wichtig sein. So können sich z. B. Salzablagerungen (siehe z. B. *Torsvik et al., 2009*) in abgesonderten Randmeeren, aber nicht im offenen Ozean bilden. Salzvorkommen sind wiederum für die Bildung von Erdöllagerstätten von entscheidender Bedeutung.

## Literatur

- Buiter, S. (2014): Geodynamics: How plumes help to break plates. - *Nature*, 513, 7516, p. 36-37. DOI: <http://doi.org/10.1038/513036a>
- Dobrovine, P. V., Steinberger, B., Torsvik, T. H. (2012): Absolute plate motions in a reference frame defined by moving hotspots in the Pacific, Atlantic and Indian oceans. - *Journal of Geophysical Research*, 117, B09101. DOI: <http://doi.org/10.1029/2011JB009072>
- Keiding, J. K., Trumbull, R., Veksler, I., Jerram, D. A. (2011): On the significance of ultra-magnesian olivines in basaltic rocks. - *Geology*, 39, 12, p. 1095-1098. DOI: <http://doi.org/10.1130/G32214.1>
- Sleep, N. H. (1997): Lateral flow and ponding of starting plume material. - *Journal of Geophysical Research*, 102, B5, 10001-10012. DOI: <http://doi.org/10.1029/97JB00551>
- Sobolev, S. V., Steinberger, B. (2012): Geodynamische Modellierung: Zusammenhänge zwischen Struktur der tiefen Erde, Vulkanismus und Umweltkatastrophen. - *System Erde*, 2, 2, p. 56-61. DOI: <http://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.02.02.9>
- Torsvik, T. H., Smethurst, M. A., Burke, K., Steinberger, B. (2008): Long term stability in deep mantle structure: Evidence from the ~ 300 Ma Skagerak-Centered Large Igneous Province (the SCLIP). - *Earth and Planetary Science Letters*, 267, 3-4, p. 444-452. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.12.004>
- Torsvik, T. H., Rouse, S., Labails, C., Smethurst, M. A. (2009): A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin. - *Geophysical Journal International*, 177, 3, 1315-1333. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04137.x>
- Wegener, A. (1915): Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, (Sammlung Vieweg ; 23), Braunschweig: Vieweg, 94 p.

# 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.*

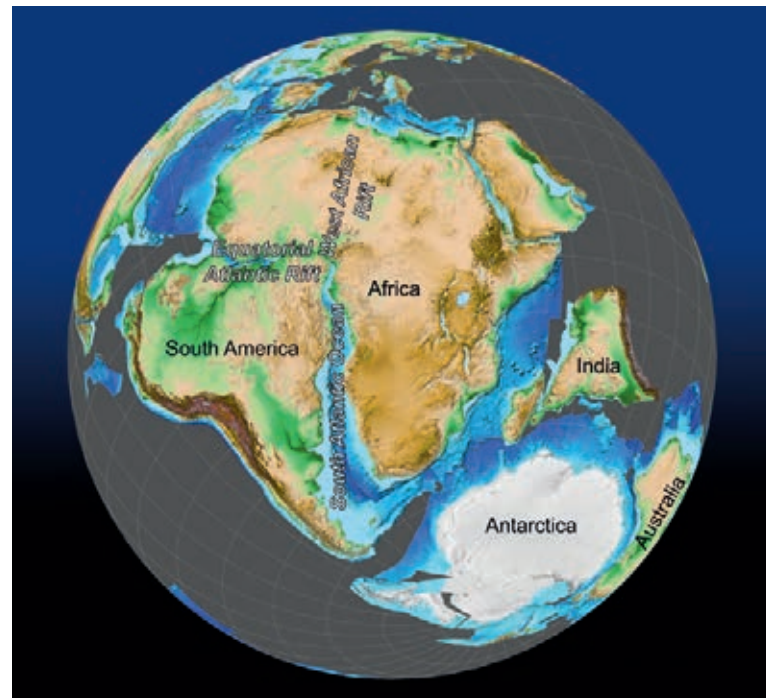


„Unsere Erde, der blaue Planet“ – die vielzitierte Phrase hat sprichwörtlich tiefere Gründe: Die Dichotomie der Erdoberfläche, bei der etwa zwei Drittel von Ozeanen und das restliche Drittel von Kontinenten bedeckt wird, ist durch Dichteunterschiede in der äußeren Schicht der Erde, der Lithosphäre, bedingt. 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

*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.*



*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 Kontinentalränder 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-



**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 Zerbrecen, 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

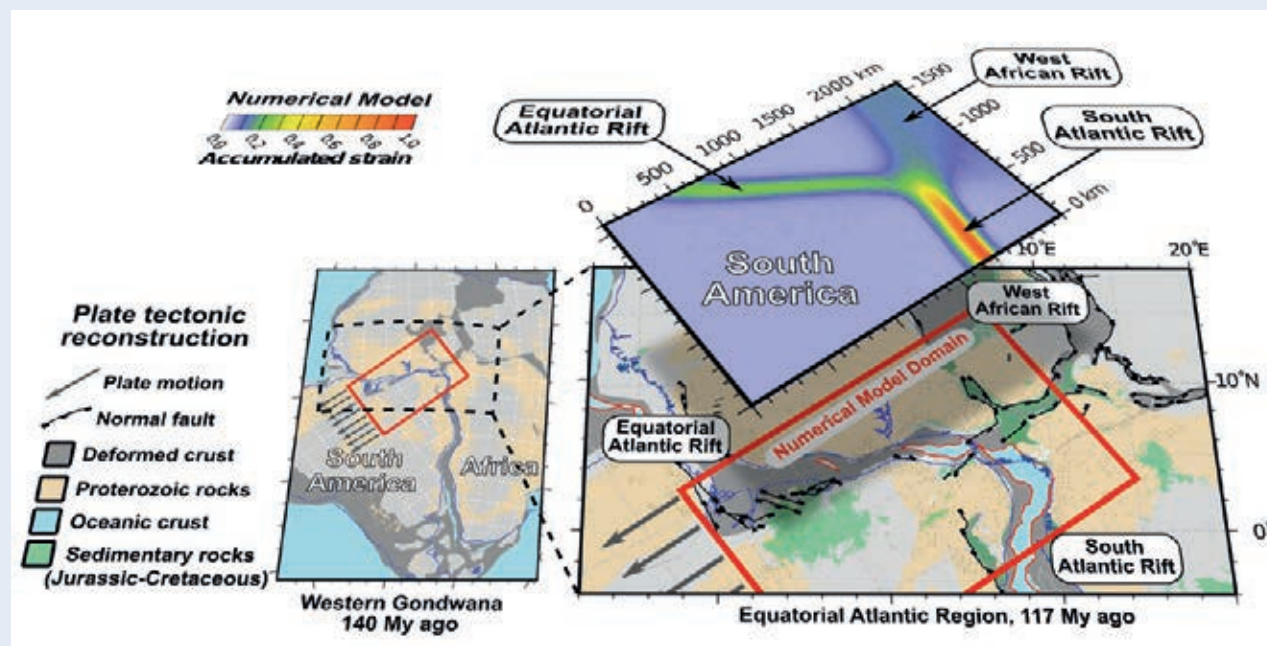


Abb. 2: Die tektonische Rekonstruktion (unten) enthält detaillierte Informationen über Plattenbewegungen und die Dehnungsgeschichte der beteiligten Riftsysteme. Das numerische Modell (oben) illustriert die Dehnung der Riftzonen an der Erdoberfläche. Die südwestwärtige Bewegung Südamerikas aktiviert die 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 Zerburchen 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

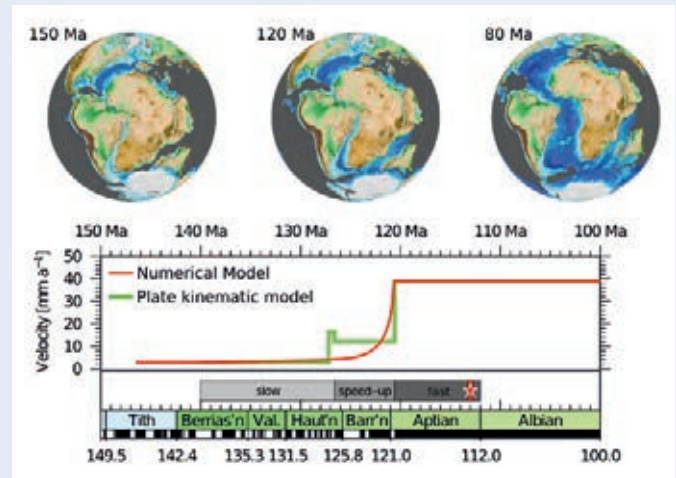


Abb. 3: Das Rifting zwischen Südamerika und Afrika begann mit der Kreidezeit vor etwa 145 Mio. Jahren. In den folgenden 30 Mio. Jahren öffnete sich der Südatlantik wie ein Reißverschluss von Süd nach Nord (oben). In diesem Zeitraum kam es zu einer dramatischen Veränderung der Relativgeschwindigkeit zwischen 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 Zerburchen (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-

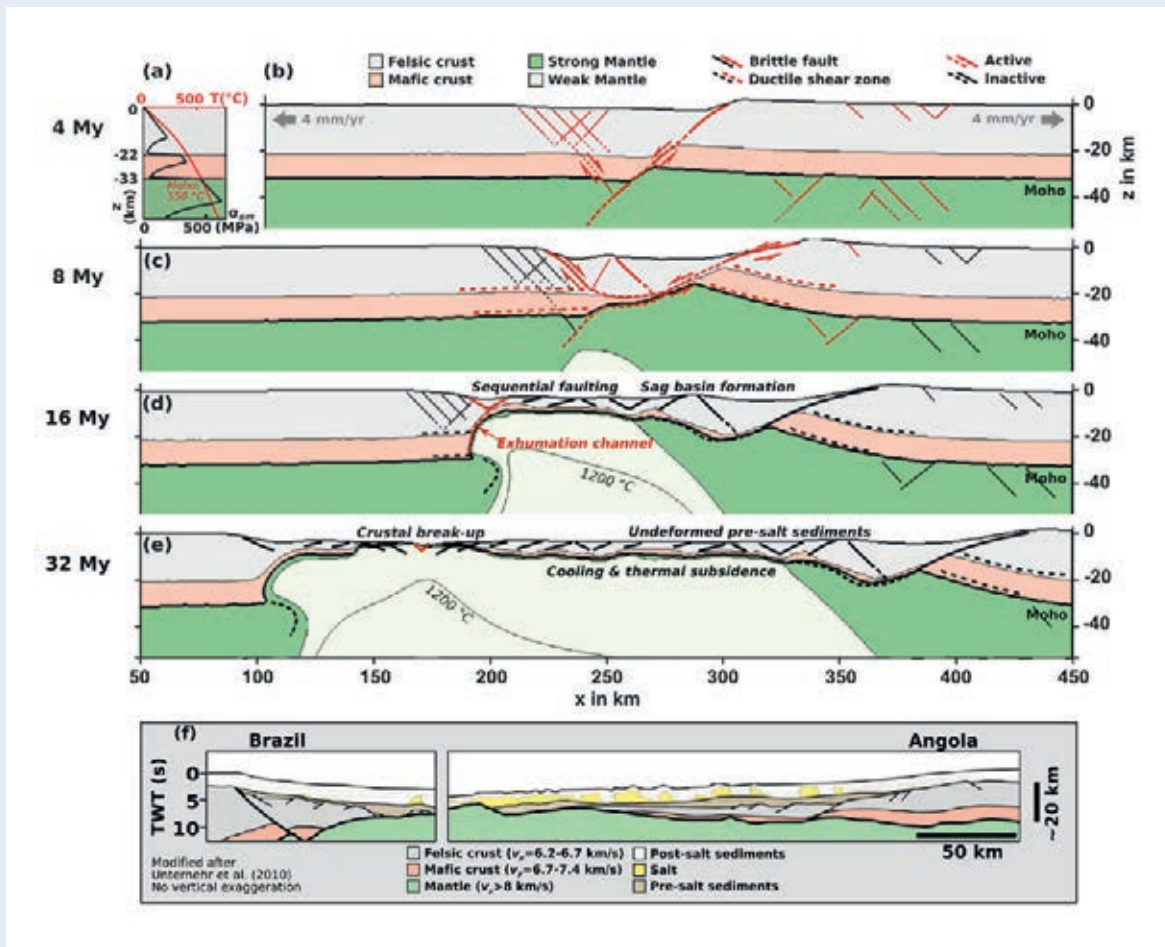


Abb. 4: Asymmetrie der südatlantischen Kontinentränder. Das Bild zeigt ein numerisches Modell für einen Querschnitt durch den Südatlantik. Das Riftzentrum bewegt sich mehr als 200 km in einem Zeitraum von 20 Mio. Jahren. Zum Vergleich zeigt die unterste Abbildung interpretierte seismische Daten der jeweiligen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

# Sedimentbecken im südlichen Afrika und ihre fossilen Kohlenwasserstoff-Ressourcen

Hans-Martin Schulz, Magdalena Scheck-Wenderoth, Judith Sippel, Brian Horsfield  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Large coal deposits occur in South Africa. The production and use of these deposits enable South Africa to satisfy 70 % of its energy demand and 90 % of its electricity production utilising coal-fired power plants. However, coal combustion causes large carbon dioxide emissions, and South Africa – after signing the Kyoto protocol – strives towards reducing greenhouse gas emissions by 34 % by 2020. South Africa therefore looks to alternative energy resources, including renewables, but mainly centred on cleaner fossil energy carriers such as natural gas. Indeed, fossil fuels are high on the agenda, and exploration is ongoing both offshore and onshore. A major focus has recently developed on unconventional hydrocarbons on land in the Karoo Basin. Recent basic scientific findings have demonstrated that glacial events had a direct influence on the extent of black shale deposition in that basin. Within the framework of a long standing cooperation with South African academia and industry, a concerted effort has been made to better understand the present-day dynamics, structure and composition of the South African continental margins. Based on new 3D models, reconstructions of the margin evolution have assessed related processes as lithospheric stretching, heat flow through time and lateral variations of vertical movements. Such basic understanding is crucial for the understanding of offshore basins and their related oil and gas potential.*



## Shale Gas in Südafrika

Shale Gas ist eine unkonventionelle Gasressource, die seit langem in den USA erfolgreich aus paläozoischen und mesozoischen Tonsteinpaketen gefördert wird. Diese Tonsteinpakete sind üblicherweise reich an organischem Kohlenstoff. In vielen europäischen Ländern (so auch in Deutschland) bestehen aber starke Umweltbedenken gegenüber dieser Technologie, insbesondere gegen das hydraulische Aufbrechen der Gesteine, das sogenannte Fracking. Auch in Südafrika wurde im Jahr 2011 ein Moratorium gegen Lizensierungen und Explorationsaktivitäten für Shale Gas erlassen, das allerdings in 2012 wieder aufgehoben wurde.

Vor Kurzem wurden in den USA von der U.S. Energy Information Administration (EIA) weltweite Shale Gas-Ressourcenabschätzungen veröffentlicht, die Südafrika große, technisch förderbare Shale Gas-Ressourcen von rund 390 Tcf (trillion cubic feet) zusprechen, was ungefähr 11 Billionen m<sup>3</sup> Erdgas entspricht und somit das achtgrößte Shale Gas-Vorkommen weltweit darstellt. Allerdings wurden diese attraktiv erscheinenden Zahlen in den letzten Jahren stark relativiert. Die Potenziale liegen im Karoo-Becken, einer alten geologischen Struktur in Südafrika, die heute ein Gebiet von etwa 700 000 km<sup>2</sup> umfaßt. Diese Struktur wurde auf dem Großkontinent Gondwana angelegt, der vor rund 180 Mio. Jahren in einzelne Kontinentalplattenteile zu zerbrechen begann, die danach in ihre heutigen Positionen wanderten und aktuell große Teile Indiens, Afrikas, Australiens, Südamerikas und die Antarktis ausmachen. Dieses Auseinanderbrechen führte zur ersten Anlage einer Beckenstruktur in Südafrika, dem „Karoo-Becken“.

Große Bereiche Gondwanas lagen während des Permokarbons in der Nähe des damaligen Südpols und waren von Gletschern bedeckt. Diese sogenannte permokarbone Vereisung ist vergleichbar mit der in Nord- und Mitteleuropa bekannten letzten Vereisungsperiode. In der folgenden Abschmelzphase ähneln die Prozesse denen, die aus dem heutigen Ostseebereich bekannt sind. Tiefenlagen des heutigen Südafrikas wurden durch Schmelzwässer geflutet und später durch Meeresvorstöße mit Meereswasser aufgefüllt. Dieser ozeanografische Wechsel führte dazu, dass Wassermassen unterschiedlicher Dichte sich nicht



Abb. 1: Inkaba-Bohrung im Karoo-Becken in 2012. Im Vordergrund: bereits erbohrte dunkle Tonsteine der Eccca-Gruppe (Foto: H.-M. Schulz, GFZ)

Fig. 1: Drilling activity as part of the Inkaba project in the Karoo Basin to recover core material of the black shales in the Eccca Group.

miteinander mischten und sich stabile Wasserschichtungen ausprägten. Eine wesentliche Folge war, dass sich im schwereren, salzhaltigen Tiefenwasser sauerstofffreie Bedingungen entwickelten, unter denen abgestorbenes Algenmaterial nicht zersetzt wurde: es bildeten sich Schlämme am Meeresgrund, die reich an organisch gebundenem Kohlenstoff waren und die heute als Whitehill-Formation des unteren Perms bekannt sind.

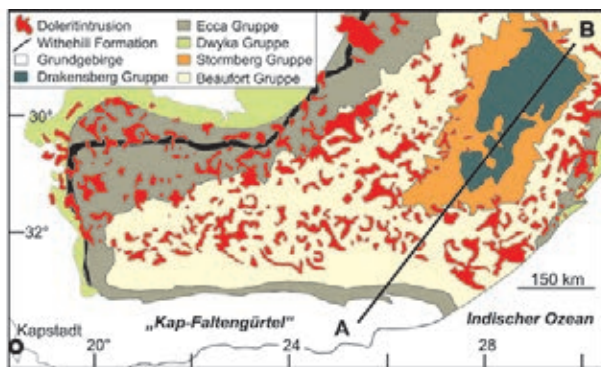
Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ war an ersten Untersuchungen zu der Entwicklung dieser Gesteinsformation im Rahmen des Inkaba yeAfrica-Projekts ([www.inkaba.org](http://www.inkaba.org)) beteiligt. Bohrungen im südlichen Karoo-Becken (Abb. 1) und anschließende Laboruntersuchungen am GFZ in Potsdam belegten den engen Zusammenhang zwischen dem Abschmelzen des Gondwana-Eises, ersten Meeresvorstößen und der Bildung dunkler Meeresschlämme (Geel et al., 2013). Die organisch-

Links: Der Tafelberg oberhalb von Kapstadt, Südafrika, ist Teil des Kap-Faltengürtels. (Foto: H.-M. Schulz, GFZ)

Left: The Table Mountain above Cape Town, South Africa, is a part of the Cape Fold Belt.



Kontakt: H.-M. Schulz  
(schulzhm@gfz-potsdam.de)

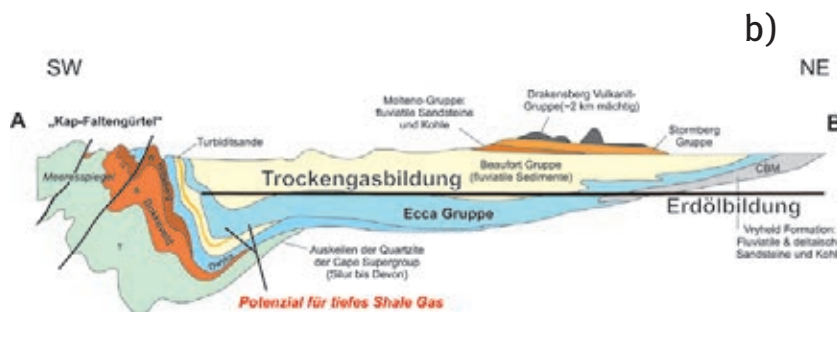


a)

Abb. 2:

a) Vereinfachte geologische Karte des Karoo-Beckens. Auffällig sind die zahlreichen Doleritintrusionen (verändert nach (Petroleum Agency SA; 2012).

b) Geologisches SW-NE-Profil durch das Karoo-Becken mit Kennzeichnung des Bereichs, in dem die dunklen Tonsteine der Ecca-Gruppe thermisches Gas gebildet haben; verändert nach (Petroleum Agency SA, 2012).



b)

Fig. 2:

a) Simplified geological map of the Karoo Basin. Particularly striking are the frequent dolerite intrusions (modified after Petroleum Agency SA, 2012).

b) Geological SW-NE profile across the Karoo Basin highlighting those basin segments in which the black shales of the Ecca Group have generated thermogenic gas (modified after Petroleum Agency SA, 2012).

reichen Schlämme wurden im folgenden Mesozoikum von weiteren Sedimenten überlagert, in größere Tiefen verfrachtet, wo sich in ihnen erst Erdöl, dann Erdgas bilden konnte (Abb. 2b). Beide Kohlenwasserstoffarten konnten teilweise entweichen, ein Teil der jeweiligen Kohlenwasserstoffe verblieb aber in den Muttergesteinen, z. B. als Shale Gas in der Whitehill-Formation der Ecca-Gruppe, dem eigentlichen Zielhorizont für Shale Gas-Exploration im Karoo-Becken. Weiterführende Untersuchungen zum Shale Gas-Potenzial wurden im Rahmen des Inkaba-Projekts entlang eines SW-NE-Profiles durch die Whitehill-Formation durchgeführt (Abb. 2a). Entlang des Profils weisen die Gesteine unterschiedliche thermische Maturitäten auf und es lässt sich ein Potenzial für Shale Oil nachweisen.

Die im Mittel etwa 30 m mächtige Whitehill-Formation (Abb. 3) unterlagert ein rund 200 000 km<sup>2</sup> großes Areal im südlichen Afrika. Mittels magnetotellurischer Untersuchungen des GFZ konnte die Tiefenlagenverteilung der Formation im Karoo-Becken auskartiert werden. Vielversprechend für eine erfolgreiche Shale Gas-Exploration sind die hohen Gehalte an organischem Kohlenstoff (5 Gew.-% im Mittel), die entsprechende thermische Reife von etwa 1,5% Vitrinitreflexion und mehr (ein Maßstab, ob Öl oder Gas in ihnen gebildet werden konnte), und hohe Quarzkonzentrationen von rund 50% der Gesteinsmatrix, die ein effektives hydraulisches Aufbrechen der Gesteine ermöglichen. Allerdings gibt es auch Unsicherheiten für die Shale Gas-Gewinnung. Diese bestehen in unzähligen Doleritintrusionen, die während des frühen

Juras vor rund 182 Mio. Jahren das Karoo-Becken durchschlugen und beim Anbohren zu unkontrollierten Gasausbrüchen sowie mechanischen Schwierigkeiten beim Bohren führen können.

## Südafrikas Kontinentränder

Neben den Lagerstätten auf dem südafrikanischen Festland werden Vorkommen an fossilen Kohlenwasserstoffen auch im marinen Bereich vermutet. In einer engen Zusammenarbeit mit südafrikanischen Partnern untersuchte das GFZ vor diesem Hintergrund die Struktur des westlichen und südlichen Kontinentrands. So wurde im Forschungsprogramm Inkaba yeAfrica und im DFG-Schwerpunktprogramm SAMPLE (South Atlantic Margin Processes and Links with onshore Evolution) ein lithosphärenskaliges Modell des westafrikanischen Kontinentrands erstellt (Hirsch et al., 2009; Maystrenko et al., 2013). Im Forschungsprogramm Inkaba wurde zudem ein Modell des westlichen Bredasdorp-Beckens südlich von Afrika entwickelt (Sonibare et al., 2014). An beiden Kontinenträndern entstanden infolge des Auseinanderbrechens von Südamerika, Afrika und Antarktika neue Ablagerungsgebiete, die mächtige Sedimentfolgen aufnahmen. Die zwei Kontinentränder unterscheiden sich jedoch fundamental hinsichtlich ihrer heutigen Struktur wie auch hinsichtlich ihrer Entwicklungsgeschichte. Die abgelagerten, überwiegend klastischen Sedimente wurden im Verlauf zunehmender Versenkung verfestigt und steigenden Temperaturen

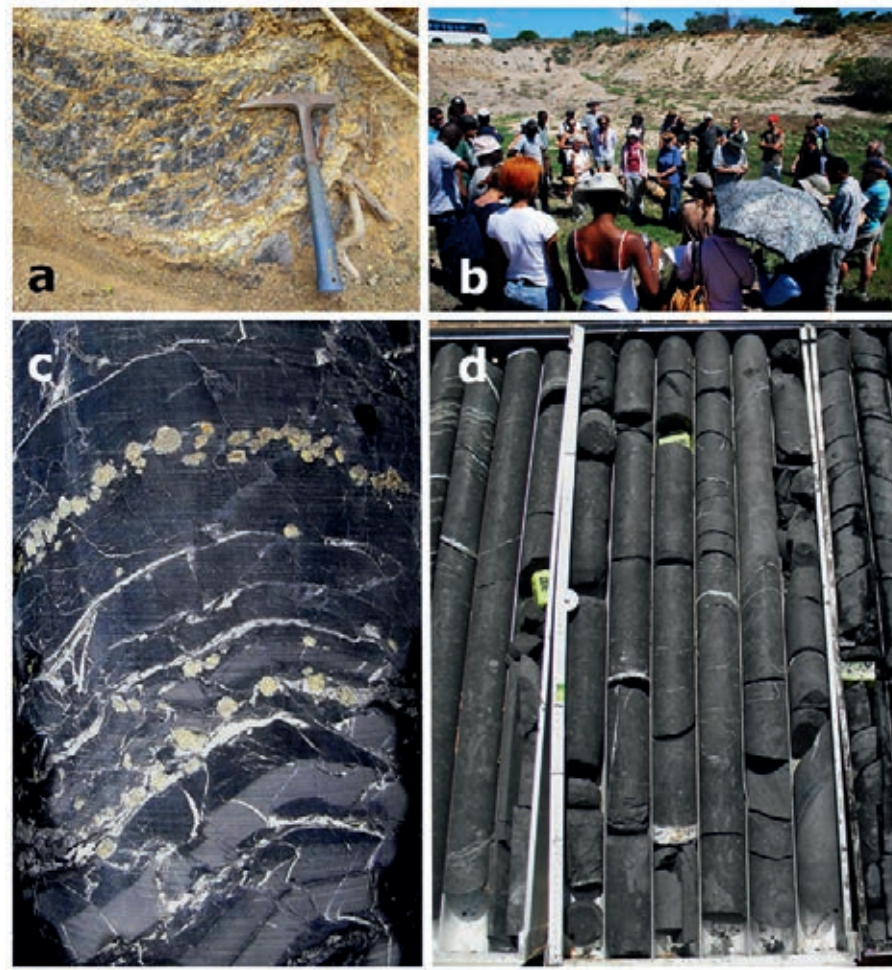


Abb. 3: Die unterpermische Whitehill-Formation im Karoo-Becken. Die dunklen Sedimente sind gut geschichtet (d), reich an organischem Kohlenstoff und an Pyrit (c). Der Pyrit in den Sedimenten verwittert oberflächennah zu Gips mit typischen hellen Farben (a, b), was im Gelände zur Namensgebung führte (white hill = weißer Berg) (Fotos: H.-M. Schulz, GFZ).

Fig. 3: The Lower Permian Whitehill Formation in the Karoo Basin. The dark sediments are well bedded (d), rich in organic carbon and pyrite (c). The surficial weathering of pyrite causes gypsum formation and bleaching of the sediments (a, b), which is the reason for the name (white hill).

ausgesetzt. Ein Verständnis dieser Absenkungs- und Temperaturgeschichte ist die Voraussetzung, um mögliche Vorkommen von Erdöl- und Erdgaslagerstätten zu finden. Darüber hinaus können aus der Analyse der heutigen Struktur und der Absenkungsgeschichte grundlegende Erkenntnisse zum Auseinanderbrechen von Kontinenten abgeleitet werden.

Entsprechend waren die wissenschaftlichen Forschungsziele darauf fokussiert, den heutigen physikalischen Zustand dieser Kontinentalränder möglichst gut und konsistent mit allen verfügbaren Beobachtungen zu beschreiben, um anschließend eine Rekonstruktion der Absenkungsgeschichte durchzuführen. Dazu wurden datengestützte dreidimensionale Strukturmodelle entwickelt, die die Ergebnisse aus seismischen, seismologischen und Bohrungsdaten integrieren und die durch gravimetrische, isostatische und thermische Modellierungen überprüft wurden. Zur Rekonstruktion der Beckengeschichte wurden verschiedene Methoden der Rückwärts- und Vorwärtsmodellierung eingesetzt.

Ein lithosphärenskaliges Modell (Abb. 4) für den passiven atlantischen Kontinentrand Südafrikas und Namibias bildet die

heutige Konfiguration der Sedimente sowie der unterlagernden Kruste und Lithosphäre ab und berechnet die tiefe Temperatur- und Lastverteilung. Die drei Teilbecken (Orange-, Lüderitz- und Walvis-Becken, Abb. 4 oben rechts) entstanden durch starkes Rifting der Lithosphäre und damit einhergehender Dehnung und thermischer Destabilisierung im späten Jura – Ereignisse, die im Auseinanderbrechen von Afrika und Südamerika in der frühen Kreidezeit kulminierten. Der während der Riftphase geschaffene Ablagerungsraum wurde mit mehreren Kilometer mächtigen Sedimenten und magmatischen Lagen gefüllt. Die anschließende Entwicklung des Kontinentrands war durch das Abkühlen der vormals aufgeheizten Lithosphäre geprägt, was zu einer thermischen Absenkung führte, die mit der Zeit exponentiell abnahm. Die während dieser thermischen Absenkungsphase abgelagerten Sedimentfolgen sind heute bis zu 10 km mächtig.

Im Gegensatz zum westlichen Kontinentrand entwickelte sich das Western Bredasdorp Basin am gescherten, nicht-vulkanischen Kontinentrand südlich von Südafrika auf andere Weise. Dort ging der Riftingprozess mit rechtsseitigen Seitenverschiebungen entlang der Agulhas-Falkland Fracture Zone einher. Während der Riftphase wurde die Lithosphäre nur in einem sehr

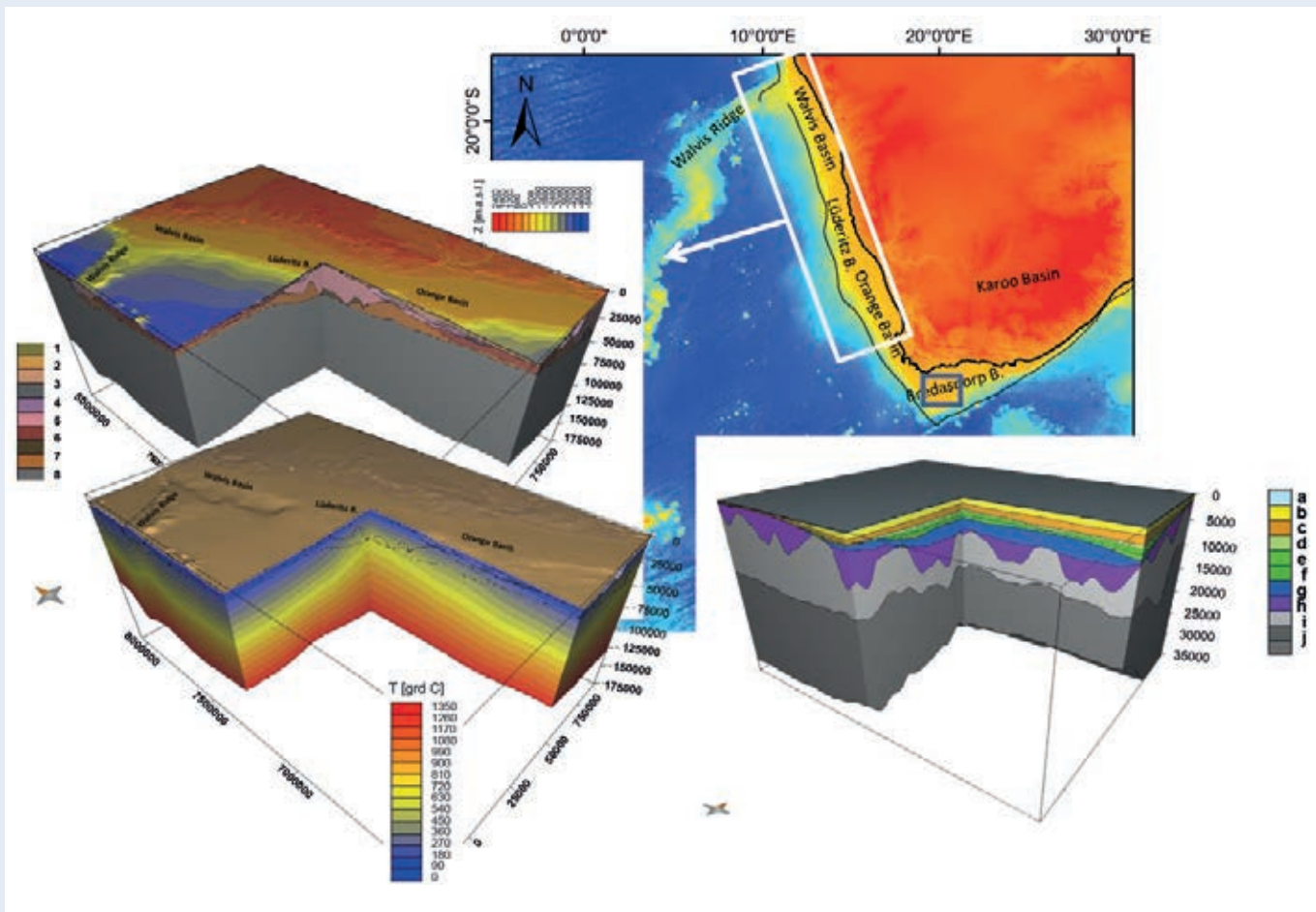


Abb. 4: 3D-Strukturmodelle der Kontinentalränder Südafrikas: Westlich von Südafrika liegt ein passiver magmatischer Kontinentrand, für den ein lithosphärenskaliges Modell entwickelt wurde. Links oben: 3D-Ansicht des Strukturmodells mit folgenden geologischen Einheiten 1: Känozoikum, 2: PostTuron, 3: PostApt, 4: PräApt, 5: ältere kontinentale Sedimente, 6: kontinentale kristalline Kruste, 7+8: Unterkruste mit hoher Dichte und hohen seismischen Geschwindigkeiten, 8: lithosphärischer Mantel. Die Tiefenskala gibt die topografische Höhe bzw. Bathymetrie an. Unten links: thermisches 3D-Modell aus dem berechnete Temperatur-Tiefen-Verteilungen extrahiert werden können (Abb. 5). Südlich von Südafrika befindet sich ein gescherter Kontinentrand an welchem durch Horizontalbewegungen entlang der Agulhas-Falkland-Fracture Zone kleine Becken entstanden sind. Für eines davon, das Bredasdorp-Becken, wurde ein krustenskaliges 3D-Modell entwickelt, das unten rechts abgebildet ist und folgende Einheiten auflöst: a: Wasser, b: Oberes Cenoman-Känozoikum, c: Oberes Apt-Unteres Cenoman, d: Oberes Hauterive-Unteres Apt, e: Mittleres-oberes Hauterive, f: Oberes Valangin-Mittel Hauterive, g: Oxford-Valangin, h: PreRift, i: obere kristalline Kruste, j: untere kristalline Kruste.

Fig.4: Structural models of South African continental margins: West of South Africa a passive magmatic continental margin evolved since Jurassic times for which a lithosphere scale model has been developed: upper left: 3D view on the structural model that resolves the following geological units: 1: Cenozoic, 2: PostTuronian, 3: PostAptian, 4: PreAptian, 5: continental sediments, 6: continental crystalline crust, 7+8: high-density-high-velocity lower crust, 8: lithospheric mantle. Depth (Z)-scale gives topography/ bathymetry. Lower left: 3D thermal model, from which predictive temperature-depth maps can be extracted (Fig. 5). South of South Africa a sheared continental margin developed where small pull-apart basins formed in consequence of horizontal movements along the Agulhas-Falkland-Fracture Zone. The Bredasdorp Basin is one of these pull-apart basins for which a crustal-scale 3D model resolves the following units: a: water, b: Upper Cenomanian-Cenozoic, c: Upper Aptian-Lower Cenomanian, d: Upper Hauterivian-Lower Aptian, e: Middle-upper Hauterivian, f: Upper Valanginian-middle Hauterivian, g: Oxfordian-Valanginian, h: PreRift, i: upper crystalline crust, j: lower crust.

schmalen Bereich ausgedünnt, so dass die damit verbundene thermische Anomalie aus dem Mantel räumlich begrenzt und die anschließende Abkühlung und thermische Subsidenz vergleichsweise gering waren. Die tektonisch geprägte Syn-Riftphase zeichnete sich dementsprechend durch drei- bis vierfach höhere Sedimentationsraten als die Post-Riftphase aus.

Die unterschiedliche Lithosphärenstruktur der beiden Kontinentalränder bestimmt unter anderem die tiefe Temperaturverteilung

und damit die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von Erdöl- und Erdgaslagerstätten. In derselben Tiefe kann die Temperatur stark variieren, wie beispielhaft in Abb. 5 für den westlichen Kontinentrand gezeigt wird. Erdöl- und Erdgasfunde im Orange- und Bredasdorp-Becken vor der südafrikanischen Küste lassen sich auf oberkretazische lakustrine sowie unter- bis mittelkretazische marine TOC (organischer Kohlenstoff)-reiche tonige Muttergesteine zurückführen. Die Bildung, aber auch das Entweichen bereits gebildeter Kohlenwasserstoffe (KW) im süd-

lichen Orange-Becken wird im wesentlichen durch räumliche und zeitliche Sedimentationsänderungen nach der initialen Riftphase geprägt. Während die Hauptphase der KW-Bildung in der späten Kreidezeit im Schelfbereich erfolgte, verlagerte sich die spätere Hauptabsenkung in den Bereich des tieferen Beckens und führte somit zu einer zweiten Bildungsphase unter tertiären Sedimentkeilen. Beckenmodellierungsergebnisse zeigen, dass dort auch heute noch ein aktives Erdölsystem existiert. Das heute zu verzeichnende Entweichen von Erdgas im südlichen Orange-Becken tritt im Schelfbereich in Wassertiefen von weniger als 400 m auf. Die entweichenden Gase haben bereits einen langen Weg hinter sich gebracht, da sie ursprünglich an den äußeren Beckenrändern gebildet wurden.

## Ausblick

Insbesondere die begonnenen Arbeiten zum Shale Gas-Potenzial im Karoo-Becken haben zu einem tieferen Verständnis des dortigen Petroleumsystems geführt. Allerdings haben sich dadurch weitere Fragen ergeben, die im Rahmen der bestehenden Kooperationen mit südafrikanischen Partner-Institutionen weiterhin bearbeitet werden. Von besonderem Interesse sind dabei die hydrogeologischen Bedingungen im Karoo-Becken.

## Literatur

- Geel, C., Schulz, H.-M., Booth, P., de Wit, M., Horsfield, B. (2013): Shale gas characteristics of Permian black shales in South Africa: results from recent drilling in the Ecca Group (Eastern Cape). - *Energy Procedia*, 40, p. 256-265. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.030>
- Petroleum Agency SA (2012): Petroleum Potential of South Africa, Petroleum Agency SA, 6 p.
- Hirsch, K. K., Bauer, K., Scheck-Wenderoth, M. (2009): Deep structure of the western South African passive margin - Results of a combined approach of seismic, gravity and isostatic investigations. - *Tectonophysics*, 470, 1-2, p. 57-70. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.04.028>
- Maystrenko, Y. P., Scheck-Wenderoth, M., Hartwig, A., Anka, Z., Watts, A. B., Hirsch, K. K. (2013): Structural features of the Southwest African continental margin according to results of lithosphere-scale 3D gravity and thermal modelling. - *Tectonophysics*, 604, p. 104-121. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.014>
- Sonibare, W., Sippel, J., Scheck-Wenderoth, M., Mikeš, D. (2014 online): Crust-scale 3D model of the Western Bredasdorp Basin (Southern South Africa): data-based insights from combined isostatic and 3D gravity modelling. - *Basin Research*. DOI: <http://doi.org/10.1111/bre.12064>

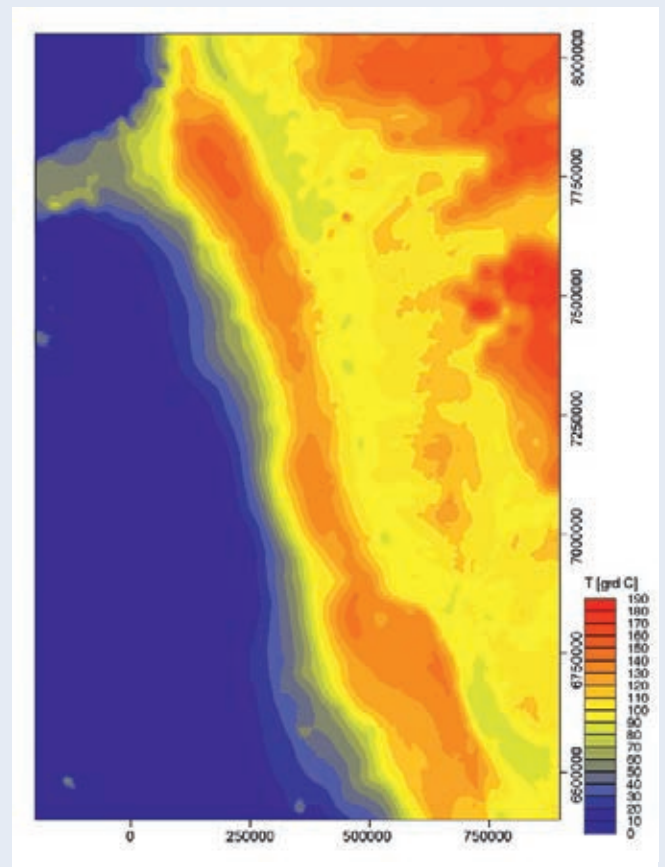


Abb. 5: Temperaturverteilung in 4 km Tiefe unter NN entlang des westlichen Kontinentrands von Südafrika, die ein 3D konduktives thermisches Modell vorhersagt: höchste Temperaturen korrelieren mit größten Sedimentmächtigkeiten. Dieses Phänomen ist durch die isolierende Wirkung der Sedimente begründet, da letztere thermisch wesentlich schlechter leiten als kristalline Gesteine. Wo also die Sedimentbedeckung mächtig ist, wird der Wärmetransport zur Oberfläche behindert, es kommt zum Wärmestau in flachen Tiefen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Sedimente im Walvis-Becken in 4 km Tiefe bereits im Gasfenster sind, während die Sedimente im Lüderitz- und Orange-Becken in derselben Tiefe noch im Erdölfenster sind. Schwarze Linie: Küstenverlauf; gestrichelte schwarze Linie: Kontinent-Ozean-Grenze (COB)

Fig. 5: Temperature distribution at 4 km depth below sea level across the Western South African passive margin as predicted by a 3D conductive thermal model: highest temperatures are predicted for the domains where sediment thicknesses are largest. This is due to the insulating effect of thermally less conductive sediments compared to crystalline rocks. Where the sediment cover is thick heat transport to the surface is hampered and heat is stored at shallow depths. These results indicate that the sediments of the Walvis Basin are in the gas window at 4km depth, whereas the sediments of the Lüderitz and Orange Basin may still be in the oil window. Solid black line: coast line; stippled back line continent ocean boundary (COB).

# Die Erosion des südafrikanischen Hochplateaus

## Folgerungen für Tektonik, Klimageschichte und die Nachhaltigkeit der Bodenbewirtschaftung

Samuel Niedermann<sup>1</sup>, John Decker<sup>2</sup>, Alexandre Kounov<sup>3</sup>, Maarten de Wit<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Department of Geological Sciences, University of Cape Town, Südafrika; jetzt bei: New Zealand Petroleum and Minerals, Wellington, Neuseeland.

<sup>3</sup> Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Basel, Schweiz

<sup>4</sup> Africa Earth Observatory Network (AEON), Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth, Südafrika

*The South African landscape is characterized by a high plateau bound by an escarpment and passive continental margins. In this study, cosmogenic noble gas nuclides ( $^3\text{He}$  and  $^{21}\text{Ne}$ ) were applied to constrain erosion rates of quartzite and dolerite surfaces from the arid western to the more humid eastern areas of South Africa. The erosion rates averaged over the last few hundred thousand years are remarkably low, between about 1 and 3 m/Ma, with no obvious relation to climatic differences. This is in stark contrast to rates of tens to >100 m/Ma determined by thermochronology for the Cretaceous, probably reflecting the tectonic activity of that epoch which has largely faded since. A closer look at the data reveals that, contrary to expectations, late Quaternary erosion rates in the east are even lower than in the presently arid west, indicating that the western Karoo area may have experienced more humid climate conditions during northern hemisphere glacial periods. Finally, the fact that estimates of modern soil erosion rates are one to two orders of magnitude higher than the cosmogenic nuclide-based rock weathering rates demonstrates that current land use practices are unsustainable under prevailing tectonic and climatic conditions.*





Die südafrikanische Landschaft ist im Landesinneren geprägt von einem Hochplateau auf über 1000 m Höhe, das über eine Steilstufe, das so genannte „Escarpment“, zu den tiefer gelegenen küstennahen Gebieten abfällt. Solche Landschaftsformen sind typisch für passive Kontinentalränder und kommen z. B. auch in Südamerika oder Australien vor. Ihre Entstehung dürfte mit dem Auseinanderbrechen des Superkontinents Gondwana vor rund 180 Mio. Jahren zusammenhängen. Für die weitere Entwicklung war das Zusammenspiel von tektonischen Hebungs- und Senkungsprozessen sowie von Sedimentation und Erosion von entscheidender Bedeutung. Ein Verständnis dieser Entwicklung setzt daher unter anderem eine bessere Kenntnis der Erosionsgeschichte Südafrikas voraus.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ hat im Rahmen der Forschungs Kooperation „Inkaba yeAfrica“ mit Südafrika untersucht, wie Erosion und Verwitterung die südafrikanische Landschaft in den letzten paar hunderttausend Jahren im Vergleich zu früheren Perioden der Erdgeschichte geprägt haben. Erosion, insbesondere die chemische Verwitterung von Gestein, hängt nicht nur von den tektonischen, sondern auch von den klimatischen Bedingungen ab und kann daher auch Informationen zur Klimageschichte liefern. Einen klaren Zusammenhang mit dem Klima scheint es nur in tektonisch aktiven Gebieten mit hohem Relief (z. B. Alpen, Himalaya) zu geben, während in tektonisch ruhigen Regionen (z. B. Kongo- und Amazonasbecken) selbst ein sehr feuchtes Klima keine erhöhten Erosionsraten bewirkt. Das tektonisch unauffällige Südafrika mit dem von West nach Ost feuchter werdenden Klima kann wichtige Beiträge zur Klärung dieser Zusammenhänge liefern.

Die dritte Motivation einer Erosionsstudie in Südafrika liegt in der Frage, inwiefern die heute angewandten Bodenbewirtschaftungsmethoden nachhaltig sind. Für eine gleichgewichtige Bodennutzung dürfte der Abtrag an fruchtbarem Boden durch menschliche Tätigkeiten nicht größer sein als die Menge des Bodens, der durch chemische, biologische und physikalische Verwitterung von Gesteinen neu gebildet wird.

Links: Blick vom Barkley-Pass (Ostkap-Provinz) auf die Steilstufe am Rand des südafrikanischen Hochplateaus  
(Foto: J. Decker, UCT)

Left: View from Barkley Pass (Eastern Cape) to the South African escarpment at the edge of the high plateau



Kontakt: S. Niedermann  
(nied@gfz-potsdam.de)

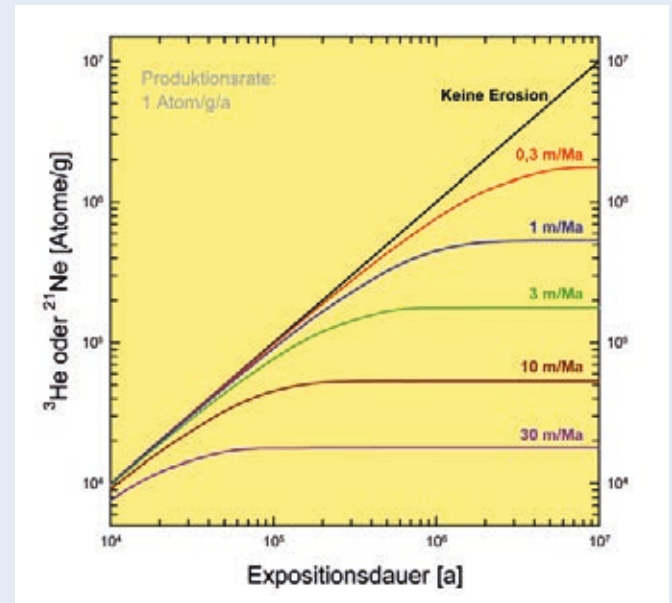


Abb. 1: Abhängigkeit der Konzentration von kosmogenem  $^3\text{He}$  oder  $^{21}\text{Ne}$  von der Expositionsdauer einer Oberfläche bei unterschiedlichen Erosionsraten. Die angenommene Produktionsrate beträgt  $1 \text{ Atom/g/a}$ ; bei höheren Produktionsraten muss die Konzentrationsskala mit dem entsprechenden Faktor multipliziert werden.

Fig. 1: Dependence of the cosmogenic  $^3\text{He}$  or  $^{21}\text{Ne}$  concentration on the exposure duration of a surface at various erosion rates. The assumed production rate is  $1 \text{ atom/g/a}$ ; at higher production rates the concentration scale has to be multiplied by the same factor.

## Erosionsratenbestimmung mit kosmogenen Nukliden

Eine quantitative Bestimmung von Erosionsraten ist mit Hilfe der Analyse kosmogener Nuklide möglich (z. B. Niedermann, 2002; Dunai, 2010). Kosmogene Nuklide werden in Oberflächengesteinen durch die Einwirkung der kosmischen Strahlung, einer hochenergetischen Partikelstrahlung aus der Milchstraße, vor allem durch so genannte „Spallation“, d. h. Kernzertrümmerung erzeugt. Ein kosmisches Strahlungsteilchen (auf der Erdoberfläche ein sekundäres Neutron) trifft dabei auf einen Atomkern im Kristallgitter (z. B. Silizium) und spaltet einige Protonen und Neutronen davon ab, so dass ein leichter Kern (z. B. Neon) übrigbleibt. Da Neon und insbesondere das Isotop  $^{21}\text{Ne}$  in Gesteinen extrem selten vorkommen, führt eine längere Exposition des Gesteins (über Tausende bis Millionen von Jahren) zu einer messbaren Anreicherung, trotz geringer Produktionsraten

von wenigen bis maximal einigen Hundert Atomen pro Gramm und Jahr. Damit lässt sich im Prinzip die Expositionsdauer an der Oberfläche bestimmen. Neben den seltenen stabilen Edelgasisotopen  $^3\text{He}$  und  $^{21}\text{Ne}$ , die am GFZ bestimmt werden, eignen sich für solche Untersuchungen auch gewisse langlebige Radionuklide wie  $^{10}\text{Be}$  (Halbwertszeit  $T_{1/2} = 1,387$  Mio. Jahre (Ma)),  $^{26}\text{Al}$  ( $T_{1/2} = 0,708$  Ma) oder  $^{36}\text{Cl}$  ( $T_{1/2} = 0,301$  Ma).

Da die Produktion kosmogener Nuklide mit der Tiefe unter der Oberfläche schnell abnimmt (Halbwertstiefe  $\sim 60$  cm), hängt ihre Konzentration aber nicht nur von der Bestahlungsdauer ab, sondern auch davon, wie schnell die Oberfläche erodiert wird. Erosion führt nämlich zum laufenden Verlust der obersten Gesteinsschicht mit der höchsten Konzentration an kosmogenen Nukliden. Je höher die Erosionsrate, desto geringer wird daher – bei gleicher Expositionsdauer – die Konzentration der kosmogenen Nuklide (Abb. 1). In Oberflächen, die seit sehr langer Zeit exponiert sind und gleichzeitig erodiert werden, stellt sich schließlich ein Gleichgewicht zwischen Produktion und Abtragung ein, so dass aus der gemessenen Konzentration eines kosmogenen Nuklids direkt die langfristige Erosionsrate berechnet werden kann.

## Probenmaterial

Im Rahmen dreier Expeditionen wurden Oberflächenproben aus verschiedenen Regionen Südafrikas genommen, vom steil abfallenden Escarpment nahe der Westküste über das zentrale

Hochplateau bis in die Nähe des östlichen Kontinentalrands (Abb. 2). Zwei typische Lithologien wurden beprobt, nämlich Quarzite der Table Mountain Group und des Cape Fold Belt im Westen sowie Karoo-Dolerite in den zentraleren und östlichen Regionen. Diese Lithologien sind besonders hart und erosionsresistent und sind daher für die Gesamterosion des Hochplateaus bestimmend. Die einzelnen Proben stammen vom Inneren des Hochplateaus, von seinem Rand, dem Escarpment und von Gebieten unterhalb des Haupt-Escarpments. Mehrheitlich wurden horizontale Oberflächen beprobt, in einigen Fällen aber auch geneigte oder vertikale Flächen. Die Probennahmestellen liegen in verschiedenen Klimazonen, von jährlich  $<200$  mm Niederschlag im Westen bis  $1000$  mm im Osten. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Genauere Beschreibungen der einzelnen Probennahmegebiete und aller Resultate und Interpretationen findet man bei *Kounov et al. (2007, 2014)* und *Decker et al. (2011, 2013)*.

## Analytik

Die Gesteinsproben wurden zerkleinert und gesiebt, und aus den Korngrößenfraktionen von  $250$  bis  $500$   $\mu\text{m}$  wurden mit Hilfe geeigneter Methoden wie Magnettrennung, Dichtentrennung, Säurebehandlung und Handauslese saubere Quarz- bzw. Pyroxenseparate hergestellt. Proben von  $0,5$  bis  $1,0$  g wurden in Aluminiumfolie eingepackt und in das Probenkarussell über dem Ultrahochvakuum-Extraktionsofen des Edelgaslabors gelegt. Dieses wurde etwa eine Woche gepumpt und auf  $100$   $^{\circ}\text{C}$

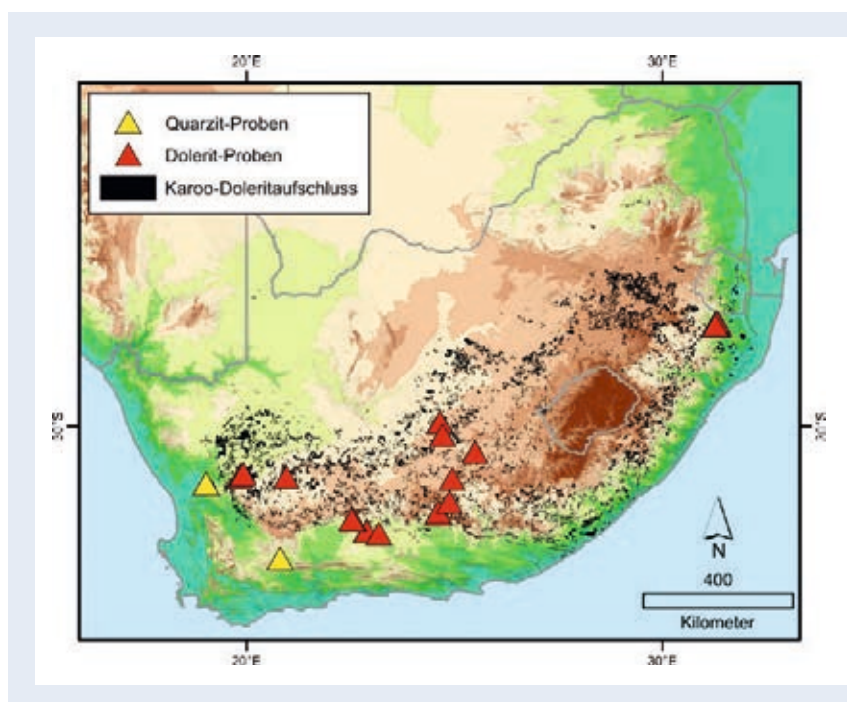


Abb. 2: Karte von Südafrika mit Höhenverteilung (Farbstufen), Auftreten von Doleritaufschlüssen (schwarz) und den Probennahmestellen von Quarziten (gelb) und Doleriten (rot).

Fig. 2: Map of South Africa showing elevation (color shading), dolerite outcrops (black) and sampling locations of quartzite (yellow) and dolerite (red).

beheizt, um atmosphärische Edelgase von den Kornoberflächen zu entfernen. Die Proben wurden dann im Tantal-Tiegel des Extraktionsofens in mehreren Heizstufen entgast (Quarze: 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1200 °C; Pyroxene: 600 °C, 900 °C und 1750 °C). Die chemisch aktiven Gase (z. B. O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) wurden in einer mit Trockeneis gekühlten Kühlfalle, zwei Titanschwamm-Gettern und zwei ZrAl-Gettern abgetrennt. Anschließend wurden die Edelgase in einem Adsorptionskryostaten bei 11 K (-262 °C) an Aktivkohle ausgefroren und nach stufenweisem Hochheizen einzeln zur Bestimmung der Konzentration und Isotopenzusammensetzung ins Massenspektrometer eingelassen. Eine genauere Beschreibung der Methoden ist in *Niedermann et al. (1997)* zu finden.

Die Konzentrationen C der kosmogenen Nuklide <sup>3</sup>He und <sup>21</sup>Ne in den untersuchten Proben wurden aus den gemessenen Isotopenzusammensetzungen ermittelt (*Niedermann, 2002*). Mit Hilfe der bekannten, auf die entsprechende Probennahmestelle skalierten Produktionsrate P (siehe *Niedermann, 2002; Dunai, 2010*), der ebenfalls bekannten Konstante  $\Lambda=160 \text{ g/cm}^2$ , die die Verringerung der Produktionsrate mit der Tiefe beschreibt, sowie der Gesteinsdichte ( $\rho=2,7 \text{ g/cm}^3$  für Quarzit bzw.  $\rho=3,0 \text{ g/cm}^3$  für Dolerit) lässt sich die Erosionsrate  $\varepsilon$  an der entsprechenden Stelle errechnen (z. B. *Niedermann, 2002*):

$$\varepsilon = (P \Lambda) / (C \rho) \quad (1)$$

Grundsätzlich handelt es sich um eine maximale Erosionsrate, die nur dann der tatsächlichen Erosionsrate entspricht, wenn die Oberfläche über einen langen (wiederum von der Erosionsrate abhängigen) Zeitraum keinen anderen Prozessen wie etwa Sedimentablagerung, episodischer Abspaltung von Gesteinsblöcken etc. ausgesetzt war. Zumindest für die horizontalen Oberflächen dürften im untersuchten Gebiet die berechneten Erosionsraten den tatsächlichen sehr nahe kommen.

### Verteilung der Erosionsraten im Untersuchungsgebiet

In Abb. 3 sind die gemessenen Erosionsraten gegen die geografische Länge aufgetragen. Es fällt auf, dass die meisten Werte zwischen etwa 1 und 2 m/Ma liegen und damit im globalen Vergleich sehr gering sind. Erosionsraten über 3,5 m/Ma kommen im gesamten Probensatz nur zweimal vor: 5,3 m/Ma bei 24,6°E und ~12 m/Ma bei 24,9°E; der letzte Wert liegt außerhalb der Skala von Abb. 3 und ist daher nicht eingezeichnet. Drei von den sechs Proben mit  $\geq 30^\circ$  Oberflächenneigung zeigen relativ hohe Werte von 2,8, 3,1 und 12 m/Ma. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Erosion geneigter bzw. vertikaler Oberflächen häufiger als bei horizontalen nicht kontinuierlich abläuft, sondern durch die episodische Abspaltung größerer Blöcke gekennzeichnet ist. Erfolgte eine solche Abspaltung

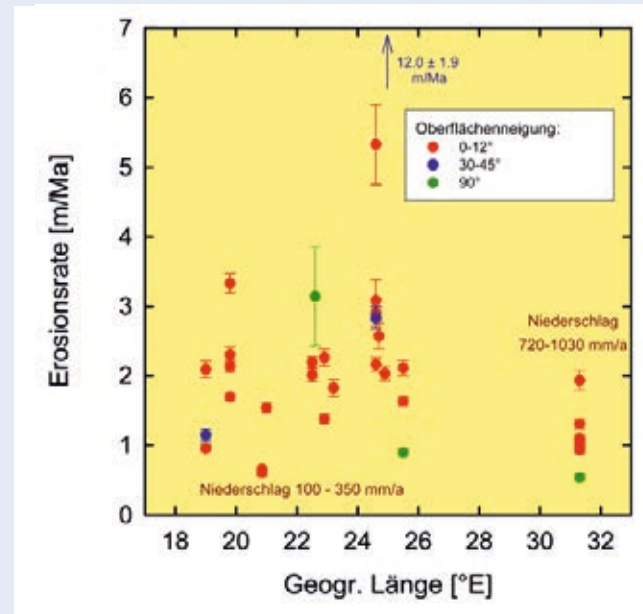


Abb. 3: Für Dolerit- und Quarzitoberflächen bestimmte Erosionsraten auf dem südafrikanischen Hochplateau und angrenzenden Gebieten, aufgetragen gegen die geografische Länge. Unterschiedliche Oberflächenneigungen sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet.

Fig. 3: Erosion rates determined for dolerite and quartzite surfaces on the South African Plateau and in neighboring areas, plotted versus geographic longitude. Different slopes are shown by different colors. Annual precipitation is 100-350 mm/a in the west and 720-1030 mm/a in the east.

vor relativ kurzer Zeit, wird die nach Gleichung (1) berechnete Erosionsrate überschätzt. Eine Block-Abspaltung kann auch bei horizontalen Oberflächen vorkommen und könnte vielleicht für den zweithöchsten Wert von 5,3 m/Ma verantwortlich sein.

Ein klimatischer Einfluss ist aus den Daten auf den ersten Blick nicht zu erkennen. In den ariden westlichen Gebieten mit Jahresniederschlägen zwischen etwa 100 und 350 mm/a liegen die Erosionsraten im selben Bereich wie im deutlich humideren Einzugsgebiet des Pongola River (~31°E), wo die jährlichen Niederschlagsmengen zwischen 720 und 1030 mm/a betragen. Tendenziell scheinen die Erosionsraten dort sogar eher geringer zu sein. Dies bestätigt die Vermutung, dass die Erosion einer Landschaft bei fehlender tektonischer Aktivität nicht wesentlich vom Klima beeinflusst wird. Ähnlich geringe Erosionsraten wurden mit <sup>10</sup>Be auch im Cape Fold Belt nahe der Südküste nachgewiesen (*Scharf et al., 2013*).

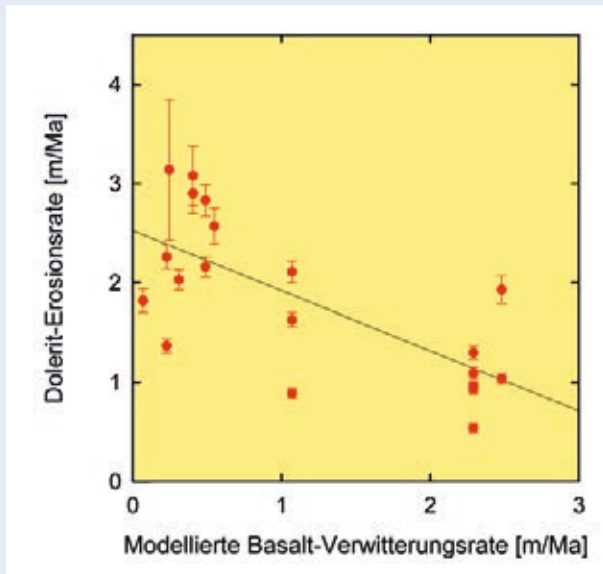


Abb. 4: Dolerit-Erosionsraten aufgetragen gegen modellierte Basalt-Verwitterungsraten nach Dessert et al. (2003). Eine leicht negative Korrelation ist erkennbar (siehe Text).

Fig. 4: Dolerite erosion rates plotted versus modeled basalt weathering rates according to Dessert et al. (2003). A slightly negative correlation is indicated (see text).

## Implikationen für Tektonik- und Klimageschichte

Die mit Hilfe der kosmogenen Nuklide bestimmten geringen Erosionsraten stehen im Kontrast zu wesentlich höheren Werten bis  $>100$  m/Ma, die aus thermochronologischen Untersuchungen hervorgehen (z. B. Tinker et al., 2008; Kounov et al., 2009). Die Methoden der Thermochronologie (Spaltspurendatierung oder U/Th-He-Datierung) bestimmen, wann sich eine Gesteinsformation in der Erdkruste unter einer bestimmten Temperatur (um  $100$  °C, abhängig vom untersuchten Mineral) abgekühlt hat. Die Abkühlung erfolgt durch die Abtragung darüber liegender Gesteinsschichten und lässt daher Rückschlüsse auf die Erosionsgeschichte zu. Allerdings liegen die relevanten Zeiträume für Untersuchungen mittels Thermochronologie typischerweise bei  $10^7$  bis  $10^8$  Jahren, während kosmogene Nuklide maximal etwa  $10^6$  Jahre abdecken. Daher können die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Methoden dahingehend interpretiert werden, dass die Abtragung im südlichen Afrika während der Kreidezeit um eine bis zwei Größenordnungen höher war als im Tertiär und insbesondere im Quartär. Vermutlich fand die tektonische Hebung des südafrikanischen Inlandplateaus also gegen Ende des Mesozoikums statt, zu einer Zeit, als auch häufige Kimberlit-Intrusionen und die Eruption des submarinen Agulhas-Plateaus auf verstärkte magmatisch-tektonische Aktivität hindeuten. Seit dem frühen Tertiär scheint diese Aktivität weitgehend abgeklungen zu sein, womit auch die Erosionsraten drastisch zurückgingen.

Obwohl ein direkter Zusammenhang von Erosion und Klima aus Abb. 3 nicht ersichtlich ist, lohnt eine genauere Betrachtung dieses Aspekts. Nach Dessert et al. (2003) lässt sich die chemische Verwitterungsrate von Basalt  $f_w$  im Einzugsgebiet eines Flusses über dessen jährliche Abflussmenge  $R_f$  und die dort herrschende mittlere Jahrestemperatur  $T$  abschätzen:

$$f_w = R_f \times 0,01841 e^{0,553T} / \rho \quad (2)$$

(mit  $f_w$  in m/Ma,  $R_f$  in mm/a,  $T$  in °C und  $\rho = 3$  g/cm<sup>3</sup>). Für eine Teilmenge unserer Proben (Dolerite aus Decker et al., 2013, ohne Proben mit Verdacht auf Block-Abspaltung) ist in Abb. 4 die modellierte Verwitterungsrate nach Gleichung (2) gegen die auf kosmogenen Nukliden basierende Erosionsrate aufgetragen. Es zeigt sich, dass die modellierten und gemessenen Werte zwar im gleichen Bereich zwischen etwa 0 und 3 m/Ma liegen, die erwartete positive Korrelation ist aber nicht zu erkennen. Vielmehr deutet sich eine leicht negative Korrelation an, wenn auch die Streuung der Daten recht groß ist. Bei der Interpretation ist zu bedenken, dass sich die modellierten Raten auf heutige Klimabedingungen beziehen, während die gemessenen Werte über Zeiträume von mehreren Hunderttausend Jahren mitteln. Genaue Paläoklimadaten aus dem südlichen Afrika fehlen, es gibt aber Hinweise auf deutliche Klimaschwankungen. Insbesondere könnte während der Eiszeiten das heute auf die Kapregion beschränkte Winterregen-Gebiet weiter nach Norden gewandert sein, wodurch möglicherweise die heute ariden westlichen Gebiete mehr Niederschlag bekommen hätten als die östlichen Regionen am Indischen Ozean. Dies könnte die negative Korrelation in Abb. 4 erklären.

## Bodenerosion und Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Anbaumethoden

Wenn die mit kosmogenen Nukliden bestimmten Dolerit-Erosionsraten im Wesentlichen durch chemische Verwitterung bestimmt werden und repräsentativ für die Erosion des gesamten südafrikanischen Hochplateaus sind, müssten sie auch die langfristige Rate der Bodenbildung wiedergeben. Es ist daher aufschlussreich, sie mit Schätzungen moderner Bodenerosionsraten zu vergleichen. Die Schätzungen beruhen auf verschiedenen Methoden, insbesondere auf der Sedimentführung von Flüssen (siehe Decker et al., 2011), und sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Dennoch liegen alle Schätzungen für die Gebiete unserer Probenlokationen um eine bis zwei Größenordnungen über den Dolerit-Erosionsraten, nämlich zwischen etwa 20 und 300 m/Ma. Auch unter Berücksichtigung der Unsicherheiten lässt sich daher feststellen, dass eine ähnlich hohe Erosion in Südafrika seit der Kreidezeit nicht mehr aufgetreten ist und menschliche Aktivitäten die Landschaft offenbar so stark verändern wie die damalige tektonisch aktive Phase der Hebung des Kalahari-Plateaus (Abb. 5). Unter den gegenwärtigen tektonisch-klimatischen Bedingungen sind daher die derzeit angewandten landwirtschaftlichen Anbaumethoden keineswegs nachhaltig.



Abb. 5: Dieses Bild aus dem östlichen Probennahmegebiet zeigt verstärkte Bodenerosion, vermutlich als Folge heutiger Landbaumethoden. Im Hintergrund ist ein Dolerit-Sandstein-Felsmassiv zu sehen. (Foto: J. Decker, UCT)

Fig. 5: This picture from the eastern sampling area shows enhanced soil erosion, probably due to present land use practices. A dolerite-sandstone cliff is visible in the background.

## Zusammenfassung und Ausblick

Unsere Untersuchung hat gezeigt, dass die südafrikanische Landschaft seit mindestens mehreren Hunderttausend Jahren durch außerordentlich geringe Erosionsraten im Bereich von etwa 1 bis 3 m/Ma geprägt war. Dies hängt mit der tektonischen Stabilität der Region zusammen. Dennoch gibt es Hinweise, dass auch wechselnde klimatische Verhältnisse in der Vergangenheit einen Einfluss auf die Erosion ausgeübt haben. Die gegenwärtig verbreiteten landwirtschaftlichen Anbaumethoden in Südafrika beschleunigen die Bodenerosion deutlich und sind daher nicht als nachhaltig anzusehen.

Das Zusammenspiel von Klima und Tektonik soll auch weiter nördlich untersucht werden, wo ein neu anlaufendes Projekt unter GFZ-Beteiligung die Entwicklung der westnamibischen Flusssysteme seit dem Eozän erforschen wird. Die Ergebnisse werden zusammen mit den hier vorgestellten zu einem besseren Verständnis der Landschaftsentwicklung im Süden Afrikas beitragen.

## Literatur

- Decker, J. E., Niedermann, S., de Wit, M. J. (2011): Soil erosion rates in South Africa compared with cosmogenic  $^3\text{He}$ -based rates of soil production. - South African Journal of Geology, 114, 3-4, p. 475-488. DOI: <http://doi.org/10.2113/gssajg.114.3-4.475>
- Decker, J. E., Niedermann, S., de Wit, M. J. (2013): Climatically influenced denudation rates of the southern African plateau: Clues to solving a geomorphic paradox. - Geomorphology, 190, p. 48-60. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.007>
- Dessert, C., Dupré, B., Gaillardet, J., François, L. M., Allègre, C. J. (2003): Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. - Chemical Geology, 202, 3-4, p. 257-273. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.10.001>
- Dunai, T. J. (2010): Cosmogenic nuclides: Principles, concepts and applications in the Earth surface sciences, Cambridge [u.a.]: Cambridge University Press, 187 p.
- Kounov, A., Niedermann, S., Viola, G., Andreoli, M., Erzinger, J. (2007): Present denudation rates at selected sections of the South African escarpment and the elevated continental interior based on cosmogenic  $^3\text{He}$  and  $^{21}\text{Ne}$ . - South African Journal of Geology, 110, 2-3, p. 235-248. DOI: <http://doi.org/10.2113/gssajg.110.2-3.235>
- Kounov, A., Niedermann, S., de Wit, M. J., Codilean, A. T., Viola, G., Andreoli, M., Christl, M. (2014, accepted): Cosmogenic  $^{21}\text{Ne}$  and  $^{10}\text{Be}$  reveal more than 2 Ma old alluvial fan flanking the Cape Mountains, South Africa. - South African Journal of Geology.
- Kounov, A., Viola, G., de Wit, M., Andreoli, M. A. G. (2009): Denudation along the Atlantic passive margin: new insights from apatite fission track analysis on the western coast of South Africa. - In: Lisker, F., Ventura, B., Glasmacher, U. A. (Eds.), Thermochronological Methods: From Palaeotemperature Constraints to Landscape Evolution Models, (Geological Society Special Publications; 324), London: The Geological Society, p. 287-306. DOI: <http://doi.org/10.1144/SP324.19>
- Niedermann, S. (2002): Cosmic-ray-produced noble gases in terrestrial rocks: dating tools for surface processes. - In: Porcelli, D., Ballentine, C. J., Wieler, R. (Eds.), Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry, (Reviews in Mineralogy and Geochemistry; 47), Mineralogical Society of America; Geochemical Society, p. 731-784.
- Niedermann, S., Bach, W., Erzinger, J. (1997): Noble gas evidence for a lower mantle component in MORBs from the southern East Pacific Rise: Decoupling of helium and neon isotope systematics. - Geochimica et Cosmochimica Acta, 61, 13, p. 2697-2715. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00102-6](http://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00102-6)
- Scharf, T. E., Codilean, A. T., de Wit, M., Jansen, J. D., Kubik, P. W. (2013): Strong rocks sustain ancient postorogenic topography in southern Africa. - Geology, 41, 3, p. 331-334. DOI: <http://doi.org/10.1130/G33806.1>
- Tinker, J., de Wit, M. J., Brown, R. (2008): Mesozoic exhumation of the southern Cape, South Africa, quantified using apatite fission track thermochronology. - Tectonophysics, 455, 1-4, p. 77-93. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.10.009>

# Landschaftsentwicklung und Klimawandel im südlichen Afrika

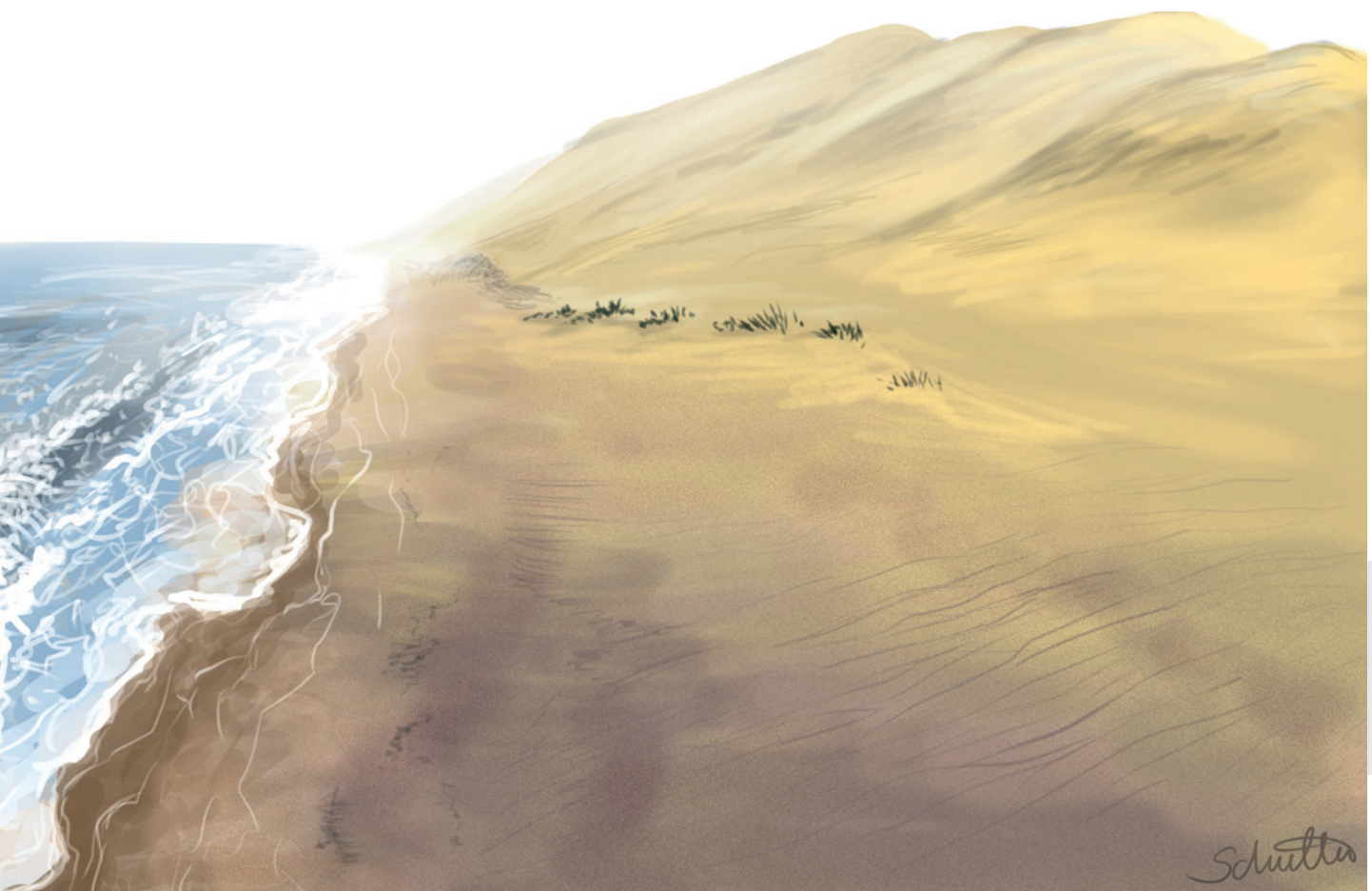
Heinz Wilkes<sup>1</sup>, Oliver Bens<sup>1</sup>, Sabine Chabrilat<sup>1</sup>, Kai Mangelsdorf<sup>1</sup>, Jörg Völkel<sup>2</sup>, Dirk Wagner<sup>1</sup>, Achim Wehrmann<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Technische Universität München

<sup>3</sup> Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven

*In the context of global change, the Southern African region has to address great challenges in terms of its natural resources, in particular to cope with the impact of climate and land use change on the water balance, the soil fertility and the quantity of land suitable for common requirements. In the BMBF-funded project GeoArchives researchers from the German Research Centre for Geosciences, the Technical University of Munich and Senckenberg am Meer jointly exploit diverse Southern African archives of landscape development and climate change. The examination of these terrestrial and marine archives will provide deep insights into the climatic evolution and environmental conditions in Southern Africa during the Holocene. The highly interdisciplinary approach integrates geomorphology, soil science, sedimentology, inorganic and organic geochemistry, geomicrobiology and remote sensing. By assessing the possible impact of future climate change and land-use change on specific sensitive environments in Southern Africa we will provide future-oriented earth system management strategies with a geoscience rationale.*



Der globale Wandel stellt das südliche Afrika hinsichtlich seiner natürlichen Ressourcen vor große Herausforderungen. Dies betrifft besonders die Auswirkungen von Klimawandel und Landnutzung auf den Wasserhaushalt, die Bodenfruchtbarkeit und die Verfügbarkeit geeigneter Landflächen für den zukünftigen Bedarf der Bevölkerung. Von höchster Bedeutung sind daher eine effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen und zugleich ihr Erhalt. Klimatische Veränderungen und der menschliche Einfluss durch Landwirtschaft, Beweidung und Ackerbau können zu einer Degradation der Landschaft führen, sofern deren natürliche Stabilität und ihr Regenerationspotenzial überschritten werden. Dies führt unmittelbar zur Mobilisierung und Umlagerung von Sedimenten. Um die zugrundeliegenden Prozesse der Landschaftsentwicklung genau zu verstehen, müssen Archive erschlossen werden, die zur Dokumentation von Landschaftsentwicklung und Klimawandel geeignet sind. Da für das südliche Afrika schriftliche Aufzeichnungen erst seit etwa 300 Jahren existieren, sind natürliche Geoarchive umso wichtiger, die Auskunft über die Vergangenheit geben können.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Deutschen Geo-ForschungsZentrums GFZ, der Technischen Universität München und von Senckenberg am Meer führen seit Juli 2013 gemeinsam das Forschungsprojekt GeoArchives durch. GeoArchives wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen von „Science Partnerships for the Assessment of Complex Earth System Processes – SPACES“ gefördert. Südafrika ist bereits seit 1996 eines der Schwerpunktländer des BMBF für die wissenschaftlich-technologische Zusammenarbeit und bedeutendster Kooperationspartner in Subsahara-Afrika. Zentrales Ziel von GeoArchives ist die Erschließung und Interpretation von Archiven, mit denen die Landschaftsentwicklung und der Klimawandel im südlichen Afrika charakterisiert werden können (Abb. 1 und 2). GeoArchives zeichnet sich durch eine intensive Zusammenarbeit mit Kolleginnen und Kollegen an Universitäten und Forschungseinrichtungen in Südafrika und Namibia sowie eine enge Vernetzung mit anderen im Rahmen des SPACES-Programms laufenden Projekten aus, insbesondere mit „Regional Archives for Integrated iNvestigations – RAIN“ (Marum, Bremen, FSU Jena) und „Options for sustainable geo-biosphere feedback management in savanna systems under regional and global change – OPTIMASS“ (Universität Potsdam).

Links: I. Schüller (Projekt-Doktorandin), „Sandwich-Bay an der namibischen Küste“, Computerzeichnung, 2014

Left: I. Schüller (project PhD), „Sandwich Bay at the Namibian coast“, computer drawing, 2014

GeoArchives ist interdisziplinär ausgerichtet und integriert unterschiedliche Typen natürlicher Archive. Die Untersuchung geomorphodynamisch sensibler Landschaftselemente bietet das Potenzial, Veränderungen der Landoberfläche auf lokaler bis regionaler Skala hochauflösend zu dokumentieren. Da die Atlantikküste des südlichen Afrika durch starken Seegang und hochenergetische Ablagerungsbereiche gekennzeichnet ist, stellen Lagunen und die aus ihnen hervorgegangenen Salzpflanzen (pans) die einzigen niederenergetischen Bereiche dar, in denen es zu einer mehr oder weniger kontinuierlichen Ablagerung von Sedimenten sowohl mariner als auch terrestrischer Herkunft kommt. Gemeinsam öffnen diese marinen und terrestrischen Geoarchive einen tiefen Blick in die klimatische Entwicklung und die Umweltbedingungen im südlichen Afrika im Verlauf des Holozäns. Veränderungen wirken sich dabei auch auf die Zusammensetzung und Diversität ursprünglicher Mikroorganismengemeinschaften aus. Die angestrebte Rekonstruktion der Umweltveränderungen wird durch die Anwendung von Fernerkundungsmethoden gestützt, welche die direkte und indirekte Analyse von Geoarchiven und Landschaftsformen auf unterschiedlichen Skalen auf Grundlage geochemischer und physikalischer Parameter ermöglichen.

## Landschaftsentwicklung im südlichen Afrika

### Hänge, Schwemmfächer und Flussterrassen als Geoarchive

Hänge mit ihren Sedimenten, Schwemmfächer und Flussterrassen zählen zum natürlichen Forminventar der landschaftsprägenden Geomorphodynamik und entstanden über Jahrhunderte und Jahrtausende, bevor der Mensch intensive Landnutzung einleitete. Nicht zuletzt im südlichen Afrika gingen diese Prozesse bereits vor der Zeit des menschlichen Einflusses auf die Landschaft mit der Umlagerung gewaltiger Sedimentmengen einher. Aktivitätsphasen wechselten mit Stabilitätsphasen ab (Heine & Völkel, 2011). Sofern ausgeschlossen werden kann, dass menschliche Einflüsse ausschlaggebend für die Wechsel waren, müssen andere Faktoren wie etwa klimatische ursächlich sein. Mit dem Wissen um die paläoklimatischen Bedingungen der letzten Jahrhunderte in Südafrika können die Auswirkungen vormaliger Systemveränderungen auf Hänge, Hangsedimente und Flussterrassen aus den Geoarchiven ausgelesen und die Zusammenhänge im geomorphodynamischen System vor der menschlichen Einflussnahme rekonstruiert werden. Vor allem in Schwemmfächern, die bisher in der Paläoumweltforschung in Namibia und in den angrenzenden Untersuchungsgebieten Südafrikas weitestgehend unberücksichtigt blieben, liegt ein ausgesprochen hohes Erkenntnispotenzial, das es zu erschließen gilt.

Eine Vielzahl von Vorgängerprojekten und die daraus resultierenden Fachkenntnisse schufen die Basis für die im Rahmen von GeoArchives laufenden Untersuchungen an unterschied-



Kontakt: H. Wilkes  
(heinz.wilkes@gfz-potsdam.de)

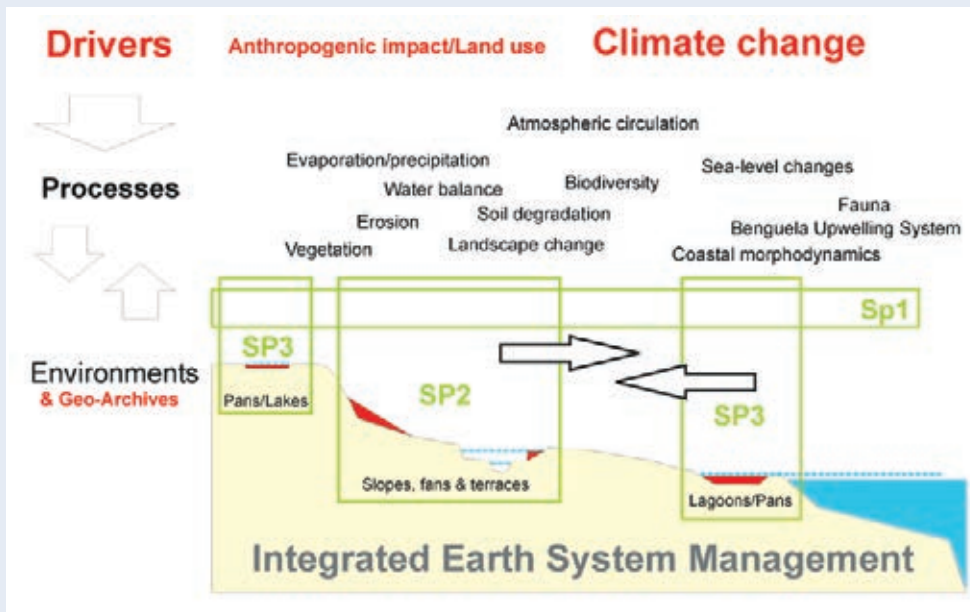


Abb. 1: Konzeptioneller Rahmen von GeoArchives; SP1 (Fernerkundung), SP2 (Hänge, Schwemmfächer und Flussterrassen) und SP3 (Salzpfannen und Lagunen) bezeichnen die drei Arbeitspakete von GeoArchives

Fig. 1: Conceptual framework of GeoArchives; SP1 (remote sensing), SP2 (slopes, fans and terraces) and SP3 (salt pans and lagoons) denote the three work packages of GeoArchives



Abb. 2: Karte der Untersuchungsstandorte (Grafik: R. Milewski, GFZ)

Fig. 2: Map of the investigation sites

lichen Landschaftselementen (u.a. Heine & Völkel, 2010; Hürkamp et al., 2011; Leopold et al., 2006). Mit Hilfe der Geoarchivanalyse dreier ineinandergreifender Systeme (Hang, Schwemmfächer, Flussterrasse) sollen aktuelle Fragen nach den Auswirkungen des Klima- und Nutzungswandels auf die heutigen Landschaftsökosysteme beantwortet werden, um geeignete zukunftsorientierte Landnutzungsstrategien mit fundierter geowissenschaftlicher Untermauerung formulieren zu können (Abb. 3). Die drei Archive schließen in unterschiedlicher Auflösung regionale und auch überregionale Einflüsse, sowohl klimatischer Veränderungen als auch der Landnutzung, auf. Die Hänge betreffend gilt es, über ihre

Sedimente (slope deposits) und die darin entwickelten Böden das Alter und die Frage der Stabilität des Hangsystems zu klären. Fragen vormaliger und aktueller Bodenerosion werden bearbeitet. Es zeigt sich, dass in den Arbeitsgebieten in der SW-Kalahari, am unteren Molopo im Mündungsbereich in den Oranje sowie in den Namib/Naukluft-Bergen Namibias (Tsauhabtal) mit erstaunlich hoher Systemstabilität zu rechnen ist, was nicht zuletzt Oberflächendatierungen belegen. Schwemmfächer von Hanggerinnen, die in den Vorfluter übertreten, schließen den Verschneidungsbereich des geomorphodynamischen Systems Hang mit dem Abflussgeschehen im Vorfluter (Molopo, Oranje, Tsauhab) auf.



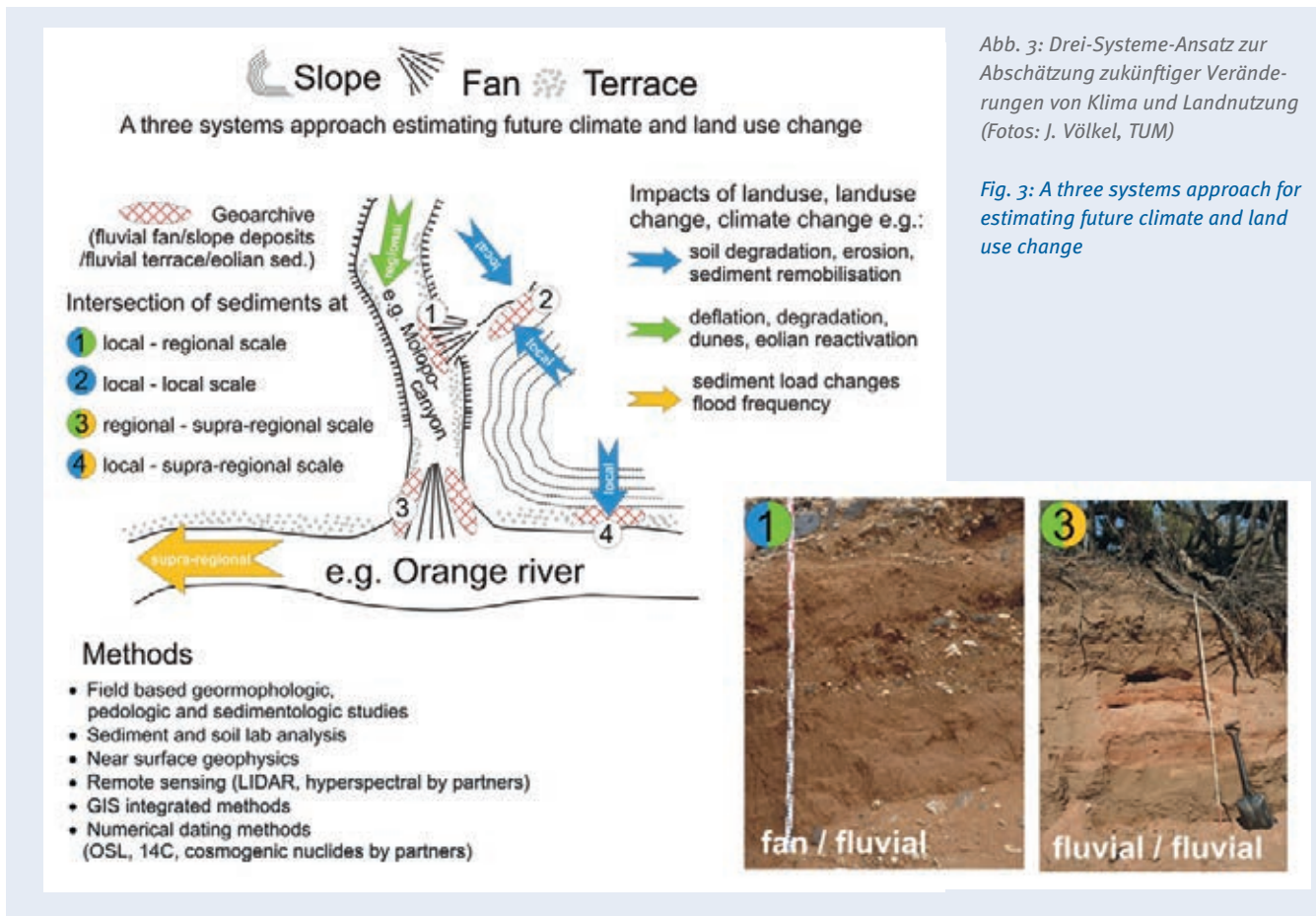


Abb. 3: Drei-Systeme-Ansatz zur Abschätzung zukünftiger Veränderungen von Klima und Landnutzung (Fotos: J. Völkel, TUM)

Fig. 3: A three systems approach for estimating future climate and land use change

Während die Sedimente der Hanggerinne und kleinerer Vorfluter dritter Ordnung (z. B. Unterlauf des Molopo) von lokalen Einflüssen über Raum und Zeit geprägt werden, sind etwa in den Sedimenten des Oranje die überregionalen Einflüsse geoarchival gespeichert. Terrassen sind Sedimentationskörper desselben Flusses und stellen mit ihrer Oberkante den ehemaligen Talboden bzw. die Fluthöhe eines Abflussereignisses dar. Im Falle sehr junger Sedimente sind diese nicht verfestigt. So hat der Klimawandel der sogenannten Kleinen Eiszeit zu einer massiven Zunahme von Abflussereignissen mit extremen Abflussspitzen geführt (Heine & Völkel, 2011). Am Oranje nutzen heute Farmen industriellen Zuschnitts in großer Zahl und Ausdehnung diese feinkörnigen, lockeren Sedimente für den Weinanbau. Es gilt zu verstehen, welche Wiederkehrwahrscheinlichkeit diese Hochflutereignisse haben und welchen Systemzuständen in der südafrikanischen Landschaft sie geschuldet waren. Dabei spielt auch die Materialverlagerung durch den Wind eine Rolle, weniger in Form von Flugsanden als von Staubastrag und Staubaablagerung (Hürkamp et al., 2011).

#### Fernerkundung in der Untersuchung von Oberflächenveränderung und Landschaftswandel

Fernerkundungsmethoden erlauben die Gewinnung von Informationen über den Zustand und die Veränderung der Erdober-

fläche auf kleinen und großen räumlichen Skalen. Insbesondere sensible Prozesse wie Bodenerosion und -degradation werden durch den Einsatz innovativer Fernerkundungstechnologie aufgedeckt. Die fernerkundlichen Analysen im Rahmen von GeoArchives zielen auf (a) die auf hyperspektralen Fernerkundungsdaten basierende, präzise räumliche Charakterisierung verschiedener Landschaftseinheiten und Geoarchive im Untersuchungsgebiet (Salzpfannen der Kalahari, Tsauchabtal, Unterlauf des Molopo) und (b) die Untersuchung von Oberflächenprozessen durch multitemporale Auswertung von Satellitenzeitreihen, welche Erkenntnisse über die rezente Vegetations- und Landschaftsdynamik und hydrologische Veränderungen der letzten 10 bis 30 Jahre ermöglichen sollen. Die abbildende Spektroskopie (engl.: imaging spectroscopy/hyperspectral imaging) ist eine innovative Fernerkundungstechnologie, mit deren Hilfe ein größerer, weit über das sichtbare Licht hinausgehender Wellenlängenbereich mit vielen, stetig aneinander gereihten, schmalen Kanälen bildlich aufgezeichnet wird. Hyperspektrale Fernerkundung ermöglicht die genaue Quantifizierung von Boden- und Sedimentoberflächeneigenschaften (Chabrillat et al., 2013) und leistet durch deren Charakterisierung und Kartierung einen wichtigen Beitrag zur Interpretation von Paläoumweltarchiven und Oberflächenprozessen im südlichen Afrika. Besonders relevante Parameter für die Analyse von

Erosionsprozessen in Trockengebieten sind die quantitativen Anteile von Vegetation und unbedecktem Boden oder die Gehalte an organischer Substanz, Ton, Eisenoxid, Karbonaten (Abb. 4) und Salzen, die mit herkömmlichen Multispektralsensoren nicht in der bei Einsatz der Hyperspektraltechnologie erwarteten Güte bestimmbar waren (Ben-Dor et al., 2009). Detektierte Oberflächenveränderungen werden dem rezenten Status gegenüber gestellt, hinsichtlich der Entwicklung des Ökosystems analysiert und insbesondere im Zusammenhang mit Klimawandel und Landnutzungsänderungen interpretiert (Abb. 5). Das GFZ als wissenschaftlicher Leiter der zukünftigen hyperspektralen Weltraummission EnMAP (Environmental Mapping and Analyses Program) ist ein in der Algorithmenentwicklung und Anwendung von Hyperspektraldaten weltweit führendes Institut bei der Erforschung global gekoppelter Umweltprozesse und -veränderungen. In diesem Zusammenhang zielt der Fernerkundungsanteil in GeoArchives auch auf die Entwicklung und Unterstützung verfügbarer und zukünftiger Methoden zur Erdbeobachtung für die Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungswandel auf Ökosysteme und leistet so einen Beitrag für ein nachhaltiges und zukunftsorientiertes Umweltmanagement.

## Neue Klima- und Umweltarchive in Namibia und Südafrika

### Salzpfannen in der Kalahari und an der Skelettküste

Terrestrische Salzpfannen, die z. B. in der Kalahari verbreitet auftreten, sind Sedimentationssysteme, die nur episodisch Wasser führen. Mögliche Mechanismen ihrer Entstehung und der in ihnen ablaufenden Prozesse werden kontrovers diskutiert und sind bislang nicht umfassend verstanden. Eine wichtige Komponente des Projekts GeoArchives besteht darin, das Potenzial der Salzpfannen in der Kalahari und an der Skelettküste als Archive der Landschaftsentwicklung und des Klimawandels zu erkunden (Abb. 6). In fünf Salzpfannen der Kalahari in Namibia und Südafrika (Omongwa, Toasis, Koës, Branddam East und Witpan) wurden bis zu 3 m lange Sedimentkerne gewonnen. Das Probenmaterial wird in umfassender Weise mit sedimentologischen, geochemischen und mikrobiologischen

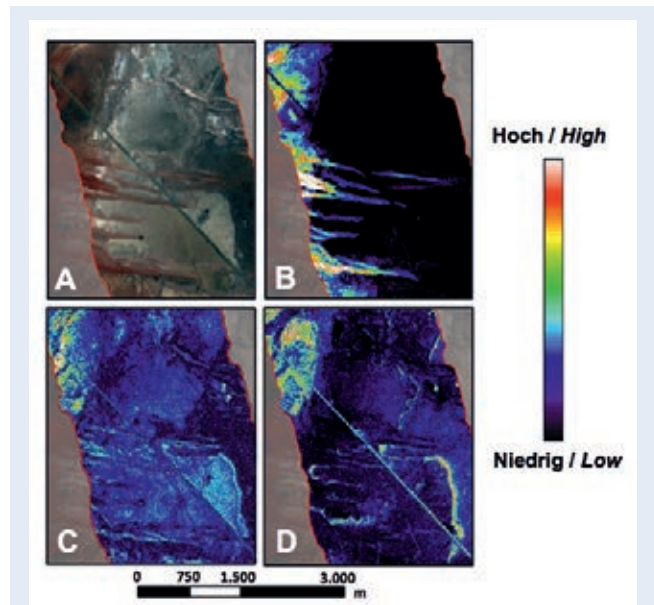


Abb. 4: Ableitung von Bodenkenngrößen aus Hyperspektraldaten aus dem Unterlauf des Molopo mit Hilfe der HYSOMA-Bodenalgorithmen.

A) Hyperspektralaufnahme (HyMap 2009), B) Eisenoxidgehalt, C) Tongehalt, D) Karbonatgehalt (Grafik: R. Milewski, GFZ)

Fig. 4: Determination of soil indicators from hyperspectral imagery in the Molopo river valley based on the HYSOMA software interface. A) Hyperspectral image (HyMap 2009), B) iron oxide content, C) clay content, D) carbonate content

Arbeitsmethoden untersucht. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die zuverlässige Altersdatierung der Sedimente, bei der die Radiokohlenstoff-Methode ( $^{14}\text{C}$ ) an biogenem Material (Pflanzenreste, Schneckengehäuse, Muschelschalen etc.) und die optisch stimulierte Lumineszenz (OSL) zur Altersdatierung von Sedimenten über die Mineralkörner selbst eingesetzt werden. Die Sedimente der Kalahari-Salzpfannen sind in ihrer Korngröße, die ein entscheidender Parameter der Transportenergie ist, sowohl intern als auch regional sehr unterschiedlich zusammengesetzt. Dies gilt auch für die Sedimentpetrographie,

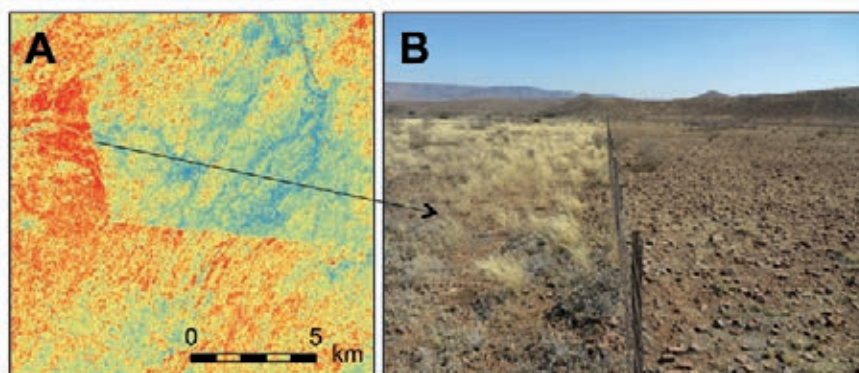


Abb. 5: Folgen der Überweidung (rechts vom Zaun) im Tsauchabtal (Naukluft, Namibia). A) Veränderungsdetektionsanalysen Landsat 30 m (1984-2013) mit Hilfe des IMAD-Algorithmus (Grafik: R. Behling, GFZ), B) Zustand während einer GeoArchives-Feldkampagne im Oktober 2014 (Foto: S. Chabrillat, GFZ)

Fig. 5: Consequences of overgrazing (right from fence) in Tsauchab Valley (Naukluft, Namibia). A) Change detection analyses Landsat 30 m (1984-2013) based on IMAD Algorithm, B) state during a GeoArchives field campaign in October 2014



Abb. 6: Salzpflanzen in der Kalahari und an der Skelettküste als neue Klima- und Umweltarchive. A) Koës-Pfanne mit Trockenriss-Struktur (Foto: S. Genderjahn, GFZ), B) Omongwa-Pfanne mit Salzkruste (Foto: I. Schüller, SaM), C) Schurf in der Toasis-Pfanne (Foto: S. Genderjahn, GFZ), D) Bohrarbeiten in Walvis Bay (Foto: H. Wilkes, GFZ), E) Bohrkern aus der White Lady-Salzpflanze (Foto: I. Schüller, SaM)

Fig. 6: Salt pans in the Kalahari and at the Skeleton Coast as new archives of climatic and environmental change. A) Koës Pan with desiccation cracks, B) Omongwa Pan with salt crust, C) trench in the Toasis Pan, D) drilling at Walvis Bay, E) drill core from the White Lady Salt Pan

also die Zusammensetzung der (Ton-)Minerale. Aus randmarinen Salzpflanzen und Lagunen an der Küste Namibias wurden ebenfalls Sedimentkerne gewonnen. Dieses Material wird mit denselben Methoden untersucht, die auf die Salzpflanzen der Kalahari angewendet wurden. Die vergleichende Interpretation der Ergebnisse soll zur Identifizierung derjenigen Pfannen führen, die für weitere detaillierte Untersuchungen im Sinne der grundlegenden Ziele des Projekts GeoArchives besonders geeignet sind.

#### Organisches Material in Sedimenten zeichnet die Vergangenheit auf

In einer Vorläuferstudie wurde die Eignung organisch-geochemischer Proxyparameter zur Klimarekonstruktion im südlichen Afrika am Beispiel des Tswaing-Sees in der Nähe von Pretoria demonstriert (Abb. 7). Der See befindet sich in einem Krater, der vor etwa 200 000 Jahren durch einen Meteoriteneinschlag entstanden ist, und enthält 90 m mächtige Sedimentschichten. Der Vergleich der Zusammensetzung des organischen Materials im heutigen See und in alten Sedimentschichten eröffnet einen umfassenden Einblick in die Entwicklung dieses Ökosystems (Kristen *et al.*, 2010). Dabei stehen sogenannte Biomarker oder chemische Fossilien im Mittelpunkt des Interesses, die charakteristisch für bestimmte Organismen sind. Die Zusammensetzung des organischen Materials spiegelt also wider, welche Organismen zu einem bestimmten Zeitpunkt im Ökosystem des

Sees gelebt haben. Diese Informationen werden in Beziehung zu anderen organischen Indikatoren gesetzt, die Auskunft über die Klimaentwicklung geben. Besonders nützlich sind dabei die Wasserstoffisotopenwerte der *n*-Alkane, bei denen es sich um Bestandteile der Blattwache von Land- und Wasserpflanzen handelt. Sie zeichnen den Wechsel zwischen feuchteren und trockeneren Phasen in der Entwicklung eines Ökosystems auf. Die Untersuchung der Sedimente aus dem Tswaing-See hat gezeigt, dass Änderungen im Wasserhaushalt während der letzten 84 000 Jahre gut mit den bekannten Schwankungen der Oberflächentemperaturen des Meerwassers im südwestlichen Indik und im südöstlichen Südatlantik korrelieren (Schmidt *et al.*, 2014). Erwartungsgemäß weisen die Sedimente der Kalahari-Salzpflanzen erheblich geringere Gehalte an organischem Material auf als die Sedimente des Tswaing-Sees. Am Beispiel der Omongwa-Pfanne konnte jedoch bereits gezeigt werden, dass dies ausreicht, um Isotopenmessungen an *n*-Alkanen aus Blattwachsen durchzuführen, um auch dort Aufschluss über historische Änderungen von Vegetation und Wasserhaushalt zu erhalten.

#### Von Überlebenskünstlern und Extremisten

Die bisher untersuchten Salzpflanzen der Kalahari sind aufgrund ihrer klimazonalen Lage durch eine hohe Verdunstungsrate und

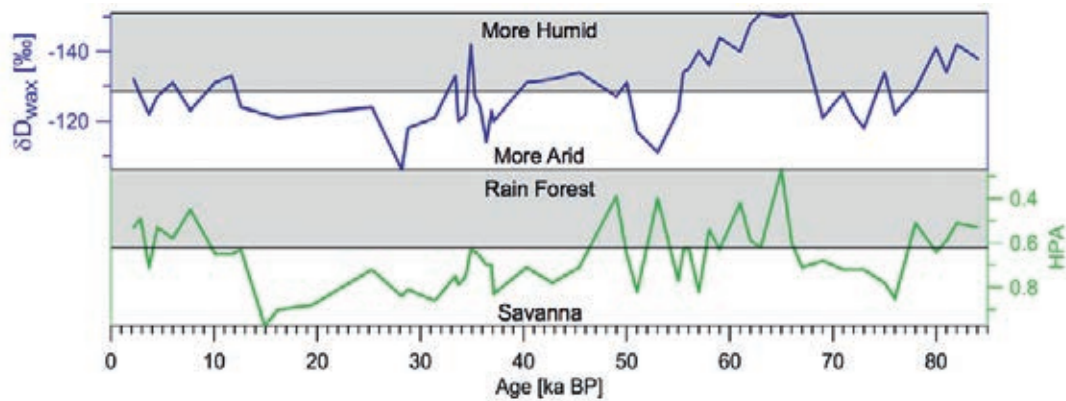


Abb. 7: Der Tswaing-See in Südafrika ist ein wichtiges Klimaarchiv für die Südhemisphäre (Fotos: H. Wilkes, GFZ). Die Wasserstoffisotopenwerte der n-Alkane von Blattwachsen ( $\delta D_{wax}$ ) zeichnen hydrologische Veränderungen auf. Die Reaktion der Vegetation kann mit dem Higher Plant Alkane (HPA)-Index nachvollzogen werden (Schmidt et al., 2014).

Fig. 7: Lake Tswaing in South Africa is an important climate archive for the Southern Hemisphere. The hydrogen isotope values of n-alkanes from cuticular waxes ( $\delta D_{wax}$ ) record changes in hydrology. The response of the vegetation can be assessed using the Higher Plant Alkane (HPA) Index (Schmidt et al., 2014).

damit einhergehend hohe Salzgehalte an der Oberfläche gekennzeichnet. Da Wasser eine grundlegende Voraussetzung für jedwede Form von Leben ist, stellen diese Bedingungen eine besondere Herausforderung für die Besiedlung durch Organismen dar (Abb. 8). Unter den vorherrschenden Bedingungen können nur Organismen mit einer hohen Anpassungsfähigkeit existieren. Diese sogenannten extremophilen Mikroorganismen haben ihren Stoffwechsel und bestimmte Zellbestandteile wie beispielsweise die Zellmembran soweit angepasst, dass sie extreme Trockenheit, geringe Nährstoffgehalte und intensive UV-Strahlung, wie sie im Untersuchungsgebiet vorkommen, überstehen und aktiven Stoffwechsel betreiben können. Die

Existenz dieser Überlebenskünstler in den Salzpflanzen wird durch die relativ hohen Zellzahlen mit bis zu 100 Mio. Zellen pro Gramm Sediment bestätigt. Da der Gehalt an organischem Kohlenstoff, der als Indikator für die Nährstoffversorgung dient, in den meisten Sedimenten der Untersuchungsstandorte extrem gering ist, kann davon ausgegangen werden, dass zumindest ein Teil der Mikroorganismengemeinschaften zur autotrophen Lebensweise, also zur Nutzung von Kohlendioxid als alleiniger Kohlenstoffquelle, befähigt ist. Über die genaue Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften in den Sedimenten der Salzpflanzen und später auch in den Lagunen-Sedimenten sollen moderne molekularbiologische und biogeochemische



Abb. 8: Geschichtete Mikrobenmatte in einer Salzpfanne an der Skelettküste (Foto: M. Alawi, GFZ)

Fig. 8: Layered microbial mat in a salt pan on the Skeleton Coast

Methoden Aufschluss geben. Mit diesen Verfahren kann die Struktur und Funktion der mikrobiellen Gemeinschaften im Detail aufgeklärt und durch Einbeziehung weiterer Umweltdaten (z.B. Temperatur, Salzgehalt, Kohlenstoff, Stickstoff, lösliche Ionen) deren Reaktion auf Änderungen der Umwelt in der Vergangenheit rekonstruiert werden.

## Fazit und Ausblick

GeoArchives nutzt bestehende und entwickelt zukünftige Werkzeuge der Erdsystemanalyse in kontinentalen und marinen Bereichen, um wissenschaftliche Entscheidungsgrundlagen im Hinblick auf die Anpassung an die globalen Veränderungen zu liefern. Ziel ist es, unter Berücksichtigung zurückliegender langfristiger Entwicklungen Szenarien aufzuzeigen, die sich in Folge zukünftiger Landschafts- und Klimaveränderung im südlichen Afrika ergeben könnten. Auf Grundlage der Analyse der terrestrischen und marinen Geoarchive wird das Verbundprojekt einen Wissenstransfer zwischen Forschung, Wirtschaft und der Gesellschaft liefern. Die Erforschung sensibler Regionen Südafrikas hinsichtlich der Auswirkungen künftiger klimatischer Veränderungen und veränderter Landnutzung wird ein zukunftsorientiertes Management des *human habitat* vor einem geowissenschaftlichen Hintergrund ermöglichen.

## Zitierte und weiterführende Literatur

- Ben-Dor, E., Chabrillat, S., Demattê, J. A. M., Taylor, G., Hill, J., Whiting, M. L., Sommer, S. (2009): Using imaging spectroscopy to study soil properties. - *Remote Sensing of Environment*, 113, Suppl. 1, p. S38-S55. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.019>
- Chabrillat, S., Ben-Dor, E., Viscarra Rossel, R. A., Demattê, J. A. M. (2013): Quantitative Soil Spectroscopy. - *Applied and Environmental Soil Science*, 13, ID 616578. DOI: <http://doi.org/10.1155/2013/616578>
- Heine, K., Völkel, J. (2011): Extreme floods around AD 1700 in the southern Namib Desert, Namibia, and in the Orange River catchment, South Africa. - *Where they forced by a decrease of solar irradiation during the Little Ice Age?* – *Geographica Polonica*, 84, Special Issue Pt. 1, p. 61-80. DOI: <http://dx.doi.org/10.7163/GPol.2011.S1.5>
- Heine, K., Völkel, J. (2010): Soil clay minerals in Namibia and their significance for the terrestrial and marine past global change research. - *African Study Monographs, Suppl.* 40, p. 31-50.
- Hürkamp, K., Völkel, J., Heine, K., Bens, O., Leopold, M., Winkelbauer, J. (2011): Late quaternary environmental changes from aeolian and fluvial geoarchives in the Southwestern Kalahari, South Africa: implications for past african climate dynamics. - *South African Journal of Geology*, 114, 3-4, p. 459-474. DOI: <http://doi.org/10.2113/gssaig.114.3-4.459>
- Kristen, I., Wilkes, H., Vieth-Hillebrand, A., Zink, K.-G., Plessen, B., Thorpe, J., Partridge, T. C., Oberhänsli, H. (2010): Biomarker and stable carbon isotope analyses of sedimentary organic matter from Lake Tswaing: evidence for deglacial wetness and early Holocene drought from South Africa. - *Journal of Paleolimnology*, 44, 1, p. 143-160. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10933-009-9393-9>
- Leopold, M., Völkel, J., Heine, K. (2006): A ground-penetrating radar survey of late Holocene fluvial sediments in NW Namibian river valleys: characterization and comparison. - *Journal of the Geological Society*, 163, 6, p. 923-936. DOI: <http://doi.org/10.1144/0016-76492005-092>
- Schmidt, F., Oberhänsli, H., Wilkes, H. (2014): Biocoenosis response to hydrological variability in Southern Africa during the last 84kaBP: A study of lipid biomarkers and compound-specific stable carbon and hydrogen isotopes from the hypersaline Lake Tswaing. - *Global and Planetary Change*, 112, p. 92-104. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.11.004>

# Der Bushveld-Komplex: die größte Intrusion der Erde und wichtigste Quelle für mineralische Rohstoffe der Platinmetalle

Robert B. Trumbull<sup>1</sup>, Ilya V. Veksler<sup>1</sup>, David L. Reid<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Department of Geological Sciences, University of Cape Town, Südafrika

*The Bushveld Complex in South Africa is the world's largest magmatic intrusion and at the same time the most important source of technologically important metals including chromium, vanadium and above all the platinum group elements. This flat, saucer-shaped intrusion has a volume of about 1 million km<sup>3</sup> and by itself classifies as a Large Igneous Province. Within this vast intrusion, the platinum ores are mined from just two thin layers: the Merensky Reef and the UG<sub>2</sub>. Each of these is about one meter thick and both are continuous over hundreds of kilometers. The ore-bearing horizons, like other layers in the complex, clearly formed by igneous processes of crystallization in a magma chamber. The research challenges are to understand what processes accomplished the thousand-fold concentration of platinum from background levels to ore grade, and how ores were concentrated in such thin layers in a 9 kilometer-thick intrusion. Apart from providing answers to these scientific questions, the detailed mineralogical and microchemical studies of Bushveld ores at the GFZ are also being applied to find ways of improving the efficiency of ore beneficiation and platinum recovery.*



Der Bushveld-Komplex in Südafrika entstand vor 2,05 Mrd. Jahren und ist die mit Abstand größte je entdeckte Magmenintrusion der Erde. Diese Intrusion liegt nördlich der Hauptstadt Pretoria, ist rund 300 km breit, 9 km mächtig und bedeckt eine Fläche von 70 000 km<sup>2</sup>, was der Größe des Freistaats Bayern entspricht (Abb. 1).

Das geschätzte Volumen dieser schüsselförmigen Intrusion beträgt rund 1 Mio. km<sup>3</sup> und gilt damit als „Large Igneous Province“ (LIP). LIPs treten weltweit und in jedem Erdzeitalter auf, sie sind aber unregelmäßig verteilt und nicht an Plattengrenzen gebunden. Die Deccan Traps in Indien und die Paran -Etendeka-Provinz in Südamerika und Namibia sind weitere Beispiele für LIPs. Sie entstehen durch Vorgänge im tiefsten Erdmantel und an der Kern-Mantel-Grenze in Zusammenhang mit der Bildung und dem Aufstieg von heißen Mantelplumes (vgl. Beitrag von Steinberger *et al.* in diesem Heft).

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ untersucht im Bushveld-Komplex Prozesse der Magmenbildung und -entwicklung in einer LIP. Da in Bushveld die Magmenentwicklung eng mit einer Vererzung verbunden ist, kann hier zudem die Entstehung mineralischer Rohstoffe untersucht werden; der Komplex ist sehr reich an Chrom, Nickel, Vanadium und vor allem an Platinmetallen. Seit dem Jahr 2010 beteiligt sich das GFZ gemeinsam mit den Universitäten Kapstadt und Bloemfontein an einem Forschungsprojekt im Bushveld, das im Rahmen des Verbundprojekts Inkaba yeAfrica durchgeführt wird. Das Ziel dieser Arbeiten ist es, die Entstehung der Platinerze in Zusammenhang mit Prozessen der Magmenentwicklung (Kristallisation, Fraktionierung, Assimilation) zu verstehen.

Das besondere Merkmal von Bushveld ist ein ausgeprägt regelmässiger Lagenbau der Gesteine, der dank der wirtschaftlichen Bedeutung durch Bergbau und Bohrungen gut aufgeschlossen ist (Abb. 2). An Bohrkernen können die Gesteinsabfolgen in der Magmenkammer und insbesondere die Übergänge zu den Erzlagen lückenlos und in Detail untersucht werden.

Die schwarzen Streifen in der Abbauwand in Abb. 2a und im Bohrkern (Abb. 2b) sind Minerallagen von fast reinem Chromit (FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), die in Wechsellagerung mit wei grauem Anorthosit (Ca-Feldspat) vorkommen. An vielen Stellen im Bushveld wird

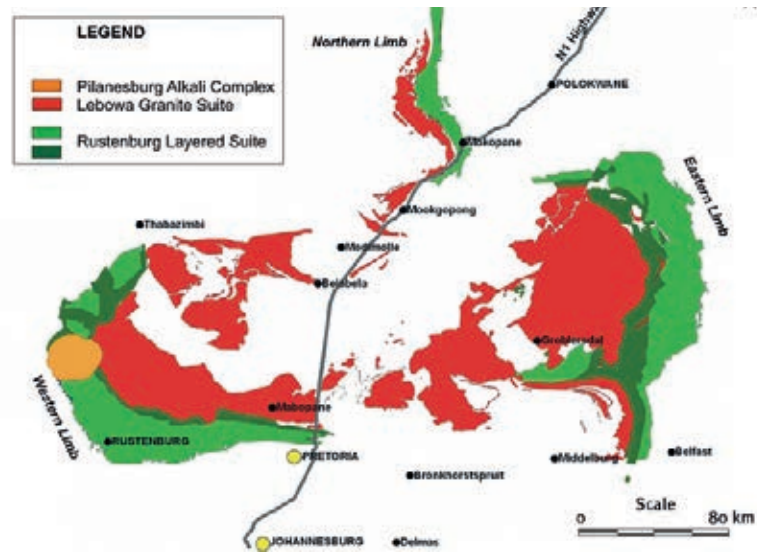


Abb. 1: Lokation und Gr sse des Bushveld-Komplexes in Süd Afrika. An den Rändern des Komplexes befinden sich in der „Rustenburg Layered Suite“ (grün) bedeutende Chrom- und Platinminen.

Fig. 1: Location and size of the Bushveld Complex in South Africa. The famous chromium and platinum mines are located along the outer rims of the complex in the “Rustenburg Layered Suite” (green colours).

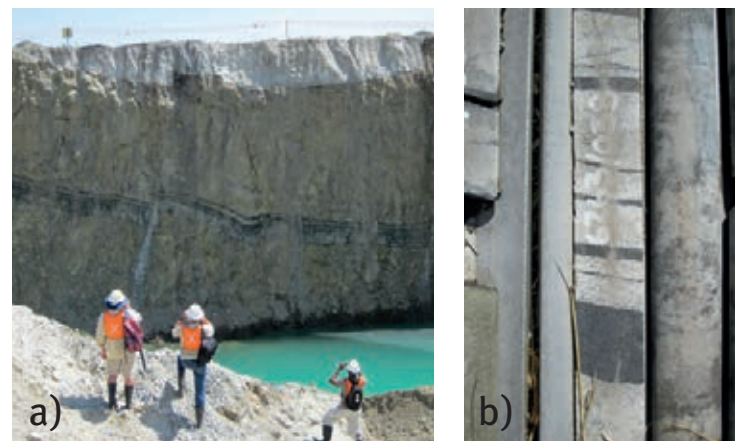


Abb. 2: Beispiele des auffälligen Lagenbaus im Bushveld-Komplex. a) Die Abbauwand einer Platinmine zeigt eine Wechsellagerung von Chromit (schwarz) und Anorthosit (weiß). Die Chromitlagen in diesem Foto sind bis zu einem Meter dick. b) Feinskalige Wechsellagerung von Chromit und Anorthosit in Bohrkernen der Erzlage UG2 (Fotos: R. Trumbull, GFZ)

Fig. 2: The spectacular layering of the Bushveld Complex. a) The working face of a platinum mine shows alternating chromite (black) and anorthosite (white) layers. The chromite layers are up to 1 meter thick. b) fine-scale layering of chromite and anorthosite in drill cores of the UG<sub>2</sub> ore horizon

Links: Platinbergbau am Südrand des Bushveld-Komplexes (Foto: R. Trumbull, GFZ)

Left: Platinum mining in the southern Bushveld complex



Kontakt: R. B. Trumbull  
(robert.trumbull@gfz-potsdam.de)

Chrom aus solchen Chromitlagen gewonnen; ganz ähnliche Lagen aus Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) sind weltbedeutende Ressourcen für Vanadium. Chrom und Vanadium sind wichtige Rohstoffe zur Stahlveredlung und Südafrika zählt zu deren weltgrößten Lieferanten. Am wertvollsten sind aber die Platinerze, denn der Bushveld-Komplex birgt etwa 70% der bekannten Weltreserven an Edelmetallen der Platingruppe (Platin, Palladium, Iridium, Osmium, Ruthenium und Rhodium).

Die Elemente der Platingruppe sind für viele technische Anwendungen unersetzlich und der Bedarf steigt stetig. So werden z. B. nahezu alle neuen Automobile und Lastwagen weltweit mit Platin- oder Palladium beschichteten Katalysatoren ausgestattet. Deutschland und Südafrika befinden sich diesbezüglich in einer symbiotischen Partnerschaft. Südafrika ist der weltgrößte Platinproduzent, während Deutschland als Technologiestandort einer der wichtigsten Endabnehmer von Platinmetallen ist (etwa 20% des Weltmarkts), aber keine eigenen Reserven besitzt.

## Die Platinerze im Bushveld und ihr Entdecker

Im Gegensatz zu Gold, Silber, Kupfer, Blei und Zink, die weit verbreitet sind und in verschiedenen Erztypen vorkommen, werden Erze der Platinmetalle nur in mafischen (d. h. in hohem Maß magnesium- und eisenhaltigen) Intrusionen gefunden, wobei der Bushveld-Komplex in Südafrika die bei weitem größte Intrusion ist. Der Entdecker der Platinerze im Bushveld-Komplex, Hans Merensky (1871 bis 1952), wurde als Sohn eines deutschen Missionars in Südafrika geboren, ging in Brandenburg zur Schule und studierte Bergbau und Geologie in Berlin. Im Jahr 1904 kehrte er zurück nach Südafrika und arbeitete als Wirtschaftsgeologe in vielen Branchen der Mineralindustrie, bis er 1924 seine berühmte Entdeckung der Platinerze im Bushveld machte. Das erstaunliche an dieser Lagerstätte ist, dass weit mehr als die Hälfte aller Weltreserven der Platinmetalle in nur zwei jeweils etwa meterdicken Gesteinslagen konzentriert sind, die kontinuierlich über Hunderte von Kilometern verlaufen. Eine der beiden Erzlagen ist nach Hans Merensky benannt: das „Merensky Reef“. Die zweite liegt etwa 50 bis 100 m unterhalb des Merensky Reefs und trägt den eher unscheinbaren Namen „UG2“. Beide Lagen sind magmatische Kumulatgesteine, d. h. sie entstanden als Kristallablagerungen in der Bushveld-Magmenkammer.

Der natürliche Gehalt an Platinmetallen im Erdmantel und in der Kruste beträgt nur wenige Milligramm pro Tonne Gestein, das gilt auch für das ursprüngliche Magma der Bushveld-Intrusion. Die Platinerze von Bushveld enthalten dagegen 3 bis 10 g/t, welches eine tausendfache Anreicherung der Metalle in der Magmenkammer erfordert. Seit der Entdeckung der Erze durch Hans Merensky werden zwei grundsätzliche Fragen kontrovers diskutiert: welche Prozesse haben bei der Platinvererzung im Bushveld eine Rolle gespielt und warum sind die Erze in nur zwei Lagen des Komplexes konzentriert – oder gibt es noch weitere? Vieles spricht dafür, dass die Entstehung der Platinerze

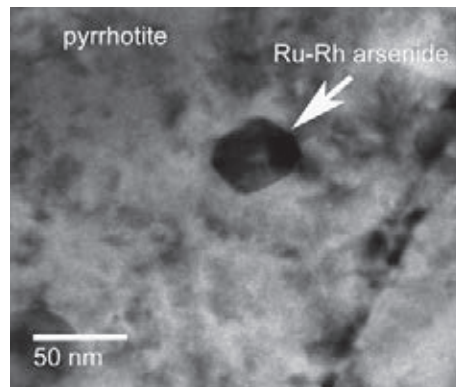


Abb. 3: Diese Aufnahme mit dem hochauflösenden Transmissionselektronenmikroskop (HRTEM) am GFZ brachte erstmals den Beweis für Nanominerale der Platinmetalle im Merensky Reef (Ru= Ruthenium; Rh=Rhodium). (Foto: R. Wirth, GFZ)

Fig. 3: This image from the high-resolution transmission electron microscope (HRTEM) at GFZ furnished the first proof of natural nanominerals of platinum.

im Bushveld mit den Prozessen der Abkühlung, Kristallisation und chemischen Fraktionierung des Magmas zusammenhängt. Darauf weisen die Form und die räumliche Verteilung der Erzlagen sowie deren Mineralbestand, chemische Zusammensetzung und Gefüge hin. Aber die 1000-fache Metallanreicherung in diesen Lagen lässt sich durch „klassische“ Vorgänge der Kristallisation und Fraktionierung von Magmen nicht erklären, diese sind nicht effizient genug.

Neue Erklärungsansätze zur Genese der Platinerze ergeben sich vor allem aus Vergleichsstudien zwischen dem Bushveld-Komplex in Südafrika und der Skaergaard-Intrusion in Grönland, an denen das GFZ gemeinsam mit zwei internationalen Gruppen beteiligt ist. Beide Intrusionen haben einen ähnlichen Aufbau und eine ähnliche chemische Zusammensetzung, nur ist Skaergaard deutlich kleiner und die Platinvererzung dort ist derzeit wirtschaftlich uninteressant.

Schon 1995 postulierten *Tredoux et al. (1995)*, dass die Anreicherung der Platinelemente in Bushveld bereits vor der Kristallisation in der Schmelze beginnt, und zwar durch die Bildung atomarer Cluster oder „nano-nuggets“, die als Kristallisationskeime dienen und die Abtrennung der Metalle aus dem Magma effizienter machen. Die Existenz solcher Cluster in natürlichen Platinerzen konnte erst nach der Entwicklung geeigneter Technologien nachgewiesen werden. Im Jahr 2013 ist es am GFZ mittels hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie gelungen, erstmals Nanopartikel von Platinmineralen in Proben des Merensky Reefs nachzuweisen (*Wirth et al., 2013*) (Abb. 3). Weitere Untersuchungen zur Charakterisierung dieser Phasen und zu deren Rolle bei der Vererzung dauern an.



Einen anderen Ansatz verfolgt die „Skaergaard-Gruppe“, die mit Feldstudien und Laborexperimenten die physikalisch-chemische Entwicklung der Schmelze während der Kristallisation in einer Magmenkammer untersuchen. Manche Minerale enthalten noch Einschlüsse von Schmelztropfen (heute Glas) und die Schmelzeinschlüsse in Skaergaard geben Hinweise darauf, dass eine Entmischung in der Schmelze während der Kristallisation stattfand. Bei der Entmischung entstehen zwei Schmelzen, die sich wegen unterschiedlicher Dichte und Viskosität voneinander trennen können. Der Nachweis von Schmelzentmischung in Gesteinen der Skaergaard-Intrusion wurden von *Jakobsen et al. (2005; 2011)* und *Holness et al. (2011)* publiziert. Parallel dazu zeigten experimentelle Arbeiten am GFZ (*Veksler et al., 2007; Veksler, 2009*), dass die Schmelzentmischung auch eine effiziente chemische Trennung von Elementen bewirkt. Das trifft zum Beispiel auf die Elemente Eisen und Phosphor zu, und genau diese sind an bestimmten Stellen der Skaergaard- und Bushveld-Intrusionen stark angereichert. In Bushveld treten vielerorts die enigmatischen „Iron-Rich Ultramafic Pegmatites“ oder IRUPs auf. IRUPs sind dunkle Intrusivgesteine, die bevorzugt im Bereich der erzführenden Lagen im Merensky Reef und in der tiefen Lage UG2 vorkommen und diese durchschlagen (Abb. 4). Ihre Entstehung und ihre Signifikanz für die Platinvererzung konnte bisher nicht erklärt werden. Ob die Prozesse der Schmelzentmischung zur Lösung dieser Fragen beitragen können, wird derzeit in einem DFG-Projekt gemeinsam mit der Universität Kapstadt und der Technischen Universität Berlin geprüft.

### Ausblick: Mineralforschung für die Rohstoffeffizienz

Detaillierte Kenntnisse der platinhaltigen Minerale und ihrer Verteilung im Erz tragen dazu bei, die Prozesse der Erzbildung im Bushveld-Komplex besser zu verstehen, wie hier am Beispiel der „nano-nuggets“ von *Wirth et al. (2013)* gezeigt wird. Dabei sind vor allem quantitative Informationen über Korngrößen und Kornformen der Erzminerale für die Entschlüsselung der Bildungsprozesse entscheidend. Dieselben Daten werden auch für die Verfahrensentwicklung in der Erzaufbereitung und Metallgewinnung benötigt. Die Grundlagenforschung und angewandte Forschung sollen daher durch ein neues, vom GFZ koordiniertes Projekt AMREP (Angewandte Mineralogie für Ressourceneffizienz der Platinmetalle) verbunden werden. Die effiziente Gewinnung von nur wenigen Gramm Platin pro Tonne Gestein ist schwierig und teuer, was unter anderem daran liegt, dass die Platinträgerminerale im Erz fein verteilt, sehr feinkörnig und mineralogisch verschieden sind. Diese Faktoren beeinflussen ganz entscheidend die Erzaufbereitung. Derzeit liegt im Durchschnitt die Gesamteffizienz der Metallgewinnung in Bushveld bei 70 bis 80%. Das bedeutet, dass 20 bis 30% der Platingehalte in den Erzlagen ungenutzt auf Halden lagern. Das Ziel des Projekts AMREP ist es, die Effizienz der Metallgewinnung durch bessere Kenntnisse der Erzmineralogie und andere aufbereitungsrelevante Eigenschaften der Erze zu steigern. Damit können wichtige Beiträge zu einer verbesserten Ressourcennutzungseffizienz und Versorgungssicherheit geleistet werden.



Abb. 4: An der Abbauwand einer Platinmine im südlichen Bushveld-Komplex sind mehrere dunkle Intrusionen von eisenreichen Gesteinen (IRUPs) zu sehen. Die Erzlage UG2 liegt am Fuße der Abbauwand. (Foto: R. Trumbull, GFZ)

Fig. 4: The far wall of an open pit platinum mine in the southern Bushveld Complex shows numerous intrusions of dark, iron-rich rocks (IRUPs). The UG2 ore horizon is located at the foot of the pit.

### Literatur

- Holness, M. B., Stripp, G., Humphreys, M. C. S., Veksler, I., Nielsen, T. F. D., Tegner, C. (2011): Silicate Liquid Immiscibility within the Crystal Mush: Late-stage Magmatic Microstructures in the Skaergaard Intrusion, East Greenland. - *Journal of Petrology*, 52, 1, p. 175-222. DOI: <http://doi.org/10.1093/petrology/egq077>
- Jakobsen, J. K., Veksler, I., Tegner, C., Brooks, C. K. (2011): Crystallization of the Skaergaard Intrusion from an Emulsion of Immiscible Iron- and Silica-rich Liquids: Evidence from Melt Inclusions in Plagioclase. - *Journal of Petrology*, 52, 2, p. 345-373. DOI: <http://doi.org/10.1093/petrology/egq083>
- Jacobsen, J. K., Veksler, I., Tegner, C., Brooks, C. K. (2005): Immiscible iron- and silica-rich melts in basalt petrogenesis documented in the Skaergaard intrusion. - *Geology*, 33, 11, p. 885-888. DOI: <http://doi.org/10.1130/G21724.1>
- Tredoux, M., Lindsay, N. M., Davies, G., McDonald, I. (1995): The fractionation of platinum group elements in magmatic systems, with the suggestion of a novel causal mechanism. - *South African Journal of Geology*, 98, 2, 157-167.
- Veksler, I. (2009): Extreme iron enrichment and liquid immiscibility in mafic intrusions: experimental evidence revisited. - *Lithos*, 111, p. 72-82. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.10.003>
- Veksler, I., Dorfman, A. M., Borisov, A. A., Wirth, R., Dingwell, D. B. (2007): Liquid Immiscibility and the Evolution of Basaltic Magma. - *Journal of Petrology*, 48, 11, p. 2187-2210. DOI: <http://doi.org/10.1093/petrology/egm056>
- Wirth, R., Reid, D., Schreiber, A. (2013): Nanometer-sized Platinum-Group Minerals (PGM) in base metal sulfides: new evidence for an orthomagmatic origin of the Merensky Reef PGE ore deposit, Bushveld Complex, South Africa. - *Canadian Mineralogist*, 51, 1, p. 143-155. DOI: <http://doi.org/10.3749/canmin.51.1.143>

# Anwendung der Fernerkundung in der Exploration und im Haldenmonitoring im südlichen Afrika

Christian Mielke, Christian Rogass, Nina Boesche, Hermann Kaufmann, Luis Guanter  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Remote sensing is an integral part of mineral exploration and mine waste monitoring today. The pool of geoscientific applications for remote sensing is rapidly growing with the advent of new spaceborne sensors such as the hyperspectral EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) and the multispectral Sentinel-2 missions. The main advantage of hyperspectral data is the capability to identify surface materials via their characteristic absorption features, casually called “the spectral fingerprint” and map their spatial distribution. These characteristic absorption features can be used e.g. to map the abundance of rare earth elements, or map mineral assemblages that are characteristic for sulfide ore deposits. In addition to that, mine waste material can be characterized and mapped. South Africa and Namibia with their long mining history provide excellent natural laboratories for the development of new geoscientific applications for mineral exploration and environmental monitoring, due to the large areas affected by tailings dams and the large and remote desert areas, which hold the potential for new mineral deposit sites. Hyperspectral airborne data is widely used in South Africa and Namibia. However, it is too sparse and too expensive for certain applications such as the environmental monitoring of tailings sites. A combination of multispectral and hyperspectral spaceborne sensors has shown its potential to bridge this apparent gap in mine waste mapping and monitoring.*



Namibia und Südafrika sind zwei Länder im südlichen Afrika, die ein ausgezeichnetes natürliches Labor für die wissenschaftliche Entwicklung und den Einsatz neuer, vor allem satellitengestützter Fernerkundungsanwendungen darstellen. Der wichtigste Grund für den Einsatz von Fernerkundungsmethoden in diesen Ländern liegt in der großen räumlichen Ausdehnung der von Bergbauaktivität betroffenen Flächen. Dies wird im Foto links deutlich. Hierbei handelt es sich um eine Halde mit Resten aus der Goldgewinnung in der Nähe von Klerksdorp in Südafrika. Um Johannesburg wurden in mehr als 100 Jahren Goldbergbauaktivität unzählige Halden abgelagert und umgelagert, die einen elementaren Bestandteil dieses urbanen Großraums bilden. Der Platinabbau, der schon seit 90 Jahren entlang eines Teils des Bushveld-Komplexes durchgeführt wird (Abb. 1, grau umrandeter Bereich), stellt den zweiten bedeutenden Bergbauzweig in dieser Region dar. In den genannten Großräumen leben laut Statistiken der südafrikanischen Regierung insgesamt rund 17 Mio. Menschen, die potenziell gesundheitlichen Risiken durch Haldenabfälle ausgesetzt sind.

Mögliche Folgeprobleme, die durch jahrzehntelangen Bergbau im südlichen Afrika verursacht werden, sind Kontaminationen von Luft, Wasser und Boden, z. B. durch Lösung, Transport und Anreicherung von Schwermetallen. Dies ist besonders in Ländern mit einer zunehmend angespannten Wasserversorgungslage, wie in Südafrika, von elementarer Bedeutung. Eine Überwachung der Bergbauaktivitäten und der Haldenlandschaften mittels neuester Satellitenmissionen, wie z. B. EnMAP, bei dem das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ die wissenschaftliche Leitung inne hat, und Sentinel-2, kann hierbei helfen, sich abzeichnende Probleme wie z. B. saure Minenabwässer und die Ausbreitung von Haldenmaterial in die Umgebung frühzeitig zu erkennen und diesen rechtzeitig entgegenzuwirken. Damit trägt das GFZ dem Anspruch der Entwicklung neuester Technologien und Methoden und deren Einsatz zum Wohle der Gesellschaft Rechnung. Zusätzlich kann durch eine enge Zusammenarbeit mit der Wirtschaft, wie z. B. in den Bereichen Exploration und Abbau von Bodenschätzen, durch den gezielten Einsatz und die Entwicklung neuester Methoden in der abbildenden Spektroskopie eine Minimierung des ökologischen Fußabdrucks erreicht werden, der zusätzlich eine Steigerung der Kosteneffizienz im

Links: Beprobung einer Goldabraumhalde in Stilfontein nahe Klerksdorp, Südafrika (Foto: C. Mielke, GFZ)

Left: Soil sampling on top of gold mine tailings dam in Stilfontein near Klerksdorp, South Africa

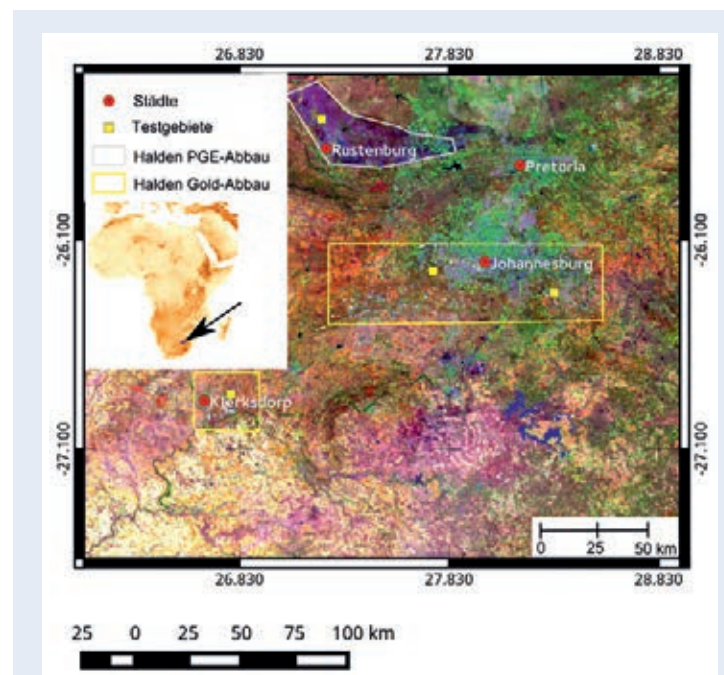


Abb. 1: Landsat 8 OLI-Falschfarbaufnahme (Rot: 2200 nm, Grün: 860 nm, Blau: Grün) des Großraums Rustenburg, Pretoria und Johannesburg mit einer Darstellung der räumlichen Verbreitung von Haldengebieten aus dem Gold- und Platinabbau (PGE: Elemente der Platingruppe)

Fig. 1: Landsat 8 OLI false color composite (Red: 2200 nm, Green: 860 nm, Blue: Green) of the Rustenburg-Pretoria-Johannesburg urban area outlining the spatial distribution of gold and platinum tailings (PGE: Platin Group Elements)

Abbau bewirkt. Die Anwendung der abbildenden Spektroskopie führt darüber hinaus auf allen Skalen (Mikroskop, Labor, Aufschluss, Flugzeug und Satellit) zu einem klareren Abbild des Systems Erde und seiner Prozesse.

Die Fernerkundung und die abbildende Spektroskopie können durch Ihre Fähigkeit, Oberflächenmaterialien zu detektieren und Flächenkonzentrationsgradienten aufzuzeigen, wertvolle Hinweise über die Art des Haldenmaterials sowie über dessen räumliche und zeitliche Verteilung liefern. Eine flächenhafte, berührungsfreie Untersuchung von geologischen Objekten, wie z. B. Aufschlüssen, kann durch den Einsatz von abbildenden Spektrometern erreicht werden. Dabei kommen Zeilenscanner wie das HySpex-System zum Einsatz. Seine Messkameras arbeiten im sichtbaren Bereich und nahen Infrarot (VNIR 400-1000 nm) und im kurzwelligen Infrarot (SWIR 1000-2500 nm). Die flächenhafte Aufnahme des Objekts wird durch die Rotation



Kontakt: C. Mielke  
(chmielke@gfz-potsdam.de)

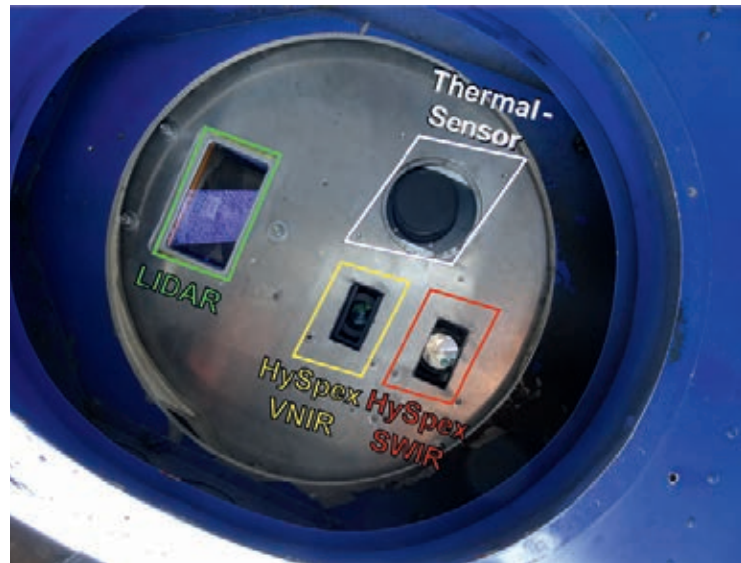


Abb. 2: Abbildende Spektrometersysteme (GFZ-HySpex, Zeilenscanner) im Flugbetrieb, hier in Zusammenarbeit mit der MILAN Geoservice GmbH, mit einem Laserscanner (LIDAR) zur Aufnahme des Geländes. Zusätzlich wird eine Thermalkamera eingesetzt. Rechts: Sensoren auf der Flugzeugunterseite (Fotos: M. Brell, GFZ)

Fig. 2: GFZ-HySpex (line-scanner) in flight-mode here in close cooperation with the MILAN Geoservice GmbH, additionally equipped with a laser-scanner (LIDAR) to capture the terrain information. Additionally a thermal infrared camera is used. Right: Sensors on the under-surface of the aircraft

der Sensorköpfe realisiert. Diese Messkameras können auch für den Flugbetrieb genutzt werden (Abb. 2). Neueste abbildende Spektrometer, wie die Cubert UHD-185, sind zudem in der Lage, ein flächenhaftes, spektrales Abbild des Aufschlusses in einem singulären Scanschritt zu erzeugen. Die spätere Analyse der so gewonnenen Spektren geschieht mit Hilfe von materialspezifischen, charakteristischen Absorptionsbanden, umgangssprachlich auch als „spektraler Fingerabdruck“ bezeichnet. Dieser Fingerabdruck ist eine eindeutige spektrale Eigenschaft, die repräsentativ für bestimmte Materialgruppen (Vegetation, Gesteine, Metalle, etc.) und auch deren einzelne Stoffe, Moleküle und Elemente ist. Dieser wird durch Absorption von Licht im solar-reflektiven Bereich von 350 bis 2500nm infolge Interaktion mit den Oberflächenmaterialien verursacht. Diese Absorptionssignaturen werden in einer Datenbank erfasst, der sogenannten Spektralbibliothek (Swayze, 2014). Ein mathematischer Abgleich dieser spektralen Datenbank mit unbekanntem Spektren aus abbildenden Spektrometern an Board von Flugzeugen oder Satelliten ermöglicht eine flächenhafte Charakterisierung des Oberflächenmaterials einer gesamten Region (Kokaly, 2012; Rogass et al., 2012). Um die Vergleichbarkeit von Bibliotheksspektren, die im Labor gewonnen wurden, mit den Fernerkundungsdaten zu ermöglichen, sind umfangreiche geometrische und radiometrische Korrekturen nötig (Guanter et al., 2009). Die durch diese Operationen gewonnene Messgröße ist die Reflektanz, welche, vereinfacht dargestellt, das Verhältnis zwischen der von dem Objekt ausgehenden Strahlung zu der einfallenden Strahlung bezeichnet. Die Reflektanz enthält somit

materialspezifische Informationen für alle Oberflächenmaterialien, die mit der Spektralbibliothek verglichen werden können, wie in den Abb. 3 und 4 beispielhaft dargestellt.

### Ergebnisse der fernerkundlichen Untersuchungen im südlichen Afrika

Der Einsatz flugzeuggetragener, abbildender Spektrometer kann in den Ländern des südlichen Afrikas aufgrund des hohen logistischen Aufwands und der damit verbundenen hohen Kosten nur lokal und zeitlich begrenzt erfolgen (Mielke et al., 2014). In diesen Gebieten sind daher für die fernerkundlichen Anwendungen vor allem Satellitensensoren aufgrund der oben benannten Kosteneffizienz von Vorteil. Diese Sensoren müssen für eine Anwendung z. B. in der räumlichen Überwachung eine ausreichende zeitliche Auflösung und räumliche Abdeckung bieten, wie beispielsweise die „State of the Art“-Sensoren der NASA Hyperion (hyperspektral) und Landsat 8 OLI (multispektral) sowie die zukünftigen Sensoren EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program, hyperspektral; Kaufmann et al., 2006) und Sentinel-2 (multispektral; Mielke et al., 2014). Diese werden über eine „freie Daten“-Politik verfügen und sind somit als Datenquelle für Anwendungen in Schwellenländern, wie dem südlichen Afrika, geeignet. Zusätzlich bieten hyperspektrale Satellitendaten, wie z. B. von EnMAP, die Möglichkeit zur schnellen, großflächigen Charakterisierung der Oberflächenmineralogie in schwer zugänglichen, ariden Gebieten, wie in der Grenzregion von Südafrika und Namibia.

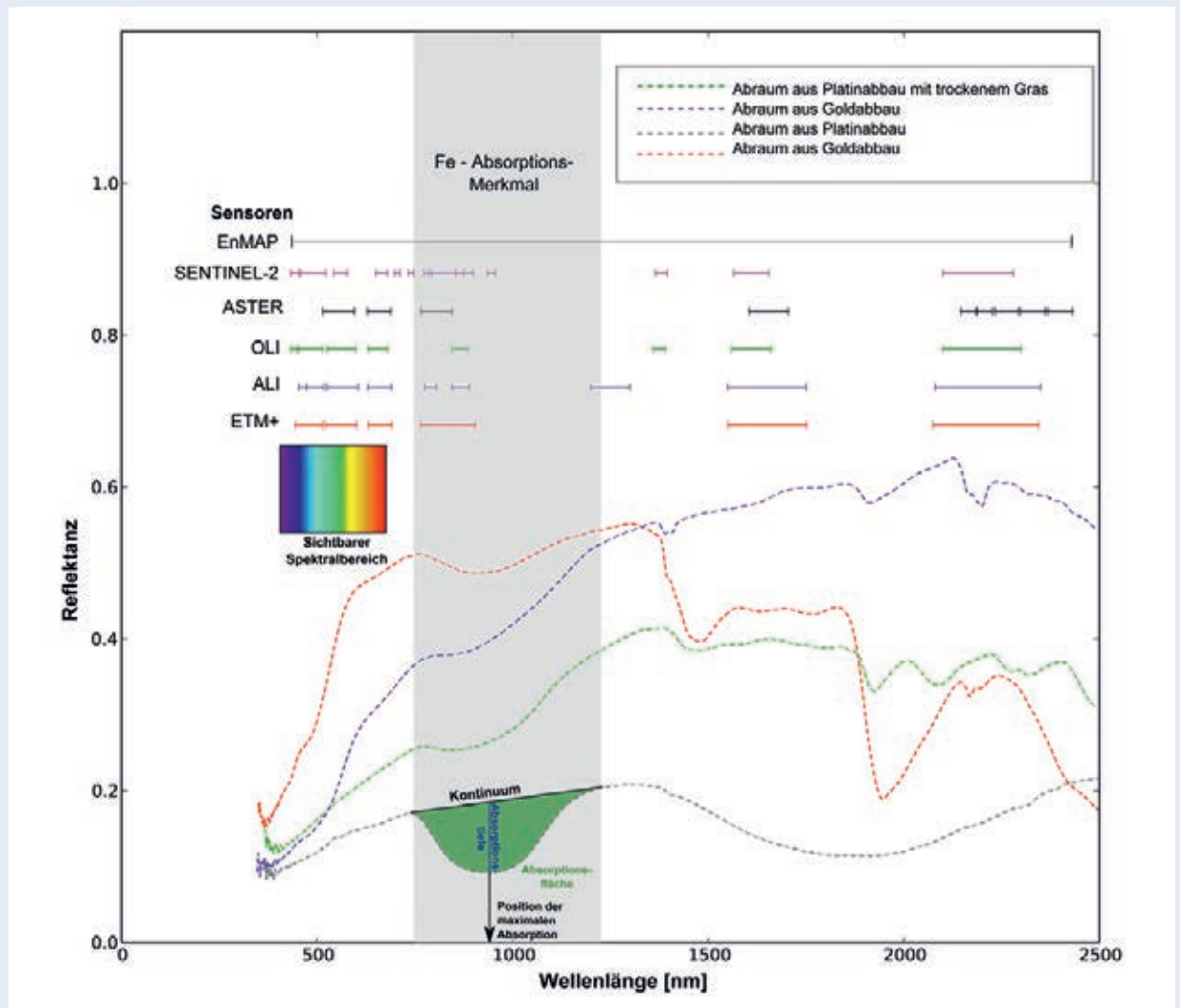


Abb. 3: Illustration des „spektralen Fingerabdrucks“ anhand von Spektren aus dem Platinbergbau nahe Rustenburg, Südafrika. Zur Erkennung des Oberflächenmaterials wird die Position des Absorptionsmaximums sowie Form der Absorptionsfläche ausgewertet (grüne Fläche). Die Absorptionstiefe kann zur Bestimmung des flächenhaften Anteils eines Materials herangezogen werden. Die grüne Kurve zeigt beispielsweise ein Mischspektrum des reinen Haldenmaterialspektrum (grau) mit einem Spektrum trockener Vegetation (grün). Die Eisenabsorptionsbande (Konkavität der Kurven im Bereich um 900 nm, hervorgehoben durch graue Unterlegung) des Haldenmaterials ist noch deutlich im grün dargestellten Spektrum erkennbar. Weiterhin sind die Positionen und Bandbreiten der spektralen Kanäle einiger wichtiger multispektraler Sensoren abgebildet. EnMAP bietet als einziger der hier dargestellten hyperspektralen Sensoren den Vorteil einer kontinuierlichen spektralen Abbildung der Oberfläche, im Unterschied zu den stark spektral vereinzelt Kanälen der multispektralen Sensoren.

Fig. 3: Illustration of the spectral fingerprint, using spectra from platinum tailings near Rustenburg South Africa. The position of the absorption maximum and the feature area and shape (green feature area) is used to identify the surface material. The absorption depth can be used to semi-quantify the abundance of a certain material. The green curve shows a mixed spectrum of dry vegetation with the tailings dam material. The grey curve shows a pure spectrum of the tailings material without vegetation. The iron absorption feature at 900 nm (the concavity in the Spectra highlighted by the grey shaded area) is caused by electron transitions in the material. The iron absorption feature is even visible in the mixed spectrum (green curve). The position and bandwidth of selected multispectral sensors is shown above with their sparse and patchy spectral coverage compared to the continuous spectral coverage of a hyperspectral sensor such as EnMAP.

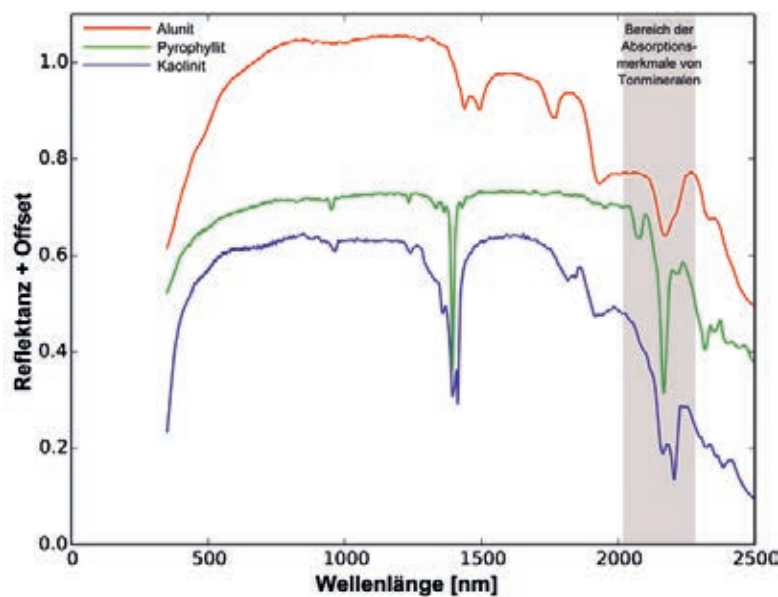


Abb. 4: Darstellung von Tonmineralspektren, welche unter anderem zur Detektion von hydrothermalen Alterationszonen um Lagerstätten herangezogen werden. Zur überlagerungsfreien Darstellung wurden die Spektren entlang der Reflektanzachse versetzt.

Fig. 4: Spectra of clay minerals, which are used for the detection of hydrothermal alteration zones around ore deposits. Offset along the reflectance curve for clarity.

## Anwendung der Spektroskopie in der Exploration

Die fernerkundliche, spektrale Identifikation von Mineralen und die Möglichkeit der Erstellung mineralogischer Karten sind besonders für Explorationsunternehmen interessant, da so große Lizenzgebiete in geringer Zeit untersucht werden können. Feldkampagnen und Explorationsbohrungen können gezielter geplant und eine hohe Kosten-/Nutzeffizienz erzielt werden. Abbildung 5 zeigt die Verteilung größerer Lagerstätten und ihrer Metalle im Gebiet des unteren Orange River an. Hier wurden Feldarbeiten des GFZ im Rahmen des EnMAP-Projekts durchgeführt, um eine geologische mapping-Software (EnGeoMAP) zu entwickeln und zu validieren. Dazu wurde die Kupferlagerstätte Haib River im Süden Namibias näher untersucht. Das Hauptaugenmerk bei dieser Lagerstätte liegt in der Erkennung von Alterationszonen, d. h. Zonen, in denen das Ausgangsgestein durch geochemische Prozesse im Zusammenhang mit hydrothermalen Fluidphasen verändert wurde, z. B. im Zuge der Mineralisation in der Erdkruste oder nahe der Erdoberfläche. Hierbei kommt es zu einer chemischen Umbildung des Ausgangsgesteins, beispielsweise kann in einem Quarz-Feldspat-Porphyr der Feldspat (Plagioklas) zu Serizit (Hellglimmer) und Tonmineralen umgewandelt werden. Mit diesem Prozess kann auch eine Ausfällung von Eisensulfiden, wie beispielsweise Pyrit und kupferhaltige Sulfide wie Bornit, Chalkosin und Chalkopyrit, verbunden sein. Im Zuge der Verwitterung dieser Erzminerale kommt es zur Bildung sekundärer Kupferminerale, wie Malachit, Azurit und Chrysocolla. Weiterhin werden durch die Oxidation sekundäre Eisenminerale wie Hämatit, Goethit und

Jarosit gebildet. Da diese Minerale, wie Tonminerale, sekundäre Eisenminerale und Glimmer, sich gut über ihren spektralen Fingerabdruck identifizieren lassen, können sie auf mögliche Vorkommen von Erzmineralen hindeuten (Abb. 6). Diese Ergebnisse der fernerkundlichen Untersuchungen ermöglichen Bergbauunternehmen zielgerichtete Explorationsprogramme, die die Eingriffe in die natürliche Landschaft auf ein nötiges Minimum reduzieren. Das führt zu einer Verminderung des ökologischen Fußabdrucks dieser Programme und damit auch zu einer Kostenersparnis.

## Abbildende Spektroskopie zur Überwachung von Abraumhalden im südlichen Afrika

Nach dem Abbau und der chemischen Extraktion des Gold- und Platinerzes aus dem Gestein bleiben oft größere Haldenlandschaften zurück, die, bedingt durch ihre mineralogisch-geochemische Zusammensetzung, Schwermetalle enthalten können. Um die daraus resultierenden gesundheitlichen Risiken besser abschätzen und begrenzen zu können, ist es wichtig, die räumliche Ausdehnung von Abraumhalden und den möglichen Materialeintrag in ihre unmittelbare Umgebung zu überwachen. Im Großraum von Johannesburg (Goldabbau) und um Rustenburg (Platinabbau) ist eine Überwachung nur mit Hilfe einer Kombination von hyperspektralen und multispektralen Satellitensensoren umsetzbar, da selbst hyperspektrale Sensoren neuester Generation, wie z. B. EnMAP, nur eine begrenzte räumliche Abdeckung bieten werden (30 km Streifenbreite).

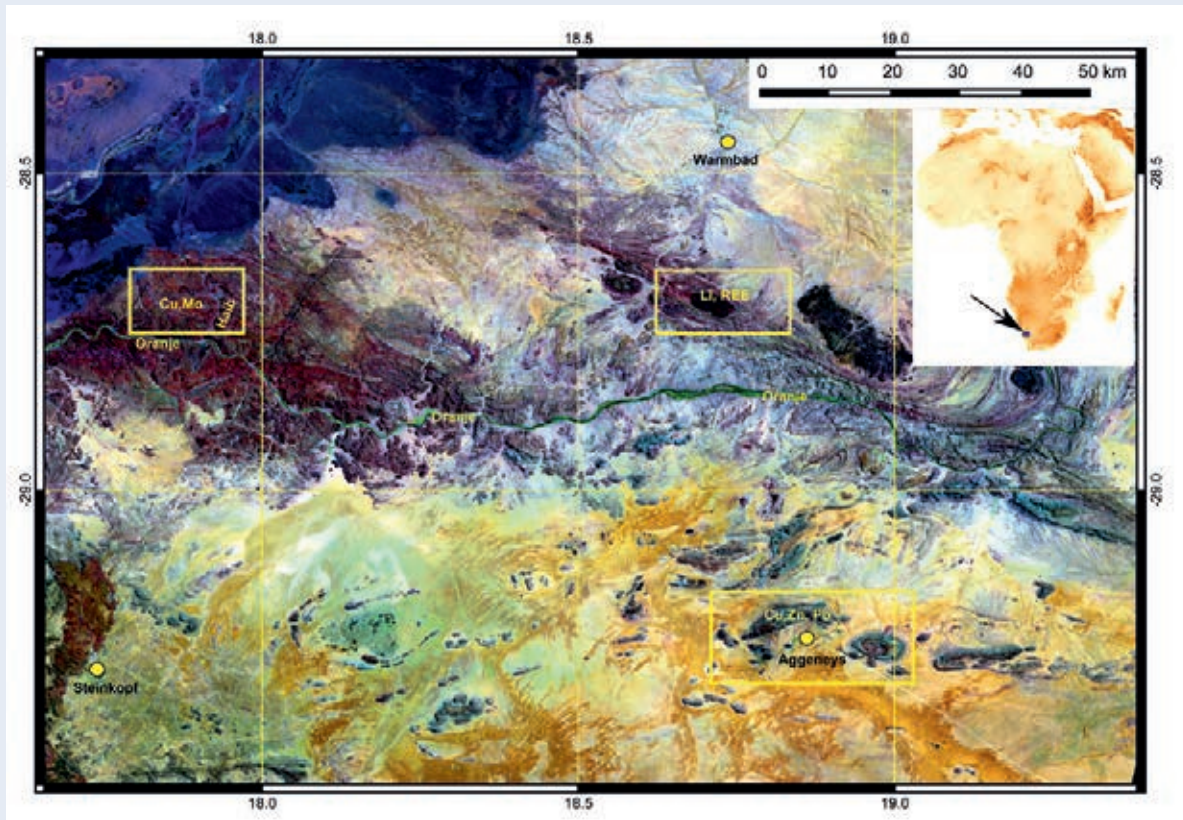


Abb. 5: Landsat 8 OLI-Falschfarbaufnahme (Rot: 2200 nm, Grün: 860 nm, Blau: Rot) in der Grenzregion des Oranje-Flusses, der hier die Grenze zwischen Südafrika im Süden und Namibia im Norden bildet. Eingezeichnet sind die drei wichtigsten Lagerstätten in dieser Region: Aggeneys (Cu, Zn, Pb) im Süden, der Haib-Komplex (Cu, Mo) im Westen und die Tantalite Valley-Pegmatite (Li, REE) im Osten.

Fig. 5: Landsat 8 OLI false color composite (Red: 2200 nm, Green: 860 nm, Blue: Red) showing the Namibian South African border region at the Orange River with the three most important mineral deposit sites of this region: the Aggeneys Cu, Zn, Pb deposit in the south, the Haib Cu, Mo complex in the west and the Tantalite Valley Li, REE pegmatite in the east.

Da aber mit den qualitativ hochwertigen hyperspektralen Daten Oberflächenmaterialien sehr gut identifiziert werden können, ist eine Kombination mit den räumlich ausgedehnten multispektralen Daten von Vorteil, weil diese für eine genauere Materialidentifikation aufgrund ihrer geringeren spektralen Auflösung nur bedingt oder gar nicht einsetzbar sind. Daher kann ein komplementäres Zusammenspiel von multispektralen Systemen wie Sentinel-2, die große Flächen abdecken, und hyperspektralen Systemen wie EnMAP, die spektral sehr viel genauere Daten liefern, von entscheidendem Vorteil sein. So ist z. B. der breite Fingerabdruck von eisenhaltigen Mineralen wie Bronzit, Hämatit, Goethit und Jarosit auch mit den multispektralen Sensoren sichtbar, die die breite Eisenabsorptionsbande nahe 900 nm spektral auflösen. Durch die Tiefe des lokalen Minimums des Spektrums nahe 900 nm (Eisenabsorptionsbande in Abb. 3), in Bezug auf die benachbarten lokalen Maxima (Schultern der

Absorptionsbande), kann nun auf die Anwesenheit von eisenhaltigen Mineralen geschlossen werden. Dies kann auch durch multispektrale Systeme geschehen, welche das Spektrum an den entscheidenden Stellen (Absorptionsbanden und Schultern von Absorptionsbanden) abtasten. So kann z. B. in Abb. 7 durch die Tiefe des spektralen Fingerabdrucks (Absorption) in Relation zu der Höhe einer interpolierten Gerade zwischen den Schultern der Absorptionsbande die mögliche Verbreitung des Haldenmaterials in der Umgebung und damit verbunden eine mögliche Schwermetallbelastung kartiert werden (Mielke et al., 2014).

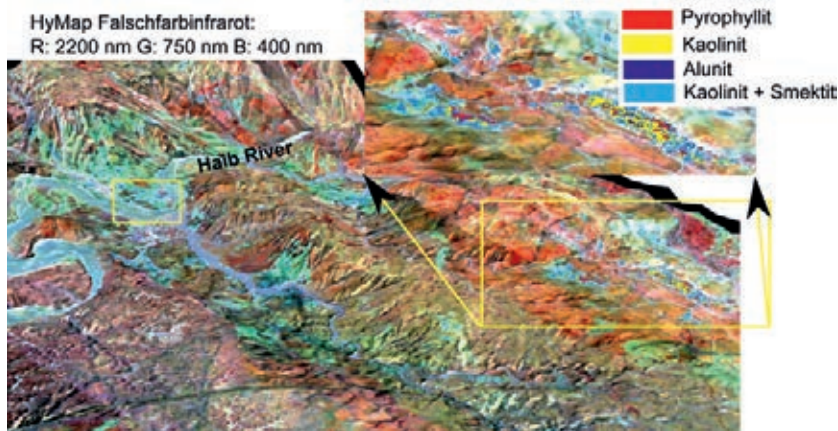


Abb. 6: Aus flugzeuggestützten HyMap-Daten dargestellte 3D-Ansicht der Kernzone des Haib River-Komplexes (R: 2200 nm, G: 750 nm, B: 400 nm). Gelb umrandete Bereiche: aus hyperspektralen Daten detektierte Alterationszonen, die auf eine mögliche Anwesenheit von Sulfiderzen schließen lassen

Fig. 6: 3d view of the core zone of the Haib River complex from airborne HyMap imaging spectrometer data (R: 2200 nm, G: 750 nm, B: 400 nm). The overlay shows alteration zones that may indicate the presence of sulfide ore (yellow boxes).

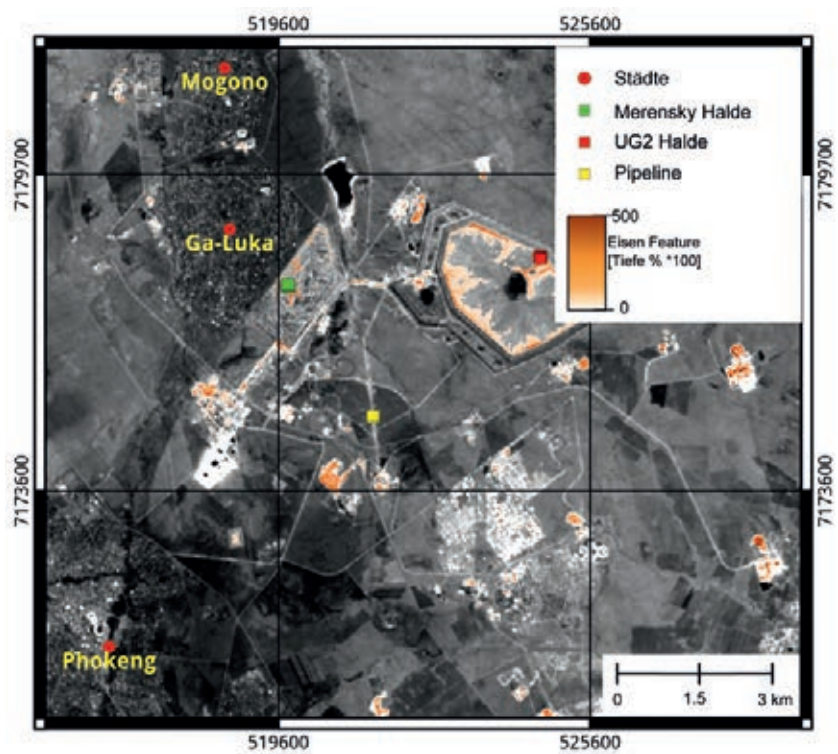


Abb. 7: Landsat 8 OLI mit überlagerter Eisen-Absorptionstiefe (IFD) nach Mielke et al. (2014). Spektrale In-situ-Messungen im Gelände und Beprobungen zeigen, dass sich die räumliche Verteilung von Haldenmaterial gut durch die IFD kartieren lässt. Als mineralogischer Proxy dient hierbei Bronzit, der eine starke Absorption im Bereich um 900 nm verursacht.

Fig. 7: Landsat 8 OLI overlay with an Iron Feature Depth map (IFD) after Mielke et al. (2014), calculated from Landsat 8 data. The spatial distribution of the tailings material can be mapped quite well using the IFD. Bronzite serves as the major mineralogical proxy causing a strong absorption band around 900 nm.



## Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass satellitengestützte Fernerkundungssensoren für geowissenschaftliche Fragestellungen insbesondere in Schwellenländern für ein Monitoring großer Flächen in dynamischen Gebieten, wie z. B. in Bergbauregionen, bestens geeignet sind. Daneben bieten sie für nationale geologische Dienste und Bergämter ein unverzichtbares flächenhaftes Werkzeug zur Identifizierung möglicher neuer Explorationsgebiete.

In Zukunft kann ein Einsatz der abbildenden Spektroskopie im Nahbereich auf Drohnen sowie im Tagebau und beim Scannen und Analysieren von Bohrkernen mineralogische Informationen in fast Echt-Zeit liefern. Dies kann zu einer erheblichen Kostenersparnis beim Abbau von Erzen führen. Zudem kann so der Flächenverbrauch minimiert und der Eingriff in Ökosysteme und den Lebensraum des Menschen auf ein Minimum reduziert werden.

Das im südlichen Afrika erworbene wissenschaftliche Know-how für den Einsatz der Spektroskopie bei der Exploration und der Überwachung von Abraumhalden lässt sich nach weiterführenden Arbeiten auch auf geowissenschaftliche Problemstellungen in Deutschland bzw. auch weltweit übertragen. Hierbei kann insbesondere eine enge Verzahnung von Wissenschaft (Wissenserwerb, Methodenentwicklung und Validation) und Wirtschaft (Sensorbau, Softwareentwicklung und Vermarktung) bei entsprechender finanzieller und politischer Unterstützung einen entscheidenden Vorsprung für den Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Deutschland bedeuten. Die in Deutschland entwickelte hyperspektrale Satellitenmission EnMAP wird mit dieser modernen Technik neue Einblicke in großskalige geowissenschaftliche Prozesse liefern.

## Literatur

- Swayze, G. A., Clark, R. N., Goetz, A. F. H., Livo, K. E., Breit, G. N., Kruse, F. A., Sutley, S. J., Snee, L. W., Lowers, H. A., Post, J. L., Stoffregen, R. E., Ashley, R. P. (2014): Mapping Advanced Argillic Alteration at Cuprite, Nevada, Using Imaging Spectroscopy. – *Economic Geology*, 109, 5, 1179-1221. DOI: <http://doi.org/10.2113/econgeo.109.5.1179>
- Mielke, C., Bösche, N., Rogaß, C., Kaufmann, H., Gauert, C., de Wit, M. (2014): Spaceborne Mine Waste Mineralogy Monitoring in South Africa, Applications for Modern Push-Broom Missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2. - *Remote Sensing*, 6, 8, p. 6790-6816. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs6086790>
- Kokaly R. F. (2012): Spectroscopic remote sensing for material identification, vegetation characterization, and mapping. – In: Shen, S. S., Lewis, P. E. (Ed.), *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII*, (Proceedings of SPIE; 8390) Bellingham, Wash.: SPIE, 839014. DOI: <http://doi.org/10.1117/12.919121>
- Rogaß, C., Segl, K., Mielke, C., Fuchs, Y. (2013): EnGeoMAP - A geological mapping tool applied to the EnMAP mission. - *EARSel eProceedings*, 12, 2, p. 94-100. DOI: <http://doi.org/10.12760/01-2013-2-02>
- Guanter, L., Segl, K., Kaufmann, H. (2009): Simulation of Optical Remote-Sensing Scenes With Application to the EnMAP Hyperspectral Mission. - *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 7, p. 2340-2351. DOI: <http://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2011616>
- Kaufmann, H., Segl, K., Chabrillat, S., Hofer, S., Stuffer, T., Müller, A., Richter, R., Schreier, G., Haydn, R., Bach, H. (2006): A Hyperspectral Sensor for Environmental Mapping and Analysis (Invited paper), *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2006) & 27th Canadian Symposium on Remote Sensing (Denver, Colorado, USA 2006)*.

# Magnetfeldbeobachtung im südlichen Afrika: regionale Daten zum Verständnis globaler Änderungen

Monika Korte

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Satellites and global ground observation networks are the prerequisites to monitor global variations such as, e.g., climate or sea level changes or the decline of the geomagnetic field. Well-distributed ground observations in most cases are essential complements to space observations in order to gain an improved understanding of the processes underlying the observed changes. More than 80 % of the southern hemisphere are covered by oceans. Southern Africa is one of the few regions to allow for ground based observations there. The geomagnetic field shields our habitat against solar wind and cosmic rays. However, its average strength is clearly decreasing since the beginning of systematic observations 180 years ago, and a particularly weak field area is the region over and around the southern Atlantic, known as South Atlantic Anomaly. The GFZ activities regarding geomagnetic field observation in southern Africa and the larger southern Atlantic region provide a good example how regional ground observations are integral parts to investigating global processes, in this case geomagnetic core field evolution and space weather behaviour.*



Wesentliche Veränderungen in unserer Umwelt, wie z. B. der Klimawandel, globale Meeresspiegelschwankungen oder die Abnahme des Erdmagnetfelds, lassen sich nur mit Hilfe von Satelliten und globalen Netzwerken von Beobachtungsstationen überwachen. Obwohl die Messdaten der Erdbeobachtungssatelliten heutzutage die gesamte Erde abdecken, sind in nahezu allen geowissenschaftlichen Fachgebieten ergänzende, global verteilte Daten, die vom Erdboden aus gemessen werden, unverzichtbar. Sie helfen, die zugrundeliegenden, oft weltweit interagierenden Prozesse zu erfassen und tragen so zu einem besseren Verständnis dieser Vorgänge bei. Da die Südhalbkugel zu etwa 81% von Wasser bedeckt ist, spielt das südliche Afrika aufgrund seiner Lage eine zentrale Rolle: Es ist eine der wenigen Regionen dieser Hemisphäre, auf der eine landgebundene Erdbeobachtung möglich ist.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ engagiert sich in vielfältiger Weise mit permanenten Bodenstationen und ergänzenden Messkampagnen zur Erdbeobachtung im südlichen Afrika. Im Rahmen globaler Netzwerke werden kontinuierliche Messdaten z. B. von Schwere- und Magnetfeld oder GPS-Signalen zur Erforschung globaler Prozesse erfasst. Am Beispiel des Erdmagnetfelds wird im Folgenden die grundlegende Bedeutung dieser regionalen Beobachtungsdaten für das bessere Verständnis globaler Änderungen dargestellt.

## Das Erdmagnetfeld und seine Änderungen

Das tief im Erdinneren, im äußeren, flüssigen Erdkern erzeugte Erdmagnetfeld umgibt die Erde und dient als Schutzschild gegen Sonnenwind und kosmische Strahlung. Es weist jedoch eine Schwächezone auf, die sich vom südlichen Afrika über den Südatlantik nach Südamerika erstreckt und als Südatlantische Anomalie bekannt ist (Abb. 1). Die Stärke des Erdmagnetfelds ist hier weltweit am niedrigsten und um rund 40% schwächer als in vergleichbaren Breiten. Während magnetischer Stürme sind hier verstärkt Ausfälle von Satelliten infolge verstärkter Strahlungseinwirkung zu beobachten.

Links: Das magnetische Observatorium Keetmanshoop, Namibia, wird seit 2006 in Zusammenarbeit von SANSA Space Science, Südafrika und dem GFZ betrieben. (Foto: I. Wardinski, GFZ)

Left: The Keetmanshoop Geomagnetic Observatory, Namibia, is run in co-operation of the SANSA Space Science, South Africa and the GFZ since the year 2006.

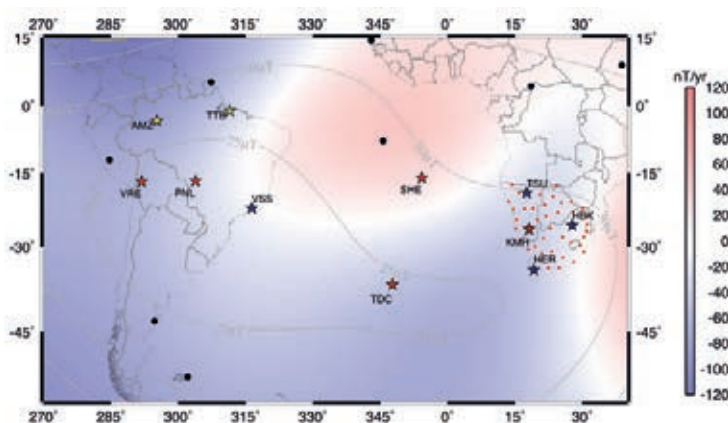


Abb. 1: Die geomagnetische Südatlantische Anomalie mit zum Teil stark abnehmenden Feldstärken von bis zu weniger als  $25 \mu\text{T}$  erstreckt sich von Südamerika bis über das südliche Afrika (blaue Gebiete). Die Magnetfeldänderungen werden kontinuierlich von geomagnetischen Observatorien gemessen (Sterne; rot: durch GFZ oder in Kooperation betrieben, blau oder gelb: von Kooperationspartnern betrieben oder geplant, schwarze Punkte: weitere INTERMAGNET-Observatorien). Zusätzliche, als Säkularpunkte bezeichnete Messpunkte in Südafrika, Namibia und Botswana sind durch rote Punkte markiert.

Fig. 1: The geomagnetic South Atlantic Anomaly with field intensities down to less than  $25 \mu\text{T}$  and decreasing covers the areas from South America to southern Africa (blue areas). Magnetic field changes are continuously monitored by geomagnetic observatories (stars; red: operated by GFZ or in cooperation, blue or yellow: operated or planned by collaboration partner, black dots: further INTERMAGNET observatories). Additional measurement locations (repeat stations) in South Africa, Namibia and Botswana are marked by red dots.

Flüssigkeitsbewegungen im äußeren Erdkern spielen eine wesentliche Rolle bei der dynamischen Erzeugung des magnetischen Hauptfelds und führen dazu, dass sich das Feld langsam, aber ständig ändert. Die Änderung wird als Säkularvariation bezeichnet. Dabei nimmt die mittlere globale Stärke des Erdmagnetfelds seit Beginn der systematischen Beobachtung vor etwa 175 Jahren beständig ab. Die deutliche Abnahme um 9% über diesen Zeitraum könnte auf eine über die nächsten Jahrhunderte bevorstehende Feldumkehr hindeuten, oder aber auch lediglich Teil einer gewöhnlichen Schwankung auf diesen Zeitskalen sein. Die Feldstärkeänderungen sind regional nicht gleichmäßig über die Erde verteilt. Während in Europa die Intensität sogar leicht zunimmt, ist die Abnahme in Teilen des südlichen Atlantiks und über Nord- und Südamerika gebietsweise noch deutlich stärker als im weltweiten Mittel.



Kontakt: M. Korte  
(monika.korte@gfz-potsdam.de)

Nur durch ein besseres Prozessverständnis auf der Grundlage von guten Beobachtungsdaten wird es möglich sein, die Bedeutung dieser Änderungen für die zukünftige Entwicklung des magnetischen Schutzschildes vorhersagen zu können. Eine Herausforderung bei der Interpretation magnetischer Beobachtungsdaten besteht darin, die Einflüsse verschiedener Quellen des Erdmagnetfelds in den Messdaten zu trennen. Zum Gesamtsignal tragen neben dem Hauptfeld aus dem Erdkern sowohl die permanente Magnetisierung lithosphärischer Gesteine als auch stark variable externe Felder bei. Letztere werden in Entfernungen von mehr als 100 km bis zu mehreren Erdradien oberhalb der Erdoberfläche durch diverse elektrische Stromsysteme in der Ionosphäre und Magnetosphäre erzeugt.

### Kontinuierliche Beobachtung des Erdmagnetfelds

Das GFZ ist seit dem Jahr 2005 intensiv an der Beobachtung des Erdmagnetfelds im südlichen Afrika beteiligt. An geomagnetischen Observatorien werden kontinuierlich Stärke und Richtung des Erdmagnetfelds und seiner Schwankungen registriert. Weltweit gibt es etwa 120 solcher Einrichtungen, die hochqualitative Daten nahezu in Echtzeit im Rahmen des INTERMAGNET-Programms (<http://www.intermagnet.org>) für wissenschaftliche Anwendungen zur Verfügung stellen. Seit 1941 existiert das magnetische Observatorium Hermanus (HMO) an der Südspitze Südafrikas, das zur South African National Space Agency (SANSA Space Science) gehört und von wo aus seit 1964 bzw. 1972 Observatorien in Tsumeb (TSU), Namibia und Hartebeesthoek (HBK) im nordöstlichen Südafrika betrieben werden. Die Abstände zwischen diesen Observatorien betragen jeweils mehr als 1200 km (Abb. 1). Im Jahr 2006 wurde in Kooperation von SANSA und GFZ ein weiteres Observatorium in Keetmanshoop (KMH) im Süden Namibias eingerichtet (Korte *et al.*, 2009). Zur verbesserten Überwachung der Magnetfeldänderungen in der südatlantischen Anomalie richtete das GFZ in der Folge ein weiteres Observatorium auf der Insel St. Helena (STH, seit 2007) im Südatlantik ein; seit Juli 2014 wird das von der Dänischen Technischen Universität Kopenhagen (DTU) neu errichtete Observatorium auf der Insel Tristan da Cunha (TDC) gemeinsam von GFZ und DTU betrieben. Zur Beobachtung der ausgedehnten Südatlantischen Anomalie ist das GFZ auch in Südamerika aktiv und hier seit 2011 in Kooperation mit dem Observatorio Nacional in Rio de Janeiro am Auf- und Ausbau mehrerer geomagnetischer Observatorien in Brasilien beteiligt.

### Säkularpunktmessungen in Südafrika, Namibia und Botswana

Die Abstände zwischen den magnetischen Observatorien auf dem südlichen afrikanischen Kontinent betragen auch mit dem neuen Observatorium in Namibia noch über 800 km. Angesichts der schnellen und unterschiedlichen Feldänderungen in der südafrikanischen Region ist ein dichteres Beobachtungsnetz für ein besseres Verständnis der Säkularvariation wichtig. Auch



Abb. 2: Geomagnetische Säkularpunktmessung in Südafrika (Foto: M. Korte, GFZ)

Fig. 2: Geomagnetic repeat station survey in South Africa

die lithosphärischen und magnetosphärischen Einflüsse auf die Messdaten könnten so besser untersucht werden. Das magnetische Observatorium Hermanus unterhält schon seit einigen Jahrzehnten ein Netz von zusätzlichen Messpunkten, die als sogenannte Säkularpunkte fest im Gelände markiert sind. Seit 2005 führen SANSA Space Science und GFZ gemeinsam jährliche Beobachtungen auf einem Netz von 40 dieser Stationen in Südafrika, Namibia und Botswana durch (Abb. 2). Dabei werden jeweils die Stärke und die Richtung des Magnetfelds an jedem Punkt über einen Zeitraum von etwa 15 Stunden gemessen.

### Interpretation der Beobachtungsdaten

Die Daten der magnetischen Observatorien werden unter anderem zusammen mit Satellitendaten in der globalen Magnetfeldmodellierung verwendet. Das GFZ-Magnetfeldmodell GRIMM (Lesur *et al.*, 2010) zeigt detailliert die für die Südatlantische Anomalie verantwortliche umgekehrte Feldstruktur an der Kern-Mantel-Grenze, welche auch für die globale Intensitätsabnahme von großer Bedeutung ist. Insgesamt sind schnelle und global stark variable Feldänderungen (Abb. 3) zu erkennen. Das Modell wird z.B. zur Untersuchung der Flüssigkeitsströmungen im Erdkern als Teil des Geodynamoprozesses genutzt. Die Säkularpunktdaten helfen, lithosphärische Feldanteile und langfristige magnetosphärische Änderungen besser zu verstehen (Korte und Lesur, 2011). Aufgrund der Lage auf ähnlichen magnetischen Längen- und Breitengraden ergänzen sich die Daten der Observatorien Hermanus und St. Helena sehr gut mit denen der nordhemisphärischen GFZ-Observatorien Niemegk (Deutschland) und Santa Maria (Azoren). Mit der Kombination der Observatoriendaten können Symmetrien in externen Magnetfeldern untersucht werden und Störungen in der Ionosphäre im Rahmen der Beobachtung und Erforschung der Weltraumwetterbedingungen beschrieben werden.

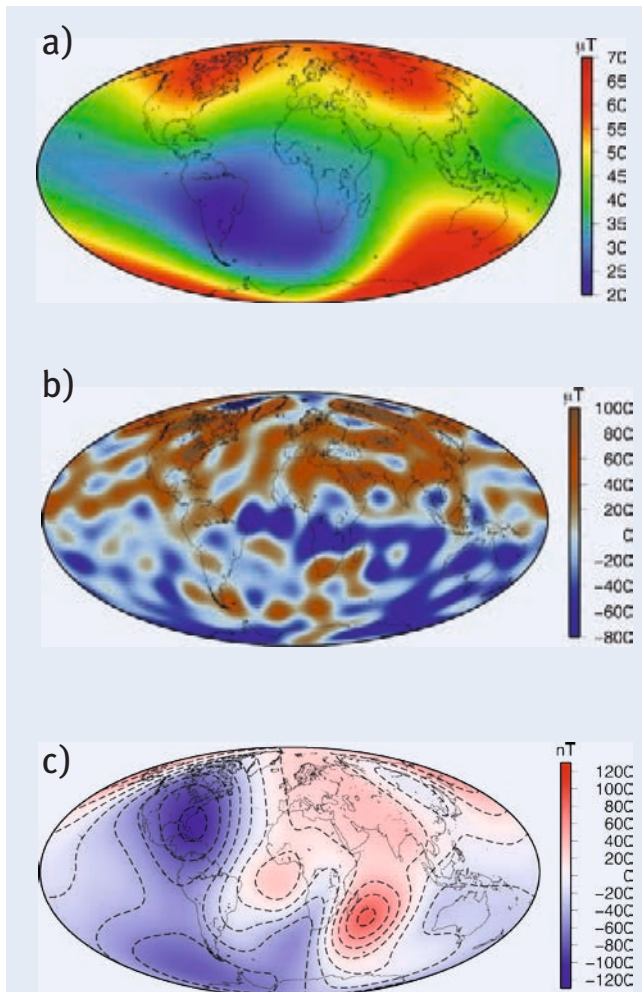


Abb. 3: Geomagnetische Beobachtungsdaten werden zur globalen Magnetfeldmodellierung verwendet. Hier sind Ergebnisse für das Jahr 2010 dargestellt. a) Die Feldstärke an der Erdoberfläche zeigt deutlich die als Südatlantische Anomalie bekannte Schwächezone. b) In der radialen Feldkomponente an der Kern-Mantel-Grenze sind in dieser Region große Bereiche umgekehrter Magnetfeldrichtung zu erkennen. c) Die Änderung der Feldstärke an der Erdoberfläche von 2002 bis 2010 zeigt, dass das Feld in dieser Region überwiegend deutlich weiter abgenommen hat.

Fig. 3: Geomagnetic data are used for global field modelling. Results for 2010 are shown here. a) Field intensity at Earth's surface shows the weak zone of the South Atlantic Anomaly. b) The radial field component at the core-mantle boundary shows reverse flux patches. c) The change of field intensity at Earth's surface from 2002 to 2010 shows that field intensity in this area has mostly further decreased.

## Ausblick

Im November 2013 wurde die ESA-Satellitenmission Swarm (Abb. 4) zur Beobachtung des Erdmagnetfelds mit einer Konstellation aus drei Satelliten gestartet. Das GFZ ist neben weiteren europäischen Forschungseinrichtungen an den wissenschaftlichen Aspekten dieser Mission beteiligt und betreibt das Swarm-Projektbüro. In Kombination mit den Observatorien-daten sind durch die hochaufgelösten Erdmagnetfelddaten von Swarm deutliche Fortschritte bei der Trennung der einzelnen Magnetfeldanteile zu erwarten. Auch kann die Verbindung der Satelliten- und Bodenmessungen zu einem umfassenderen Verständnis der den einzelnen Feldanteile zugrunde liegenden Prozesse führen und damit die Variabilität des natürlichen Schutzschildes der Erde genauer analysiert werden. Neue Erkenntnisse über die zukünftig zu erwartende Entwicklung der Südatlantischen Anomalie und ihrer Bedeutung für die Abnahme der globalen Magnetfeldstärke werden dazu beitragen, Space Weather-Einflüsse zu minimieren und abzuschätzen, ob eine Magnetfeldumkehr in näherer Zukunft bevorsteht.



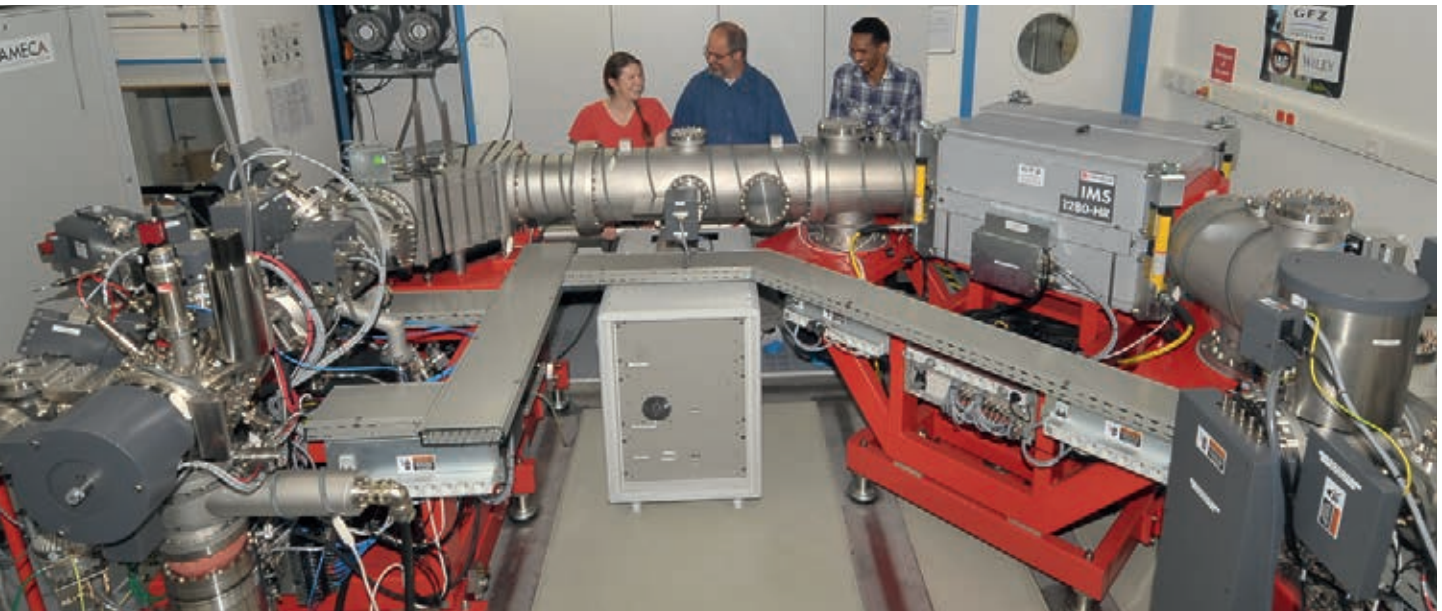
Abb. 4: Swarm-Satellitentrio im All (Abbildung: Astrium)

Fig. 4: Swarm satellite trio in space

## Literatur

- Korte, M., Mandea, M., Linthe, H.-J., Geese [Hemshorn], A., Kotzé, P., Ricaldi, E. (2009): New geomagnetic field observations in the South Atlantic Anomaly region. - *Annals of Geophysics*, 52, 1, p. 65-81. DOI: <http://doi.org/10.4401/ag-4631>
- Korte, M., Lesur, V. (2012): Repeat station data compared to a global geomagnetic field model. - *Annals of Geophysics*, 55, 6, p. 1101-1111. DOI: <http://doi.org/10.4401/ag-5410>
- Lesur, V., Wardinski, I., Hamoudi, M., Rother, M. (2010): The second generation of the GFZ Reference Internal Magnetic Model: GRIMM-2. - *Earth Planets and Space*, 62, 10, p. 765-773. DOI: <http://doi.org/10.5047/eps.2010.07.007>

# Netzwerk



Im Jahr 2013 wurde am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ ein hochauflösendes Sekundärionen-Massenspektrometer (Cameca 1280-HR SIMS) in Betrieb genommen. Die 3,6 Mio. Euro teure Infrastruktur ist etwa zehnmals schneller und fünfmal genauer in der Messung von Geomaterialien als ihre Vorgängerin, die seit 1998 am GFZ betrieben wurde. Das HR-SIMS ist zentraler Knotenpunkt des von der Helmholtz-Gemeinschaft geplanten SIMS-Netzwerks (GFZ, Potsdam, UFZ, Leipzig, und HZDR, Dresden). Zusätzlich ist eine Vernetzung auf Basis eines neuartigen Fernsteuerprotokolls im Aufbau, die es auch internationalen Partnerinstituten ermöglicht, das ganze Spektrum der SIMS-Technik einzusetzen. Prof. Michael Wiedenbeck (Mitte), Leiter des SIMS-Labors am GFZ, betreut aktuell zwei südafrikanische Studenten, Sarah Glynn (links) und Abiel Kidane (rechts). Sie werden nach zwei Jahren Training am HR-SIMS in ihre Heimat zurückkehren und von Südafrika aus ferngesteuerte Messungen am SIMS in Potsdam durchführen. (Foto: E. Gantz, GFZ)

## Wissenstransfer nach Südafrika: wissenschaftlicher Nachwuchs bekommt Einblick in die SIMS-Technologie

Die Sekundärionen-Massenspektrometrie (kurz SIMS) ist eines der leistungsfähigsten Messverfahren der analytischen Geochemie. Bei der Untersuchung der chemischen und isotopischen Zusammensetzung von Geomaterialien stellt sich das Problem, dass nahezu alle natürlichen Materialien heterogen aufgebaut sind. Misst man beispielsweise das Verhältnis der Sauerstoff-Isotope  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  in einem Gramm Gestein, erhält man als Ergebnis den Mittelwert der Sauerstoff-Signatur in diesem Gramm. Möchte man z. B. die Sauerstoff-Signatur eines sehr kleinen Probenvolumens oder eines bestimmten Minerals bestimmen, erfordert dies eine weitaus empfindlichere Messmethode. Mit SIMS ist es möglich,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  an einer Probenmenge

von etwa 150 Picogramm zu bestimmen (1 Picogramm (pg) = 1 Billionstel Gramm =  $10^{-12}$  g). Ein weiterer Vorteil: es können bis zu 300 Messungen pro Tag an einem SIMS durchgeführt werden. Und das Gerät ist dabei äußerst präzise – bei Sauerstoff erreichen die Messwerte eine Genauigkeit von 99,98 %.

Seit November 2013 betreibt das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ eines der leistungsfähigsten SIMS-Geräte weltweit (Foto oben), Nummer 23 dieser Bauart. Genau darin liegt eine der größten Herausforderungen. Da diese Anlagen sehr selten sind, ist die Messzeit begrenzt und nicht alle spannenden Projekte können mit dieser Technologie untersucht werden. Das Team des GFZ-SIMS-Labors

hat eine Lösung für dieses Problem entwickelt: Das Gerät soll zukünftig per Fernsteuerung über das Internet automatisch Proben messen und kann so rund um die Uhr betrieben werden – auch von anderen Kontinenten aus. An dem hierfür aufgebauten internationalen Kooperationsnetzwerk ist Südafrika Vorreiter.

Von 2009 bis 2013 förderte das Bundesministerium für Bildung und Forschung zusammen mit seiner Partnerinstitution „Department of Science and Technology“ in Südafrika ein Projekt, bei dem junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Südafrika eine intensive Ausbildung in der SIMS-Technik am GFZ in Potsdam erhalten. In diesem Rahmen haben vier südafrikanische MSc-

und PhD-Studierende das SIMS-Labor im Rahmen ihrer Ausbildung besucht. Zeitgleich mit der Bestellung der neuen hoch auflösenden SIMS-Anlage wurde die deutsch-südafrikanische Kooperation neu gestaltet. Seither haben zwei engagierte Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler die Möglichkeit, in Potsdam im SIMS-Labor zu forschen und sich detailliert in die Mikroanalytik einzuarbeiten. Seit dem Frühjahr 2013 sind die Doktorandin Sarah Glynn von der University of the Witwatersrand (WITS) in Johannesburg und der MSc-Student Abiel Kidane von der Nelson Mandela Metropolitan University in Port Elizabeth zu Gast am GFZ. Nach zwei Jahren in Potsdam werden die beiden ein detailliertes Know-how der SIMS-Technik zurück nach Südafrika bringen. Danach beginnt der nächste spannende Abschnitt der Kooperation – die von Südafrika aus ferngesteuerten Messungen am SIMS in Potsdam.

Die in Südafrika vorbereiteten Proben werden dazu nach Deutschland an das GFZ verschickt und zu einer vereinbarten Zeit im SIMS bereitgestellt. Dabei wird das SIMS von Südafrika aus mit Internet-Technologie ferngesteuert. Die dafür erweiterten Anlagekomponenten sowie die dazugehörigen Internet-Protokolle sind bereits in der Entwicklung. Ab etwa 2016 werden südafrikanische Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler zum ersten Mal auf diese Art einen direkten Zugang zu der analytischen Spitzentechnik bekommen. Dank dieser Lösung kann das GFZ gemeinsam mit den südafrikanischen Partnern Themen wie beispielsweise die Entstehung der weltgrößten Platinvorkommen (vgl. Beitrag von *Trumbull et al. in diesem Heft*), die Auswirkungen des größten bekannten Meteoriteneinschlags bei Vredefort und die Entwicklung des Lebens auf der Erde vor 3,5 Mrd. Jahren erforschen. Alle beteiligten Institutionen werden dabei von dem Expertenwissen von Frau Glynn und Herrn Kidane profitieren. ■



*Sarah Glynn ist seit April 2013 Gastwissenschaftlerin im SIMS-Labor am GFZ. Sie datiert hier Zirkone für ihre Doktorarbeit an der University of the Witwatersrand (WITS) in Johannesburg, Südafrika.*

„Das wichtigste Ziel meiner Doktorarbeit ist zu verstehen, wie der paläoproterozoische Magondi-Faltengürtel im Nordwesten Simbabwe entstanden ist. Für meine Untersuchungen bestimme ich das U-Pb-Alter von Zirkonen. Dazu bin ich nach Potsdam gekommen. Hier kann ich am HR-SIMS die Zirkone datieren und mich vor allem auch in diese komplexe Analysemethode einarbeiten. Außerdem habe ich schon jetzt mein Netzwerk um viele interessante Kolleginnen und Kollegen erweitern können. Mit diesen wertvollen Erfahrungen kann ich meine Universität bei dem Aufbau des virtuellen SIMS-Netzwerks unterstützen. Das geplante virtuelle Labor mit dem direkten Internet-Zugang zu dem SIMS in Potsdam hilft uns Kosten zu sparen und es ist auch umweltfreundlich, da nur die Proben auf Reisen gehen.“



*Abiel Kidane, MSc-Student an der Nelson Mandela Metropolitan University (NMMU) in Port Elizabeth, Südafrika, untersucht seit Mai 2013 im SIMS-Labor am GFZ Diamanten.*

„In meinem Projekt untersuche ich die Kohlenstoff-Isotopie und die magnetischen Eigenschaften von Diamanten, die aus unterschiedlichen Kimberlit-Schloten in Südafrika stammen. Ich möchte herausfinden, ob sich diese Untersuchungsmethoden dazu eignen, einzelne Diamantvorkommen zu charakterisieren. Für mich ist der Forschungsaufenthalt am GFZ sehr wichtig, weil ich hier nicht nur die SIMS-Technik erlerne, sondern auch Einblick in die Projektplanung, Probenpräparation und Dateninterpretation bekomme. Ich lerne auch, wie ich meine wissenschaftlichen Ergebnisse in internationalen Zeitschriften veröffentliche und bekomme Kontakt zu zahlreichen anderen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Dies alles ist eine wesentliche Grundlage für den Aufbau eines virtuellen SIMS-Labors an der NMMU im Rahmen eines bilateralen Forschungs- und Technologieprogramms von Deutschland und Südafrika.“

*Fotos: E. Gantz, GFZ*

#### **Kontakt:**

Prof. Michael Wiedenbeck,  
Leiter des SIMS-Labors am GFZ  
E-Mail: [michael.wiedenbeck@gfz-potsdam.de](mailto:michael.wiedenbeck@gfz-potsdam.de)

## Internationales Forschungsprogramm zu Shale Gas in Südafrika



*Magnetotellurisches Feldexperiment im östlichen Karoo-Becken (November 2014), mit dem Ziel, den Schiefergas führenden Horizont sowie die Verbindungen von Brackwasser und Frischwasser führenden Schichten in einem 3D-Untergrundmodell abzubilden.  
(Fotos: U. Weckmann, GFZ)*

Mit Blick auf mögliche Vorkommen von Shale Gas wird derzeit im südafrikanischen Karoo-Becken ein umfangreiches Forschungsprogramm durchgeführt, an dem das GFZ beteiligt ist (vgl. Beitrag von Schulz *et al.* in diesem Heft). Die eingehenden wissenschaftlichen Untersuchungen wurden durch ein Moratorium der südafrikanischen Regierung zur Shale Gas-Exploration mittels Fracking ermöglicht. Ziel des internationalen Forschungsprogramms ist es, ein grundlegendes Verständnis der Geologie, Petrologie und Hydrologie des Karoo-Sedimentbeckens zu gewinnen. Unterstützt und finanziert wird das Vorhaben von der Regierung der südafrikanischen Provinz Eastern Cape, dem Africa Earth Observatory Network (AEON) und dem Earth Stewardship Science Research Institute (AEON-ESSRI) der Nelson Mandela Metropolitan University in Port Elizabeth. Drei Teilprojekte werden mit GFZ-Beteiligung durchgeführt und konzentrieren sich auf die Bearbeitung einer ausschließlich für wissenschaftliche Zwecke abgeteufte Flachbohrung, geophysikalischen Untersuchungen des flachen und tiefen Untergrunds und der Analyse von Grundwasserbewegungen.

Im November 2014 reiste eine Gruppe von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern unter Leitung von Dr. Ute Weckmann mit knapp 4,5 Tonnen geophysikalischer Instrumente in das östliche Karoo, wo in einem 50 km x 50 km großen Areal magnetotellurische (MT) Messungen durchgeführt wurden. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die obersten Kilometer

des potenziell Shale Gas führenden Sedimentbeckens mit einem dreidimensionalen Untergrundmodell der elektrischen Leitfähigkeit abzubilden und die neuen Messungen in ein schon existierendes regionales MT-Profil einzuhängen. Neben den Shale Gas führenden Formationen liegt ein weiterer Fokus auf der Abbildung der unterschiedlichen Grundwasserschichten und deren Vernetzung. Dieses hochauflösende Experiment wird durch den Einsatz des Airborne Geophysics Observatory ergänzt, das hochauflösende magnetische, radiometrische und digitale Oberflächenmodelldaten liefert. ■

**Weitere Informationen:**  
[www.karooshalegas.org](http://www.karooshalegas.org)

**Kontakt:** Dr. Ute Weckmann  
([ute.weckmann@gfz-potsdam.de](mailto:ute.weckmann@gfz-potsdam.de))



## ICDP-Projekte in Südafrika



Workshop zu einem ICDP-Vorhaben im Bushveld-Komplex. 50 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 10 Ländern trafen sich in Johannesburg, Südafrika. (Foto: GFZ)

In Südafrika sind zwei Vorhaben im Rahmen des Internationalen Tiefbohrprogramms ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) angesiedelt, welche durch die in das GFZ eingebundene Operational Support Group (OSG) des ICDP unterstützt werden. In einer ICDP-Bohrung im Barberton Grünsteingürtel (Barberton Greenstone Belt, BGB) zeugen marine Sedimente und Lavaströme von Bedingungen, wie sie vor rund 3,5 Mrd. Jahren auf der Erdoberfläche geherrscht haben. Auch finden sich hier die weltweit ältesten Spuren des Lebens. Das GFZ ist mit zwei Vorhaben an dem Projekt beteiligt: Dr. Ute Weckmann bildet mit magnetotellurischen (MT) Experimenten die 3D-Strukturen des BGB ab, um den tektonischen Aufbau besser zu verstehen (vgl. Beitrag von *Weckmann et al. in dieser Heft*). Dr. Robert Trumbull analysiert gemeinsam mit seinen Partnern von der RWTH Aachen Bor-Isotope in Sediment- und Lavagesteinen, um Einblicke in die Prozesse und Bedingungen der hydrothermalen Alteration am archaischen Meeresboden zu gewinnen.

Für ein zweites ICDP-Vorhaben in Südafrika traf sich ein internationales Expertenteam vom 7.-9. September 2014 in Johannesburg zu einem Workshop, um Vorschläge für das wissenschaftliche Programm einer Tiefbohrung im Bush-

veld-Komplex und dafür notwendige Bohrlokationen zu diskutieren (vgl. Beitrag von *Trumbull et al. in diesem Heft*). Grundlage für das Treffen bildete das von einer Initiativgruppe unter Leitung von Dr. Robert Trumbull (GFZ) und Prof. Lewis Ashwal (Witwatersrand University Südafrika) erarbeitete Konzept für ein ICDP-Projekt im Bushveld, das aktuell auf Basis der Workshop-Ergebnisse in die Antragsphase überführt wird. Zentrales Ziel des Bohrprojekts wird sein, für die internationale Forschungsgemeinde zugängliche Referenzprofile des Bushveld-Komplexes aufzuschließen. Wissenschaftlich wird sich die Bohrung auf folgende Forschungsthemen fokussieren: mineralische Rohstoffe, magmatische Systeme sowie tiefe Hydrologie und tiefe Biosphäre. ■

### Kontakt:

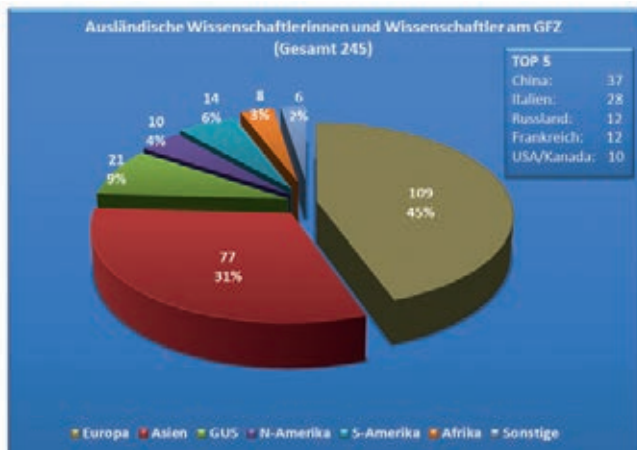
Dr. Ute Weckmann  
([ute.weckmann@gfz-potsdam.de](mailto:ute.weckmann@gfz-potsdam.de))

Dr. Robert Trumbull  
([robert.trumbull@gfz-potsdam.de](mailto:robert.trumbull@gfz-potsdam.de))

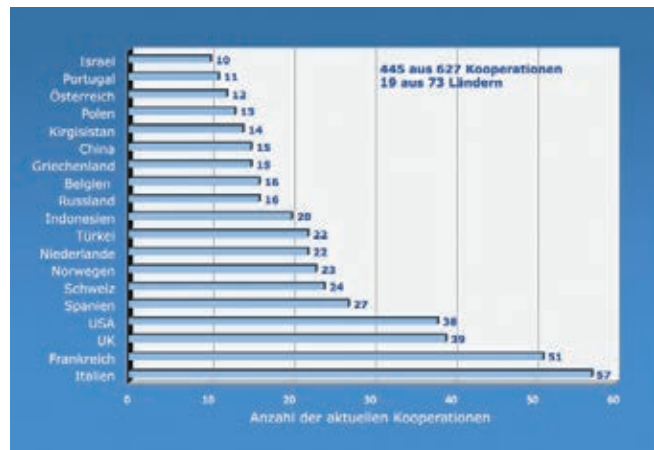
## Weitere aktuelle internationale Kooperationen

Neben den genannten Vorhaben in Südafrika konnten im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit auch mit anderen Ländern wichtige Aktivitäten fortgeschrieben, bzw. neu initiiert werden. So reiste vom 15.-19. Juni 2014 auf Initiative des Wirtschafts- und Kulturreferats der Deutschen Botschaft eine GFZ-Delegation nach Baku, **Aserbaidschan**, um mit der dortigen Akademie der Wissenschaften Gespräche zur Aufnahme wissenschaftlicher Kooperationen zu führen. Als gemeinsame prioritäre Themenschwerpunkte wurden „Natural Hazards“ und „Fluid-Flow-Prozesse“ definiert. Auf der Grundlage dieser Konsultationen wurde durch das GFZ anschließend ein Antrag zur Förderung einer Anbahnungsmaßnahme mit Aserbaidschan an das Internationale Büro des BMBF gestellt. Im Rahmen der bis zu 2-jährigen Anbahnungsmaßnahme sollen Möglichkeiten zur wissenschaftlichen Kooperation und weiteren Projektfinanzierung vertiefend evaluiert werden. Geplant sind gemeinsame Workshops und ein Austausch von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern.

Erfolgreich fortgesetzt wurden zudem die Gespräche mit der Vernadsky-Stiftung, Moskau, **Russland**, eine in der UNESCO registrierte Nichtregierungsorganisation auf dem Gebiet der Nachhaltigkeitsforschung. Nach der gemeinsamen Konferenz im April 2014 liegt nun den Aufsichtsgremien der Stiftung, dem BMBF und der Helmholtz-Gemeinschaft ein Konzept zur bilateralen Kooperation zur weiteren Diskussion vor. Es skizziert konkrete Vorschläge für die Zusammenarbeit zwischen der russischen Vernadsky-Stiftung und der Helmholtz-Gemeinschaft auf dem Gebiet der „Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung“. Sie soll durch gemeinsame Forschungsprojekte, bilaterale Sommerschulen und die Ausrichtung gemeinsamer Konferenzen umgesetzt werden.



Zum Stichtag 1. November 2014 beschäftigte das GFZ 245 ausländische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 58 Ländern. Das GFZ ist damit bereits seit Jahren eine attraktive Adresse für Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftler aus der ganzen Welt.



Vertragsbasierte internationale Kooperationen des GFZ (Stand: November 2014)

Am 8. und 9. September 2014 wurde in Bischkek, **Kirgisistan**, im Rahmen eines wissenschaftlichen Symposiums das 10-jährige Jubiläum der Gründung des Zentralasiatischen Instituts für Angewandte Geowissenschaften (ZAIAG) begangen. Zeitgleich tagten die Aufsichtsgremien des Forschungsinstituts. Das ZAIAG ist eine gemeinsame Institution des GFZ und der Regierung Kirgisistans.

Nach positiver Evaluierung des Vortrags fand am 28. Oktober 2014 an der Universität Potsdam die Begehung des gemeinsam von GFZ und Universität Potsdam beantragten internationalen Graduiertenkollegs „SuRfAce processes, Tectonics and Georesources: The Andean

foreland basin of Argentina (StRATEGY)“ statt. Die Gutachter bewerteten den Antrag als „prioritär förderungswürdig“. Sollte dieses überaus positive wissenschaftliche Votum im Mai 2015 durch den DFG-Senat bestätigt werden, würde ein internationales Großprojekt entstehen, das für die nächste Dekade bestimmend für die geowissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen dem GFZ und **Argentinien** ist.

Vom 27.-30. Oktober 2014 fand in Almaty, **Kasachstan**, der internationale Workshop „Regional Cooperation in Seismology and Earthquake Engineering in South and Central Asia“ statt. Die einwöchige Konferenz wurde vom GFZ in Kooperation

mit dem US Geologischen Dienst (USGS), dem International Science and Technology Center (ISTC) und der UNESCO ausgerichtet. Partner vor Ort war das Institute for Seismology. Mit der Veranstaltung, an der mehr als 80 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Ingenieurinnen und Ingenieure aus 17 Nationen teilnahmen, konnte die wissenschaftlich-technologische Zusammenarbeit mit den Ländern Zentral- und Südasiens auf dem Gebiet der Seismologie und Erdbebenforschung weiter gestärkt werden. ■

**Kontakt:**  
**Internationale Beziehungen**  
 Dr. Ludwig Stroink  
 E-Mail: [stroink@gfz-potsdam.de](mailto:stroink@gfz-potsdam.de)

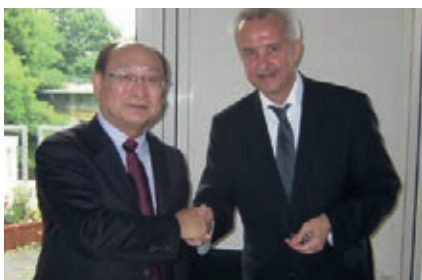


Foto: E. Gantz, GFZ

## Wichtige internationale Besuche am GFZ

Am 30. Juni 2014 besuchte der Generaldirektor des Japanischen Geologischen Dienstes, **Dr. Eikichi Tsukuda**, das GFZ. Neben Forschungseinrichtungen in den Niederlanden (TNO) und Frankreich (BRGM) zählte auch das GFZ zu den Sta-

tionen der Europareise. Die Gespräche erbrachten zahlreiche interessante Anknüpfungspunkte für eine zukünftige Zusammenarbeit mit den japanischen Kollegen, u. a. im Bereich der Satelliten- und Risikoforschung.



Foto: E. Gantz, GFZ

Am 6. September 2014 besuchte eine hochrangige taiwanesische Delegation unter Leitung des Umweltministers **Dr. Kuo-Yen Wei** das GFZ. Als konkretes Ergebnis der Konsultationen wurde verabredet, die gemeinsamen Forschungen auf dem Gebiet der Geothermie zu intensivieren. Anlässlich eines Aufenthalts von Prof. Inga Moeck (Leiterin der Arbeitsgruppe Explorationsgeologie am International Centre for Geothermal Research ICGR), wurden die Gespräche in Taiwan weiter konkretisiert. Derzeit ist ein MoU zur wissenschaftlich-technologischen Kooperation in Vorbereitung. ■

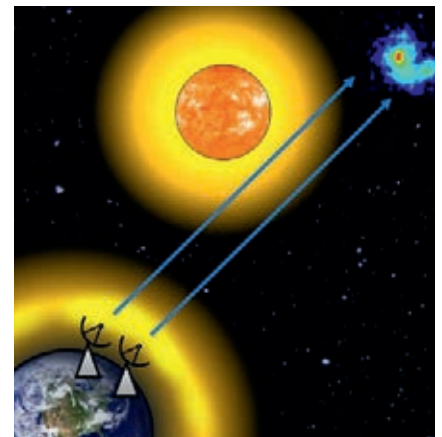
## Untersuchung der Sonnenkorona mit Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Forscher des GFZ haben eine neue Methode entwickelt, die Struktur der Sonnenkorona mithilfe der Radiointerferometrie zu untersuchen. Die Sonnenkorona ist der äußere Teil der Sonnenatmosphäre und besteht aus vollionisiertem Plasma, das Temperaturen von über 1 Mio. Grad erreicht. Ihre Struktur erschließt sich den Forschern über die Dichte der Elektronen in der Korona. Die Modelle der Elektronendichte der Korona werden mithilfe der Radiointerferometrie auf langen Basislinien („Very Long Baseline Interferometry“, VLBI) berechnet. VLBI ist ein wichtiges Verfahren der Geodäsie und Astrometrie, bei dem extragalaktische Radioquellen durch ein globales Netzwerk von Radioteleskopen beobachtet werden. Ein Vergleich der Daten mit den bisher angewandten Modellen zeigte eine sehr gute Übereinstimmung. Nicht nur das: die Wissenschaftler konnten zeigen, dass mit VLBI auch regionale Variationen der Elektronendichte bestimmt werden können und dass im Durchschnitt die Elektronendichte über aktiven Regionen der Sonnenoberfläche dreimal so hoch ist wie jene über ruhigen Regionen.

Das Verständnis der Eigenschaften und Mechanismen der Korona ist nicht nur wichtig für die Sonnenforschung. Durch Überwachen des Zustands und der Struktur der Korona können Vorhersagen über das Weltraumwetter getroffen werden, die z.B. entscheidend für Satellitenbetrieb, Raumfahrtaktivitäten oder Telekommunikation sind. Das Weltraumwetter übt auch einen wichtigen Einfluss auf die Erdionosphäre und das Geomagnetfeld aus. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Methoden hat das neue VLBI-Verfahren den Vorteil, dass es mit dieser Technik prinzipiell möglich ist, homogen und kontinuierlich die Sonnenkorona zu überwachen. Die aktuellen Ergebnisse deuten an, dass VLBI in Zukunft von großem Nutzen bei der Untersuchung der Sonnenkorona sein kann. ■

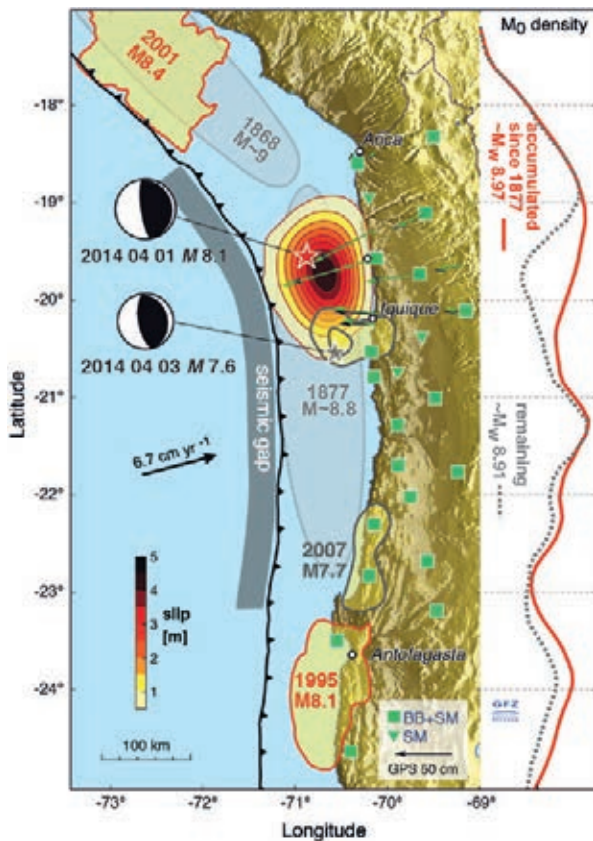
### Weitere Untersuchungsergebnisse in:

Soja, B., Heinkelmann, R., Schuh, H. (2014): Probing the solar corona with very long baseline interferometry. - *Nature Communications* 5: 4166; doi: 10.1038/ncomms5166.



VLBI-Beobachtungsprinzip: Radioteleskope auf der Erde zeichnen die Signale von extragalaktischen Radioquellen auf, die durch die Plasmen der Sonnenkorona und Erdionosphäre beeinflusst werden. (Abb.: B. Soja, GFZ)

## Iquique-Bebenereignis in Chile – Vorbemenserie steuerte Erdbebenablauf



Karte der südamerikanischen Pazifikküste, Nord-Chile/Süd-Peru. Hier wird die Pazifische Platte mit 6,7 cm/Jahr subduziert. Die ungefähren Bruchbereiche der letzten mächtigen Erdbeben aus dem 19. Jh. sind als graue Ellipsen hinterlegt. Das Iquique-Bebenereignis vom 01.04.2014 ( $M=8,1$ ) brach ein zentrales Stück der seit über 130 Jahren bestehenden seismischen Lücke. Grüne Symbole markieren Observatorienstandorte des Integrated Plate Boundary Observatory Chile (IPOC). Grüne Pfeile zeigen die durch das Iquique-Beben ausgelöste gemessene Bodenverschiebung an. Trotz des Iquique-Bebens speichert die seismische Lücke noch Energie, die für ein weiteres Starkbeben mit Magnitude bis zu  $M=8,9$  reichen würde. (Abb.: B. Schurr, GFZ)

intakt blieben. Die Vorbemen brachen in mehreren Schwärmen, die sich von Süden nach Norden fortpflanzten, den Rand des später im Hauptbeben gebrochenen zentralen Stücks. Der auf langjährigen IPOC-Daten aufbauende Erdbebenkatalog zeigt, dass sich über mehrere Jahre und während der Vorbemenserie verstärkt weiter Spannung aufbaute. Die Vorbemen haben also unter sich ständig erhöhenden Spannungen die zwei verhafteten Platten immer weiter gelockert, bis sie im starken Iquique-Beben schließlich ein signifikantes Stück nachgaben.

Legt man die in der Studie erstellte Blockierungskarte zugrunde und berechnet damit die seit 1877 aufgestaute Plattenkonvergenz von etwa 6,7 cm/Jahr, zieht dann noch die bekannten Erdbeben in dieser Zeitspanne ab, bleibt trotz des Iquiquebebens mit  $M_W=8,1$  immer noch Platz für ein weiteres Starkbeben mit Stärke bis zu  $M_W=8,9$ . Das gilt für den Fall, dass die gesamte verbleibende Lücke auf einmal brechen würde. Wahrscheinlicher ist aber, dass das Iquique-Beben eine Barriere zwischen den ungebrochenen Bereichen im Norden und Süden bildet. ■

**IPOC-Observatorium im Internet:**  
<http://www.ipoc-network.org>

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:**  
 Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoechner, A., Palo, M., Wang, R., Moreno, M., Bartsch, M., Zhang, Y., Oncken, O., Tilmann, F., Dahm, T., Victor, P., Barrientos, S., Vilotte, J.-P. (2014): Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. - Nature, 512, p. 299-302.

### Neue Erkenntnisse über das mächtige Erdbeben vom April 2014 in Chile

Eine lang andauernde Serie von Vorbemen hat maßgeblich den Bruchprozess des extrem starken Erdbebens bei Iquique in Nordchile gesteuert. Über ein dreiviertel Jahr dauerte diese Vorbemenserie an, die in einem Beben der Magnitude  $M=6,7$  zwei Wochen vor dem Hauptbeben kulminierte. Am 1. April 2014 schließlich brach mit dem Hauptbeben ( $M=8,1$ ) ein zentrales Stück der wichtigsten seismischen Lücke entlang der südamerikanischen Subduktionszone bei Iquique, an der die pazifische Nazca-Platte unter die Südamerikanische Platte geschoben wird (vgl. Beitrag „Seismische Lücke in Chile“, System Erde (2014) Heft 1, S. 73-74).

Auf Initiative des GFZ wurde diese Lücke durch das International Plate Boundary Observatory of Chile (IPOC) in internationaler Zusammenarbeit unter anderem mit Seismometern und kontinuierlichen GPS-Messungen überwacht. Diese lange und dauerhafte Überwachung macht das Iquique-Erdbeben zum bestaufgezeichneten Subduktionserdbeben weltweit. Die Echtzeitübertragung dieser Daten machte zudem die zügige Auswertung möglich.

Die Untersuchungen einer durch das GFZ geleiteten Studie zeigen auf Basis der IPOC-Daten, dass durch das Hauptbeben der Stärke  $M=8,1$  zwar das Mittelstück der seismischen Lücke mit einer Länge von rund 150 km brach, zwei große Segmente nördlich und südlich davon aber

## Schluchten verschwinden durch flussabwärts fortschreitende Erosion



*Geländearbeit in der Schlucht des Da'an Chi in Taiwan. Die 1 km lange und bis zu 20 m tiefe Schlucht hat sich in weniger als 10 Jahren nach dem Jiji-Erdbeben im Jahr 1999 gebildet. Der Felssporn in der Bildmitte wurde während eines Hochwassers 2012 im Zeitraum von einer Stunde weggespült. (Foto: K. Cook, GFZ)*

Verwerfungen durch Erdbeben blockieren gerade in gebirgigen Gegenden häufig Flussläufe. Das angestaute Wasser schafft es aber stets, sich wieder einen Weg zu bahnen und schneidet sich einen Abfluss. Die dabei stattfindende Erosion des Gesteins löscht den anfänglichen, engen Einschnitt aus, von dem ursprünglichen Durchbruch bleibt keine Spur. Im Extremfall verschwindet die ganze Schlucht; übrig bleibt ein breites Tal mit einem flachen Flussbett. Bisher ging man davon aus, dass dieser Übergang von enger Schlucht zu breitem Tal im wesentlichen durch die Erosion der seitlichen Ränder der Schlucht vorangetrieben wird.

Ein Team aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des GFZ hat einen neuen Mechanismus entdeckt, mit dem dieser fluviale Erosionsprozess vor sich geht. Sie untersuchten die Entwicklung einer Schlucht im Flusslauf des Da'an Chi in Taiwan über eine Periode von fast

zehn Jahren. Dort hatte das Jiji-Erdbeben von 1999 eine quer zum Fluss verlaufende Verwerfung gebildet. Derzeit ist die Schlucht knapp 1 km lang, 25 m breit und bis zu 17 m tief. Ihre Ränder wurden anfangs mit 5 m pro Jahr abgetragen, heute sind es immer noch 1,5 m pro Jahr.

Bei dieser weltweit ersten Echtzeitbeobachtung der Entwicklung der Breite einer Schlucht durch fluviale Erosion über mehrere Jahre identifizierten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler einen bis dahin unbekanntem Mechanismus, mit dem die Schlucht zerstört wird, den sie „Flussabwärts fortschreitende Erosion“ (Downstream Sweep Erosion) taufte. Für diesen Mechanismus ist ein verzweigtes Gerinne oberstrom der Schlucht notwendig. Der Verlauf dieses Gerinnes verlagert sich regelmäßig, und es muss, um in die Schlucht fließen zu können, scharfe Kurven machen. In diesen Kurven prallt das Geschiebematerial, das der Fluss mit sich führt, auf die Oberkante der Schlucht und verursacht dadurch starke Erosion.

Dieser Mechanismus spült so allmählich das gesamte Gestein der Schlucht weg und ist damit Ursache für die Planierung des Flussbetts über die gesamte Breite des Tals. Mit der momentanen Abtragsrate von 17 m pro Jahr wird es am Da'an Chi nur 50 bis 100 Jahre dauern, bis wieder ein flaches Gerinne die gesamte Talbreite füllt. Im Gegensatz dazu wäre die Seitenerosion in der Schlucht zu langsam, um die Schlucht innerhalb eines Erdbebenzyklus auszulöschen. Die jetzt entdeckte, flussabwärts fortschreitende Erosion ist entschieden effektiver. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:**  
Cook, K., Turowski, J., Hovius, N. (2014): [River gorge eradication by downstream sweep erosion](#). - *Nature Geoscience*, 7, p. 682-686.

## Tektonischer Staudamm



*Sedimenttransport im Yarlung Zangbo bei Lhasa, Tibet (Foto: M. Kaban, GFZ)*

Der Himalaya weist einige der eindrucksvollsten Schluchten der Welt auf, die durch Flüsse geformt wurden. Die Entstehungsgeschichte des berühmtesten dieser Einschnitte, der Zangbo-Schlucht im Ost-Himalaya, muss nun neu geschrieben werden. Der Yarlung Zangbo ist der größte Hochgebirgsfluss der Welt. Er fließt 1700 km über das Tibet-Plateau auf einer Höhe von etwa 4000 m und folgt dabei der Nahtstelle zwischen Indien und Eurasien. Im Ost-Himalaya bricht der Fluss aus dem Hochplateau in der weltbekannten, hufeisenförmigen Zangbo-Schlucht nach Indien durch.

Ein Team von deutschen, chinesischen und amerikanischen Geoforscherinnen und Geoforschern unter Beteiligung des GFZ entdeckte nun flussaufwärts einen mit über 500 m Sediment gefüllten Canyon unterhalb des heutigen Betts des Yarlung Zangbo-Flusses. Mit Hilfe von Bohrungen konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler den ehemaligen Talboden rekonstruieren und so die geologische Geschichte der Zangbo-Schlucht entschlüsseln. Sie stellten fest, dass die Schlucht infolge der raschen tektonischen Hebung des Himalaya vor etwa zwei bis drei Mio. Jahren ihre steile Form erhielt. Infolge des starken Gefälles schneidet sich der Fluss sehr schnell ein. Jährlich wird hier bis zu 1 cm Gestein abgetragen, das entspricht etwa der jährlichen tektonischen Hebungsrates. Der Zusammenstoß von Indien mit dem Kontinent Eurasien hat hier einen tektonischen Staudamm mit Abfluss erzeugt.

In der Folge führt diese Barriere flussaufwärts zu einer geringeren Fließgeschwindigkeit des Yarlung Zangbo. Zuvor hatte sich der Fluss dort tief in das tibetische Hochplateau eingeschnitten. Durch das verlangsamte Fließen lagerte sich im Flussbett über Hunderte von Kilometern daher verstärkt das Gestein als Sediment ab, das der Yarlung Zangbo und seine Zuflüsse aus dem Hochland mit sich führten. Auf bis zu 1000 m dick schätzen die Geoforscherinnen und Geoforscher diese Ablagerungsschicht im Flussbett. Über eine Entfernung von 300 km von der Schlucht aus flussaufwärts wurden fünf Bohrungen in das Flussbett niedergebracht. Eine der Bohrungen stieß erst nach 540 m ins Grundgestein. Aus den Bohrkernen konnte die Abnahme der Fließgeschwindigkeit abgelesen und der Beginn der Sedimentation mithilfe von kosmogenen Nukliden datiert werden. Das sind seltene Isotope, die erdoberflächennah durch kosmische Strahlung erzeugt werden. Vor 3 Mio. Jahren schnitt sich der Fluss noch tief ins Gestein des tibetanischen Hochplateaus ein. Heute ist dieser einst gewaltige Canyon unter Sediment versteckt.

Die neuen Erkenntnisse zeigen, dass das schnelle Einschneiden des Yarlung Zangbo und die aktuelle Entwicklung der Zangbo-Schlucht die Folge tektonischer Hebung sind und nicht, wie bislang angenommen, deren Ursache. Nebenher werden durch diese Forschungsergebnisse auch Hypothesen widerlegt, welche die Herkunft der Tsangpo-Schlucht auf das Anzapfen des Yarlung Zangbo durch den Brahmaputra zurückführen. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:**

Wang, P., Scherler, D., Liu-Zeng, J., Mey, J., Avouac, J.-P., Zhang, Y., Shi, D. (2014): Tectonic Control of Yarlung Tsangpo Gorge Revealed by a Buried Canyon in Southern Tibet. - *Science* 6212, Vol. 346, S. 978-980, DOI: 10.1126/science.1259041.

**Hochauflösende Karte des Grundgesteins der Antarktischen Halbinsel**



*Eismassen und Felsaufschlüsse in der Antarktis (Foto: K. Fleming, GFZ)*

Antarktische Gletscher reagieren empfindlich auf Änderungen im System Atmosphäre/Ozean. Um die dynamische Reaktion der Gletscher auf solche klimatischen Änderungen bestimmen zu können, sind hochauflösende Daten der Eisdicke erforderlich, denn diese sind eine wesentliche Randbedingung in Modellierungen des Eisflusses.

Ein Wissenschaftlerteam vom GFZ und von der ETH Zürich sowie der Universität Freiburg, Schweiz, hat eine hochauflösende Karte des Grundgesteins der Antarktischen Halbinsel erstellt und Berechnungen der Eisdicke vorgenommen, die auf der Felsoberflächentopographie und einer Modellierung der Eisdynamik beruhen. Dazu wurden alle verfügbaren Eisdickenmessungen aus der Messkampagne „Operation Ice Bridge“ sowie Eisflussgeschwindigkeiten für das gesamte Untersuchungsgebiet verwendet. Der neue Datensatz löst die raue Felsoberfläche unter dem Eis im Detail auf, weist tief eingeschnittene Täler auf und zeigt, dass 34 % des Eises in Tiefen unterhalb des

Meeresspiegels aufliegt. Das Abschmelzen der Antarktischen Halbinsel könnte den globalen Meeresspiegel um 69 ± 5 mm steigen lassen. Im Vergleich zu vorherigen Messdaten aus dem Projekt „Bedmap2“, das die ganze Antarktis mit einem Gitternetz mit 1 km Auflösung abdeckte, ergaben diese neuen Daten eine um 48 % höhere Eismächtigkeit. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:**

Huss, M., Farinotti, D. (2014): A high-resolution bedrock map for the Antarctic Peninsula. - *The Cryosphere*, 8, p. 1261-1273.

## Wissenschaftlicher Feldversuch zur Rückförderung von CO<sub>2</sub> am Pilotstandort Ketzin



Rückförderung von CO<sub>2</sub> aus dem geologischen Speicher des GFZ in Ketzin, Oktober 2014  
(Foto: T. Kollersberger, GFZ)

Das GFZ hat vom 15. bis zum 27. Oktober 2014 einen Feldversuch zur Rückförderung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) an seinem Pilotstandort zur wissenschaftlichen Untersuchung der geologischen Speicherung des Treibhausgases CO<sub>2</sub> im brandenburgischen Ketzin/Havel durchgeführt. In diesem Zeitraum wurden 240 t CO<sub>2</sub> und 57 m<sup>3</sup> Sole aus dem Gestein sicher und problemlos aus dem Speicher wieder an das Tageslicht geholt. Nach der ersten Woche mit kontinuierlicher Förderung wurde in der zweiten Woche des Feldversuchs das CO<sub>2</sub> nur tagsüber gefördert, nachts wurde die Förderung unterbrochen. Dieses Wechsellastregime hatte den wissenschaftlichen Vorteil, dass überprüft werden konnte, wie das Reservoir und die Bohrung auf eine solche wechselnde Belastung reagieren. Am Ende des Versuchs wurde zudem die Förderrate schrittweise erniedrigt, um zu ermitteln, ab welcher Rate kein Formationsfluid, also Wasser aus dem Gestein, mehr mitgefördert wird. Diese Daten lassen auf die dynamischen Bedingungen im Bohrloch schließen.

Am Standort Ketzin wurden zwischen Juni 2008 und August 2013 insgesamt etwa 67 000 t CO<sub>2</sub> in einen porösen Sandstein in einer Tiefe von 630 m bis 650 m gepumpt. Mit dem jetzt durchgeführten Feldversuch sollten drei zentrale Fragestellungen untersucht werden: Wie verhält sich ein Speicher bzw. eine Bohrung bei der Rückförderung von CO<sub>2</sub>? Welche chemischen Zusammensetzungen haben das rückgeförderte CO<sub>2</sub> sowie das mitgeförderte Formationsfluid? Wie breitet sich das rückgeförderte CO<sub>2</sub> an der Oberfläche aus? Die gemessenen Zusammensetzungen des geförderten CO<sub>2</sub>

sowie des Formationsfluids erlauben es, die geochemischen Wechselwirkungen zwischen CO<sub>2</sub>, Formationsfluid und Gestein unter tatsächlichen *In-situ*-Bedingungen zu untersuchen. Messungen vor Ort deuten darauf hin, dass das rückgeförderte CO<sub>2</sub> eine Reinheit von >98% besitzt. Mengemäßig wichtigster Begleitstoff des CO<sub>2</sub> ist Stickstoff N<sub>2</sub> mit <2%, der aus einem CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> Ko-Injektionsexperiment stammt, das im Sommer 2013 zum Abschluss der Injektion durchgeführt wurde. Erste Analysen des mitgeförderten Formationsfluids zeigen leicht angestiegene Anionen- und Kationenkonzentrationen im Vergleich zu der ursprünglichen Zusammensetzung des Formationsfluids und deuten auf CO<sub>2</sub>-induzierte CO<sub>2</sub>-Fluid-Gestein-Wechselwirkungen hin. Diese ersten Ergebnisse sind konsistent mit Laborexperimenten an Ketzin-Proben und werden helfen, die Aussagefähigkeit geochemischer Laborexperimente, die typischerweise in vereinfachten Systemen durchgeführt werden, zu überprüfen.

Die generelle Machbarkeit einer CO<sub>2</sub>-Rückförderung sowie die Kenntnis der Zusammensetzung des rückgeförderten CO<sub>2</sub> sind auch für die Beurteilung einer möglichen Nutzung des gespeicherten CO<sub>2</sub> wichtig. Der erfolgreiche Feldversuch zeigen, dass eine sichere Rückförderung von CO<sub>2</sub> prinzipiell möglich ist und bei stabilen Speicher- und insbesondere Bohrlochbedingungen durchgeführt werden kann. Die am Standort Ketzin gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich zunächst nur auf den Pilotmaßstab. Eine Übertragung auf den industriellen Maßstab ist prinzipiell möglich, muss aber zunächst im Rahmen sogenannter Demo-

projekte überprüft und bestätigt werden. Mit dem jetzt abgeschlossenen Rückfö-  
derversuch konnten weitere Erkenntnisse zu grundlegenden Prozessen gewonnen werden, die eine solche Übertragung auf größere Maßstäbe ermöglichen.

### Neues Projekt zur Sicherheit unterirdischer CO<sub>2</sub>-Speicherung

Eine weitere Fragestellung, die im Rahmen des Feldversuchs untersucht wird, ist der mögliche Einsatz einer CO<sub>2</sub>-Rückförderung als *ultima ratio* zur Druckentlastung eines Speichers im Falle einer Leckage. Die Untersuchung dieser Fragestellung ist Bestandteil des neu angelaufenen EU-Projekts MiReCOL (Mitigation and Remediation of CO<sub>2</sub> Leakage). Sicherheit, Zuverlässigkeit und Beherrschbarkeit der CO<sub>2</sub>-Speicherung sind zentrale Aspekte bei der Bewilligung und Akzeptanz dieser Technologie. Aus diesem Grund analysiert MiReCOL die verschiedenen Leckage-Mechanismen und die mit ihnen verbundenen möglichen Sicherheitsgefährdungen. Basierend auf dieser Analyse sollen bestehende und neu entwickelte Methoden zur Leckagebekämpfung auf ihre Effektivität und Anwendbarkeit hin untersucht werden. Die Arbeiten umfassen Laborexperimente, Modellierungen sowie Feldexperimente an den Standorten Ketzin und Bečej, Serbien. MiReCOL verfolgt dabei einen streng risikobasierten Ansatz mit dem Ziel, die Ergebnisse direkt den Betreibern und Genehmigungsbehörden zur Verfügung zu stellen und sie über die möglichen Methoden der Leckagebekämpfung und ihre Auswirkungen zu informieren.

MiReCOL wird von Netherlands Organisation for Applied Scientific Research TNO koordiniert. Weitere Projektpartner neben dem GFZ sind IFP Energies nouvelles (F), Imperial College of Science, Technology and Medicine (UK), University of Edinburgh (UK), Shell Global Solutions International B.V. (NL), SINTEF Petroleum Research (NO), Statoil Petroleum AS (NO), Weatherford consultants (NO) und Naftna Industrija Srbije (RS). MiReCOL ist im Frühjahr 2014 gestartet und wird über drei Jahre von der EU im 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) mit 3,8 Mio. Euro gefördert. ■

## Pfannkuchen aus Lava

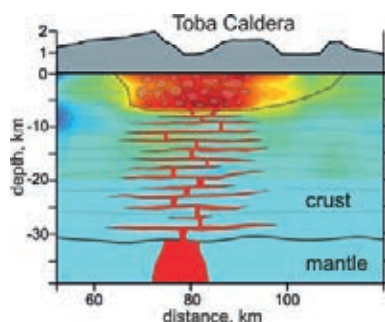


Blick vom Kraterrand auf die Toba-Caldera, Indonesien (Foto: T. Ryberg, GFZ)

Die gewaltigen Mengen an Lava, die bei extrem großen vulkanischen Eruptionen zutage gefördert und in die Atmosphäre geschleudert werden, lagern sich zuvor über Jahrmillionen in der Erdkruste an. Solche Intrusivlager bestehen aus Magma, das in die Kruste einwandert und sich in einer Vielzahl horizontaler Magmakammern ablagert. Diese liegen wie ein Pfannkuchenstapel übereinander.

Ein Team von Geoforscherinnen und Geoforschern aus Novosibirsk, Paris und Potsdam beschäftigten sich mit der Frage, wo die gewaltigen Mengen an Material herkommen, die bei extremen Eruptionen aus Vulkangebieten herausgeschleudert werden und riesige Krater (Calderas) hinterlassen. Sie untersuchten dazu die Toba-Caldera in der Subduktionszone von Sumatra in Indonesien, die bei einer der größten Vulkaneruptionen in der jüngeren Erdgeschichte entstand. Vor etwa 74 000 Jahren wurde hier die gewaltige Menge von 2800 km<sup>3</sup> vulkanischen Materials in die Luft geschleudert – mit dramatischen globalen Folgen für Klima und Umwelt. Dabei bildete sich der 80 km lange Toba-See.

Das Geowissenschaftlerteam wollte wissen: Wie konnten sich diese gigantischen Massen eruptionsfähigen Materials, die für die Bildung eines solchen Super-Vulkans erforderlich sind, in der Erdkruste ansammeln? War dies ein einzelnes Ereignis vor Tausenden Jahren oder kann sich so etwas wiederholen? Die Forscherinnen und Forscher des GFZ installierten zur Untersuchung dieser Fragen im Gebiet der Toba-Caldera ein Seismometernetzwerk und stellten diese Daten über das GFZ-Datenarchiv GEOFON den beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zur Verfügung.



In horizontalen Magmakammern, wie hier skizziert, sammeln sich die großen Magma-mengen von Mega-Eruptionen an. (Abb.: Ivan Koulakov)

Die interne Struktur des Magmareservoirs unterhalb der Toba-Caldera wurde dabei mit einer neuen Methode untersucht. Das seismische Rauschen, also die natürliche seismische Unruhe, die sonst eher als Störung gilt, wurde über sechs Monate lang aufgezeichnet. Die Auswertung der Daten mit statistisch-stochastischen Verfahren ergab, dass die Geschwindigkeit der seismischen Wellen von der Richtung abhängt, in der die Erdkruste deformiert wird. Oberhalb von 7 km Tiefe wurde durch die Ablagerungen während der letzten Eruption eine Zone niedriger Geschwindigkeiten gebildet. Unterhalb dieser Tiefe wird die seismische Anisotropie durch horizontale Magmenkörper verursacht, die das Magmareservoir wie einen Stapel Pfannkuchen aufbauen. Das bildet sich in den seismischen Daten ab. Die mittlere Erdkruste unter dem Toba-Supervulkan hat also einen horizontalschichtigen Aufbau. Hier lagern in einer Tiefe unterhalb von 7 km über ein großes Raumvolumen verteilt magmatische Intrusivkörper, in denen sich teilweise noch geschmolzenes Material befindet.

Es wurde bereits vermutet, dass die großen Magmavolumen, die bei Super-Eruptionen gefördert werden, im Lauf von Millionen Jahren in Form von nacheinander gefüllten Intrusivlagern langsam akkumuliert werden. Das konnte jetzt durch die Ergebnisse des Feldexperiments bestätigt werden. Die Studie hilft, Prozesse, die zu solchen Super-Eruptionen führen, besser zu verstehen. ■

### Weitere Untersuchungsergebnisse in:

Jaxybulatov, K., Shapiro, N. M., Koulakov, I., Mordret, A., Landès, M., Sens-Schönfelder, C. (2014): A large magmatic sill complex beneath the Toba caldera. - *Science* 6209, Vol. 346, p. 617-619; doi: 10.1126/science.1258582.



## ICDP-Trainingskurs „Wissenschaftliches Bohren in aktiven Störungszonen“



Bohrarbeiten am Franz-Josef-Gletscher in Neuseeland: Alpine Fault ICDP-Bohrung (DFDP)  
(Foto: T. Wiersberg, GFZ)

Der diesjährige Trainingskurs des am GFZ koordinierten Internationalen kontinentalen Bohrprogramms ICDP „Wissenschaftliches Bohren in aktiven Störungszonen“ fand vom 5. bis 10. Oktober am Franz-Josef-Gletscher in Neuseeland, nahe der gleichzeitig laufenden Alpine Fault ICDP-Bohrung (DFDP) statt. Der Kurs behandelte unter anderem die Themen Bohrtechnik, Proben und Beprobungsstrategien, seismische Vorerkundung und Langzeituntersuchungen im Bohrloch, Bohrlochmessungen, Datenmanagement sowie Planung und Ausführung von ICDP-Bohrprojekten. Das Wissen wurde in praktischen Übungen vertieft und die Teilnehmerinnen und Teilnehmer hatten auch die Möglichkeit, die laufende Bohrung zu besichtigen. 33 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 13 Ländern (Neuseeland, USA, UK, Kanada, Finnland, Indien, China, Italien, Korea, Holland, Schweiz, Spanien und Deutschland), die in laufende oder anstehende wissenschaftliche Bohrprojekte eingebunden sind, nahmen an dem Trainingskurs teil. Zu den Referenten gehörten auch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ. ■

## Seismologie-Trainingskurs: Hilfe zur Selbsthilfe

Am diesjährigen Internationalen GFZ-Trainingskurs „Seismologie und seismische Gefährdungseinschätzung“ vom 6. bis 31. Oktober in Bogotá, Kolumbien, nahmen 25 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 19 Ländern Lateinamerikas teil. Sie kamen aus Argentinien, Bolivien, Brasilien, Chile, Costa Rica, Dominica, Dominic. Rep., Ecuador, El Salvador, Honduras, Jamaica, Kolumbien, Kuba, Mexico, Nicaragua, Peru, Trinidad, Uruguay und Venezuela. Zielsetzung dieses Trainingskurses war es, den Teilnehmerinnen und Teilnehmern fundierte Kenntnisse zur Erdbebenanalyse, zur Bestimmung von Standorteffekten und Methoden der seismischen Gefährdungseinschätzung

zu vermitteln. Die Kursteilnehmerinnen und Kursteilnehmer wurden qualifiziert, Monitoring- und Frühwarnsysteme in ihren Ländern zu installieren und effizient zu betreiben. Im Zuge der internationalen Zusammenarbeit wird damit auch die Vernetzung der seismologischen Überwachungssysteme vorangetrieben.

Das GFZ führt jährlich internationale Trainingskurse zum Thema „Seismologie und Bewertung der Erdbebengefährdung“ durch. Die fünfwöchigen Trainingskurse vermitteln sowohl theoretische Grundlagen als auch praktisches Training auf dem Gebiet der Seismologie und der seismischen Gefährdungseinschätzung. ■



Einen wesentlichen Bestandteil des Trainingskurses bilden Vorlesungen mit begleitenden praktischen Übungen am Computer (Bild links oben), eigene Messungen (Bild oben) und deren Auswertung zur Bestimmung der Untergrundeigenschaften. Eine Exkursion führte zur Stadt Manizales und dem dortigen Hochrisiko-Vulkan Nevado del Ruiz. Die Fahrt zum Vulkan und der Besuch von Observatorien in 4000 m Höhe (Bild links unten) war für den Kurs besonders interessant und instruktiv, da nahe des Vulkangipfels auch der Ursprung der Schlammlawine liegt, die die Stadt Armero 1985 zerstörte. (Fotos: C. Milkereit, GFZ)

## Technologietransfer



Am 5. Mai 2014 erfolgte die Gründung der WiPS.consulting GmbH mit Sitz in Potsdam. WiPS steht für „Water in Petroleum Systems“. Diese Ausgründung des GFZ wird seit Februar 2014 mit Mitteln der Helmholtz-Gemeinschaft gefördert und ist eine gemeinsame Gründung von PD Dr. Hans-Martin Schulz (GFZ-Sektion „Organische Geochemie“) und Prof. Dr. Wolfgang van Berk (Technische Universität Clausthal). Basierend auf den Erfahrungen aus langjährigen wissenschaftlichen Arbeiten zu Gesteins-Fluid-Wechselwirkungen hat sich das Unternehmen auf die hydrogeochemische Modellierung von Prozessen spezialisiert, die zur Bildung von Risikofaktoren wie Schwefelwasserstoff beitragen, aber auch bei Sekundärmaßnahmen zur verbesserten Erdölförderung auftreten. ■

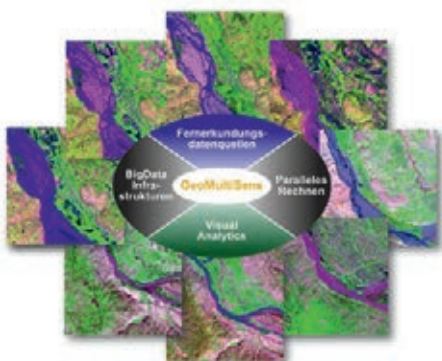
**Mehr Informationen zu WiPS im Internet:**  
<http://www.water-in-petroleum-systems.com>

## Neue Projekte

### GeoMultiSens – Skalierbare multisensorale Analyse von Geofernerkundungsdaten

Die Fernerkundung bietet die Möglichkeit, Prozesse der Erdoberfläche, die mit globalen Herausforderungen wie Klimawandel, Bevölkerungswachstum oder Verlust der biologischen Vielfalt in Zu-

sammenhang stehen, kontinuierlich und global zu beobachten. Hierzu steht eine Vielzahl an unterschiedlichen Sensoren zur Verfügung, die sehr große Datenmengen erzeugen. Deshalb wird in Zukunft die gemeinsame Auswertung dieser Datenmengen von zentraler Bedeutung für die Wissenschaft sein. Ziel des am GFZ koordinierten Verbundprojekts GeoMultiSens ist, innovative Big-Data Technologien zu entwickeln, welche die Analyse von heterogenen Fernerkundungsdaten im Petabyte-Bereich ( $10^{15}$  Byte) ermöglichen. Hierzu bündelt GeoMultiSens die Expertisen von drei Forschungsinstituten aus den Disziplinen Informatik und Fernerkundung. Das Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin baut eine Big-Data-Infrastruktur auf, um die Verwaltung derart großer Datenmengen zu ermöglichen. Neben der Verwaltung ist auch die schnelle Extraktion von Informationen aus großen Datenmengen wichtig. Dazu passt die Humboldt-Universität Berlin etablierte Fernerkundungsmethoden an eine hochparallele Analyseumgebung an. Die GFZ-Sektion „Fernerkundung“ entwickelt neue Algorithmen für die Integration und Datenverarbeitung unterschiedlicher Satellitensensoren und die GFZ-Sektion „Geoinformatik“ entwickelt interaktive Explorationswerkzeuge für die Bewertung raum-zeitlicher Veränderungen der Erdoberfläche. Das Verbundprojekt verfolgt zwei Transferziele: die Big-Data-Technologien sollen als Open-Source Software der Wissenschaft zur Verfügung gestellt werden und die Veränderungsanalysen als wissenschaftliche Informationsprodukte bereitstehen. GeoMultiSens wird am GFZ koordiniert (Sektion „Geoinformatik“, Dr. M. Sips) und im Rahmen des BMBF-Förderprogrammes „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ seit September 2014 bis August 2017 mit rund 2 Mio. Euro finanziert.



### EGSIEM-Projektstart: Nutzung von Erdschwerefelddaten zur Vorhersage hydrologischer Extremereignisse



*Daten von Schwerefeldsatellitenmissionen wie GRACE helfen bei der Beobachtung hydrologischer Extremereignisse, wie beispielsweise Hochwasser am Mekong (Foto H. Thoss, GFZ)*

Ein neuer Service mit dem Namen EGSIEM (European Gravity Service for Improved Emergency Management) soll eine verbesserte Vorhersage und Kartierung hydrologischer Extremereignisse, wie Dürren und Hochwasser ermöglichen. Er basiert hauptsächlich auf der Nutzung von Erdschwerefelddaten der Erdbeobachtungssatelliten GRACE und GRACE-FO (Follow-on, Start in 2017), die in Kooperation zwischen GFZ, NASA und DLR betrieben werden. Zudem soll die generelle Anwendung von Erdschwerefelddaten in den Erd- und Umweltwissenschaften vorangetrieben und die zeitliche Auflösung der Daten verbessert werden. Die GFZ-Sektionen „Globales Geomonitoring und Schwerefeld“ und „Hydrologie“ beteiligen sich an Entwicklung und Betrieb des durch das Horizon2020-Rahmenprogramm für Forschung und Entwicklung für den Zeitraum 2015 bis 2017 mit 1,75 Mio. Euro (davon 33 % GFZ) geförderten Projekts. Die Leitung des Projekts liegt beim Astronomischen Institut der Universität Bern (CH). Neben dem GFZ sind als weitere Projektpartner das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (D), die Universitäten Graz (A), Luxemburg (LUX) und Hannover (D) sowie die französische Raumfahrtagentur CNES (F) und die Firma Géode & Cie (F) beteiligt. ■

# Ausgezeichnet

## Zwei neue Direktoren am GFZ



Als neue Direktorin des GFZ-Departments „Chemie der Erde“ nahm **Prof. Dr. Magdalena Scheck-Wenderoth** am 1. Dezember 2014 die Arbeit auf. Sie folgt **Prof. Dr. Jörg Erzinger**, der diese Funktion sehr erfolgreich wahrgenommen hat. Die Themenschwerpunkte von Frau Scheck-Wenderoth am GFZ sind Geo-Energie und Geodynamik von Sedimentbecken, datengestützte 3D-Strukturmodellierung von Sedimenten/Kruste/Lithosphäre, gekoppelter Massen- und Wärmetransport in Sedimentbecken, regionale 3D-Schwerefeldmodellierung, Struktur- und Subsidenzgeschichte und Salzdynamik. Magdalena Scheck-Wenderoth ist seit 2013 Professorin für „Sedimentbeckenanalyse“ an der RWTH Aachen. Im gleichen Jahr wurde sie Secretary General des International Lithosphere Program (ILP). Sie promovierte 1997 an der FU Berlin im Fach Geologie und übernahm im Jahr 2000 eine Research Assistant Professur an der Universität Kopenhagen, Dänemark. Am GFZ arbeitet sie seit 1997 und wurde 2008 Leiterin der Sektion „Sedimentbeckenanalyse“.



Ebenfalls mit dem 1. Dezember 2014 wurde **Prof. Dr. Michael Kühn** zum Sprecher der „Technologie-Transferzentren, Wissenschaftliche Infrastruktur und Plattformen“ ernannt, die er zusammen mit Dr. Jörn Lauterjung leitet. Prof. Kühn ist zugleich Leiter der GFZ-Sektion „Hydrogeologie“, die er 2012 aufbaute. Zuvor war er von 2009 bis 2012 Leiter des Zentrums für CO<sub>2</sub>-Speicherung am GFZ. Er ist seit 2012 Professor für Hydrogeologie in einer gemeinsamen Berufung an der Universität Potsdam. Seine Promotion in Geochemie erhielt er 1997 an der Universität Bremen, dem folgte 2003 die Habilitation in Hydrologie an

der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Michael Kühns wissenschaftliche Interessen sind geochemische Gesteins-Wasser-Wechselwirkungen, gekoppelte numerische Simulation von Strömung/Wärmeausbreitung/Transport/chemischen Reaktionen/Deformation, CO<sub>2</sub>-Speicherung in geologischen Formationen, hydrogeothermale Energiegewinnung und die Bildung von Erzlagerstätten. ■

## Drei neue Sektionsleitungen am GFZ



Zum 1. September 2014 hat **Prof. Dr. Fabrice Cotton** seine Stelle als neuer Leiter der Sektion „Erdbebengefährdung und Spannungsfeld“ des GFZ angetreten. Herrn Cottons Hauptinteresse gilt der Parametrisierung starker Bodenbewegungen mit Fokus auf die Verbesserung der seismologischen Modelle europäischer Regionen und der Entwicklung neuer Inversionstechniken für Herdstudien von Starkbeben. Einige seiner Forschungsergebnisse sind bereits integraler Bestandteil moderner Praxis probabilistischer Erdbebengefährdungsanalysen. Fabrice Cotton konnte im Rahmen der Helmholtz-Rekrutierungsinitiative für das GFZ gewonnen werden. Zuvor war er am Institut des Sciences de la Terre der Joseph Fourier-Universität in Grenoble, Frankreich, tätig. Dort war er für den Erasmus Mundus-Master-Studiengang „Earthquake Engineering and Engineering Seismology“ verantwortlich, dessen assoziierter Partner die Universität Potsdam ist. Im Wintersemester 2014/2015 übernimmt er die W<sub>3</sub>-Professur „Ingenieur-Seismologie und Erdbebengefährdung“ an der Universität Potsdam, die gemeinsam mit dem GFZ eingerichtet wurde. Mit der Anwerbung von Prof. Cotton ist geplant, hier eine Fortsetzung des Internationalen Masters zu etablieren. Damit wird die Universität Potsdam zusammen mit dem

GFZ auf dem Gebiet Erdbeben-Risikotrainning weltweit führend. **Prof. Dr. Gottfried Grünthal**, der nach erfüllter und sehr erfolgreicher Dienstzeit aus der Funktion als Sektionsleiter ausscheidet, bleibt dem GFZ aber über die Leitung zweier Forschungsprojekte weiter verbunden.



**Prof. Dr. Liane Benning** übernahm am 1. Oktober 2014 die Leitung der neu eingerichteten GFZ-Sektion „Interface-Geochemie“ und tritt im Wintersemester 2014/2015 eine gleichnamige W<sub>3</sub>-Professur an der Freien Universität Berlin im Rahmen einer gemeinsamen Berufung mit dem GFZ an. Frau Benning kommt von der Leeds University, England, und ist eine herausragende Wissenschaftlerin auf dem Gebiet der Tieftemperatur-Geochemie, der Geobiologie und der Interface-Prozesse an Mineraloberflächen. Sie ist zudem Vizepräsidentin der European Association of Geochemistry. Wissenschaftlich verfolgt Frau Benning einen multi-disziplinären Ansatz zur Erforschung der Prozesse, die an der Schnittstelle zwischen Mineraloberflächen, wässrigen Lösungen und Mikroben die Erdoberfläche gestalten.



Ebenfalls zum 1. Oktober 2014 übernahm **Prof. Dr. Luis Guanter** die Leitung der GFZ-Sektion „Fernerkundung“. Zum 1. November 2014 trat er eine W<sub>3</sub>-Professur für Fernerkundung am Institut für Erd- und Umweltwissenschaften der Universität Potsdam im Rahmen einer gemeinsamen Berufung mit dem GFZ an. Weiterhin ist er der neue Scientific Principle Investigator des EnMAP-Satellitenprojekts. Herr Guanter promovierte 2007 im Bereich Umweltphysik an der Universität in Valencia, Spanien. Anschließend forschte er zunächst am GFZ in der Sektion „Fernerkundung“ und wechselte anschließend an das Institut für Weltraumwissenschaft-

ten der Freien Universität Berlin. Seit 2012 leitet Luis Guanter die DFG Emmy Noether-Nachwuchsgruppe GlobFluo. Sein wissenschaftliches Interesse gilt dem hyperspektralen fernerkundlichen Monitoring von Land- und Atmosphärenprozessen mit den Schwerpunkten terrestrischer Kohlenstoffkreislauf sowie der Entwicklung von multi- und hyperspektralen Fernerkundungssensoren im Rahmen zukünftiger Erdbeobachtungsmissionen (u. a. EnMAP, Sentinel-2 und FLEX).

Herr Guanter folgt als Sektionsleiter **Prof. Dr. Hermann Kaufmann** nach dessen beendeter und sehr erfolgreicher Dienstzeit. ■

### Inga Moeck gemeinsam mit der TU München berufen



Die Technische Universität München hat gemeinsam mit dem GFZ die Universitätsprofessur „Geothermie“ an der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt zum 1. Juli 2014 besetzt. Den Ruf erhielt **Prof. Dr. Inga Moeck** von der University of Alberta (Edmonton, Kanada), wo sie den Lehrstuhl und die Programmleitung für „Enhanced Geothermal Energy Systems“ innehatte. Sie leitet die am GFZ die neu eingerichtete Arbeitsgruppe „Geothermische Explorationsgeologie“. Bis 2012 war Frau Moeck bereits am GFZ tätig und hat den Bereich Explorationsgeologie am „Internationalen Geothermiezentrum“ mit aufgebaut. Ihr Forschungsinteresse liegt in der Quantifizierung geologischer Kontrollfaktoren in geothermischen Systemen, mit dem Schwerpunkt auf den Themen Dimensionierung und Permeabilitätsstruktur von Störungszonen im rezenten Gebirgsspannungsfeld. Mit der Entwicklung ihres international anerkannten geothermischen Lagerstättentypen-Katalogs ist Frau Moeck seit 2013 Mitglied des Resources & Reserves Committees der Internationalen Geothermischen Gesellschaft. ■

### Zwei neue Juniorprofessuren



**Prof. Dr. Susanne Liebner**, GFZ-Sektion „Geomikrobiologie“, erhielt am 28. Oktober ihre Urkunde als Juniorprofessorin für Molekulare Umweltmikrobiologie.

Sie trat zum 1. November 2014 diese gemeinsame Berufung von GFZ und Universität Potsdam an.

Die Lehre am Institut für Biochemie und Biologie ist in den Masterstudiengängen MOEN (Master Ökologie, Evolution und Naturschutz) sowie Biochemie und Molekularbiologie angelegt. Als akademisches Hybrid der Erd- und Biowissenschaften befasst sich die Forschung von Frau Liebner mit der Wechselwirkung mikrobieller Gemeinschaften mit ihrem Habitat. Sie konzentriert sich dabei auf den mikrobiellen Kohlenstoffkreislauf in klimatisch relevanten Ökosystemen. Im Rahmen ihrer Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppe MicroCene untersucht Frau Liebner seit Januar 2013 systematisch mikrobielle Verbreitungsmuster und Funktionen in tieferen Permafrost- und Moorstandorten.



**Prof. Dr. Dirk Scherler**, GFZ-Sektion „Oberflächennahe Geochemie“ hält seit Anfang Dezember 2014 eine Juniorprofessur für kosmogene Nuklide in einer gemeinsamen Berufung mit der Freien Universität Berlin. Seine Forschung und Lehrtätigkeit im Fachgebiet Geologie umfasst die Entwicklung von Anwendungsmöglichkeiten kosmogener Nuklide zur Quantifizierung von Prozessen der Erdoberfläche. Kosmogene Nuklide helfen, die Entwicklungsgeschichte von Landschaften zu rekonstruieren und Prozessraten zu quantifizieren. Prof. Scherlers wissenschaftliche Interessen liegen auf dem Gebiet der Geomorphologie und der Auswirkungen von aktiver Tektonik und Klimawandel auf die topographische Entwicklung von Gebirgen während des Quartärs. Er schloss 2010 seine Promotion in Geologie an der Uni-

versität Potsdam ab. Es folgten Postdoc-Arbeiten an der Universität Potsdam (2010 bis 2012) und von 2012 bis 2014 Postdoc-Forschungsaktivitäten als Feodor Lynen-Stipendiat der Alexander von Humboldt Stiftung am California Institute of Technology, USA. ■

versität Potsdam ab. Es folgten Postdoc-Arbeiten an der Universität Potsdam (2010 bis 2012) und von 2012 bis 2014 Postdoc-Forschungsaktivitäten als Feodor Lynen-Stipendiat der Alexander von Humboldt Stiftung am California Institute of Technology, USA. ■

### Michael Wiedenbeck erhält Honorarprofessur an der Universität Witwatersrand



**Prof. Dr. Michael Wiedenbeck** hält seit Juli 2014 eine Honorar-Professur an der University of the Witwatersrand in Johannesburg, Südafrika. Wiedenbeck ist seit 1998 Leiter des Sekundärionen-Massenspektrometrielabors (SIMS) am GFZ und arbeitet seit 2010 eng mit Erdwissenschaftlern an mehreren Universitäten in Südafrika zusammen, darunter auch in Johannesburg. Die Berufung von Michael Wiedenbeck dient dazu, eine noch engere Kooperation zwischen den beiden Instituten langfristig zu sichern (vgl. Beitrag „Wissenstransfer nach Südafrika: wissenschaftlicher Nachwuchs bekommt Einblick in die SIMS-Technologie“ in der Rubrik Netzwerk, Seite 62).

Darüber hinaus wurde Prof. Wiedenbeck im August in das „Committee on International Participation“ der American Geophysical Union berufen. ■

Darüber hinaus wurde Prof. Wiedenbeck im August in das „Committee on International Participation“ der American Geophysical Union berufen. ■

### Stefano Parolai neuer ESC-Generalsekretär

Auf ihrer 34. Generalversammlung vom 24. bis 29. August 2014 in Istanbul wählte die Europäische Seismologische Kommission den GFZ-Wissenschaftler **Dr. habil. Stefano Parolai** zu ihrem Generalsekretär. Herr Parolai ist Leiter des Zentrums für Frühwarnsysteme EWS am GFZ. Die Europäische Seismologische Kommission wurde 1951 von der International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI) gegründet und bildet heute die europäisch/nordafrikanische Regionalkommis-

sion der IASPEI. Die Aufgabe der ESC ist die Förderung der Seismologie in Europa und den Mittelmeerstaaten, also dem Gebiet zwischen Mittelatlantischem Rücken und Ural und vom Arktischen Ozean bis nach Nordafrika. Sie unterstützt Forschungsarbeiten, erweitert und verstärkt die wissenschaftliche Zusammenarbeit und bildet junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus. ■

### Ute Weckmann neue stellvertretende Vorsitzende der IAGA WG I.2

Die GFZ-Wissenschaftlerin **Dr. Ute Weckmann** wurde zur stellvertretenden Vorsitzenden der IAGA working group I.2 gewählt. Die Wahl fand während des 22. Electromagnetic Induction Workshops in Weimar statt.

Die IAGA working group I.2, die 1971 gegründet wurde, ist mit ihren 1400 Mitgliedern die größte und aktivste Arbeitsgruppe der International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). Eine ihrer wesentlichen Aufgaben ist die Durchführung der im zweijährigen Turnus stattfindenden internationalen Treffen sowie die Förderung der Elektromagnetikforschung weltweit. Sie unterstützt junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und stärkt die wissenschaftliche Zusammenarbeit auf diesem Forschungsgebiet. Frau Weckmann leitet seit dem Jahr 2013 am GFZ die Arbeitsgruppe „Magnetotellurik“. ■

### Würdigung der Forschung von GFZ-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftlern



Verleihung des Bernd-Rendel-Preises durch Herrn Dr. Guido Lüniger, DFG, an Frau Mandy Freund (Foto: G. Helle, GFZ)

Für ihr wissenschaftliches Potenzial, die herausragende Qualität und Originalität ihrer Forschungsarbeiten zur räumlichen Rekonstruktion des europäischen Klimas, wurde Frau **Mandy Freund** am 23. September 2014 auf der internationalen Konferenz „GeoFrankfurt“ mit dem diesjährigen Bernd-Rendel-Preis für Nachwuchs-Geowissenschaftlerinnen und -Geowissenschaftler der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geehrt. Mithilfe der Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopenverhältnisse von Baumjahresringen hat sie in ihrer Masterarbeit an der Freien Universität Berlin und am GFZ (Sektion „Klimadynamik und Landschaftsentwicklung“) die vergangenen 400 Jahre auf Flut- und Trockenzeiten zwischen Skandinavien und dem Mittelmeer untersucht. Frau Freund konnte durch die räumliche Rekonstruktion von Hochwasser- und Dürrephasen in Europa Rückschlüsse auf die Verteilung und Häufigkeit bestimmter Wetterlagen ziehen. Die Meteorologin steht noch am Anfang ihrer wissenschaftlichen Karriere und hat 2014 eine Promotion an der Universität Melbourne, Australien, begonnen.

Auf dieser Veranstaltung verlieh die Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften (DGG) **Dr. Manfred Menning**, ebenfalls aus der Sektion „Klimadynamik und Landschaftsentwicklung“ des GFZ, die Serge-von-Bubnoff-Medaille für sein herausragendes Gesamtwerk in den Geowissenschaften. Insbesondere wurde Herr Menning für sein außerordentliches Engagement für die Weiterentwicklung der Stratigraphie in Deutschland ausgezeichnet. ■

### Dirk Sachse erhält den Isotopenpreis der Dr. Karleugen-Habfast-Stiftung

**Dr. Dirk Sachse**, GFZ-Sektion „Geomorphologie“, wurde beim diesjährigen ASI-Treffen (Arbeitsgemeinschaft Stabile Isotope) am 17. Oktober 2014 in München der Isotopenpreis der Dr. Karleugen-Habfast-Stiftung verliehen. Herr Sachse erhielt den Preis für Arbeiten zur molekularen Paläohydrologie, die im Rahmen seiner Leitung einer Emmy Noether-Nachwuchsgruppe entstanden. Die Dr. Karleugen-Habfast-

Stiftung fördert junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und unterstützt herausragende junge Forscherinnen und Forscher des Fachgebietes „Anwendung stabiler Isotope“ durch die zweijährige Verleihung des „Isotopen-Preises“. Die Arbeitsgemeinschaft Stabile Isotope (ASI) hat die Trägerschaft für den Isotopenpreis übernommen. ■

### Nachwuchspreis des Bundesverbandes Geothermie an Egbert Jolie verliehen

Der Bundesverband Geothermie verlieh am 12. November 2014 in Essen den diesjährigen „Preis zur Förderung des Wissenschaftlernachwuchses“ an **Dr.-Ing. Egbert Jolie** vom „Internationalen Geothermiezentrum“ des GFZ. Der Bundesverband Geothermie würdigt damit alljährlich im Rahmen seiner Fachtagung eine Nachwuchswissenschaftlerin oder einen Nachwuchswissenschaftler für hervorragende Leistungen auf dem Gebiet der Geothermie in Form einer wissenschaftlichen Arbeit.

Herr Jolie wurde für seine Dissertation „Detection and characterization of permeable fault zones by surface methods in the Basin-and-Range Province, USA“ ausgezeichnet, in der er einen neuen Ansatz in der Erkundung störungskontrollierter geothermischer Systeme entwickelte, bei dem quantitative strukturgeologische Methoden mit Oberflächengasfluss-Messungen kombiniert werden. Die Arbeit von Herrn Jolie trägt zu einer verbesserten und dabei kostengünstigeren Exploration im Rahmen der frühen Erkundungsphase geothermischer Reservoirs bei. ■

### IL-AM Paper Award an Jeoung Seok Yoon

Die Korean Society for Rock Mechanics (KSRM) hat am 6. November 2014 im Rahmen ihres Herbsttreffens auf der Insel Jeju in Korea den „IL-AM Paper Award 2014“ an **Dr.-Ing. Jeoung Seok Yoon** aus der GFZ-Sektion „Erdbebengefährdung und Spannungsfeld“ verliehen. Der KSRM-Vorstand wählt jährlich aus den wissenschaftlichen Artikeln des KSRM-



*Best Paper Award 2014 Korean Society for Rock Mechanics (Foto: J. S. Yoon, GFZ)*

Journals Tunnel and Underground Space die beste des Jahres aus und zeichnet die Autoren mit dem mit 10 Millionen Koreanische Won (das entspricht rund 7100 Euro) dotierten Preis aus. Herr Yoon wurde als Hauptautor des Artikels „Particle Based Discrete Element Modeling of Hydraulic Stimulation of Geothermal Reservoirs, Induced Seismicity and Fault Zone Deformation“, Tunnel and Underground Space, Issue 23, Volume 6, geehrt. Koautoren des Artikels sind **Dr. Amir Hakimhashemi** und **PD Dr. Arno Zang** (beide GFZ-Sektion „Erdbebengefährdung und Spannungsfeld“) sowie **Prof. Dr. Günter Zimmermann** (GFZ-Sektion „Reservoirtechnologien“). ■

### Helmholtz-PostDoc-Förderung für Patricia Martínez-Garzón

Im Rahmen des „Helmholtz-Postdoktoranden-Programms“ konnte **Dr. Patricia Martínez-Garzón** (Sektion „Geomechanik und Rheologie“ des GFZ) sich erfolgreich bewerben und erhält von der Helmholtz-Gemeinschaft für die nächsten drei Jahre eine Individualförderung, mit der sie ihr Forschungsthema selbstständig weiter verfolgen und sich in diesem Forschungsgebiet etablieren kann.

Frau Martínez-Garzón befasst sich am GFZ mit der Analyse induzierter Seismizität. Ihre jüngst erfolgreich abgeschlossene Promotion zum Thema „Seismomechanical Reservoir Response and Stress Field Evolution from Fluid-induced Seismicity“ wurde erst kürzlich vom „Verein der Freunde und Förderer des GFZ“ als jahrgangsbeste Promotion 2014 mit dem Friedrich-Robert Helmert-Preis ausgezeichnet. ■

### Helmholtz International Fellow Award an Günter Blöschl



*Verleihung des „Helmholtz International Fellow Awards“ durch Prof. Reinhard Hüttl, Wissenschaftlicher Vorstand des GFZ (links), an Prof. Günter Blöschl (Mitte) am 16. Oktober 2014 in Potsdam. Rechts: Laudator Prof. Bruno Merz, Leiter der GFZ-Sektion „Hydrologie“ und Gastgeber des Preisträgers (Foto: G. Schwalbe, GFZ)*

Die Helmholtz-Gemeinschaft hat acht herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit dem „Helmholtz International Fellow Award 2014“ ausgezeichnet. Neben einem Preisgeld von jeweils 20 000 Euro erhalten die Fellows eine Einladung zu flexiblen Forschungsaufenthalten an einem oder mehreren Helmholtz-Zentren. Die Auszeichnung würdigt besondere Forschungsleistungen und eröffnet Chancen für neue Kooperationen mit wissenschaftlichen Einrichtungen im Ausland.

Das GFZ nominierte erfolgreich **Prof. Dr. Günter Blöschl**, Vorstand des Instituts für Wasserbau und Ingenieurhydrologie an der Technischen Universität Wien (Österreich). Günter Blöschl wird mehrere Forschungsaufenthalte in der GFZ-Sektion „Hydrologie“ verbringen.

Bei seinem ersten Aufenthalt am GFZ eröffnete Herr Günter Blöschl am 16. Oktober 2014 anlässlich seiner Auszeichnung zum „Helmholtz International Fellow“ die am GFZ neu eingerichtete Vortragsreihe *GFZ Lectures* mit einem Bericht über Veränderungen von Hochwassern im Zeichen des Globalen Wandels. ■

### Humboldt-Forschungspreisträger und Stipendiaten zu Gast am GFZ



**Alexander von Humboldt**  
Stiftung/Foundation

**Prof. Dr. Roel Snieder** von der Colorado School of Mines, USA, ist als Träger des Humboldt-Forschungspreises zu Gast am GFZ. Roel Snieder ist ein visionärer Physiker auf dem Gebiet der Wellenphänomene, mit international anerkannten Beiträgen in Bereichen von Ultraschall und Explorationsseismik bis hin zur Seismologie. Seine wegweisenden Arbeiten zur seismischen Interferometrie bahnten einer neuen Klasse von Methoden den Weg, die den diffusen Teil des seismischen Wellenfelds einer systematischen Analyse erschließen. Roel Snieder ist seit 1. Juli 2014 bis zum 30. Juni 2015 zu Gast in der GFZ-Sektion „Seismologie“ bei Dr. Christoph Sens-Schönfelder und forscht zudem in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin.

**Prof. Dr. Mona Lisa** von der nationalen Quaid-I-Azam Universität in Islamabad (Pakistan) verbrachte im Rahmen ihres Georg Forster-Forschungsstipendiums (HERMES-Programm) der Alexander von Humboldt-Stiftung im September 2014 ihren ersten Forschungsaufenthalt am GFZ in der Sektion „Erdbeben- und Vulkanphysik“. Mona Lisa arbeitet an einem Modell der Erdkruste in Südpakistan und der seismischen Gefährdung der dichtbevölkerten Region, hier befinden sich die Millionenstädte Karatschi und Hyderabad. In jüngster Zeit, am 16. April und 24. September 2013, hat es dort zwei starke Erdbeben mit der Magnitude 7,7 gegeben. Daher ist eine verbesserte und auf dem neuesten Stand befindliche Einschätzung der Erdbebengefährdung von wesentlicher Bedeutung für diesen Teil Pakistans. ■



## System Erde. GFZ-Journal (2014) Jahrgang 4, Heft 2

[systemerde.gfz-potsdam.de](http://systemerde.gfz-potsdam.de)

### Das Entstehen und Auseinanderbrechen von Kontinenten

Mit Geophysik auf den Spuren geodynamischer Prozesse im südlichen Afrika

*Ute Weckmann, Sissy Kütter, Oliver Ritter, Trond Ryberg, Michael Weber* 6-13

### Manteldynamik und das Aufbrechen von Gondwana

*Bernhard Steinberger, René Gaßmüller, Robert Trumbull, Stephan Sobolev, Michael Weber* 14-19

### Die lange Geburt eines Ozeans

Numerische und plattentektonische Modelle beleuchten das Wie und Warum der Südatlantiköffnung

*Sascha Brune, Christian Heine, Stephan Sobolev* 20-25

### Sedimentbecken im südlichen Afrika und ihre fossilen Kohlenwasserstoff-Ressourcen

*Hans-Martin Schulz, Magdalena Scheck-Wenderoth, Judith Sippel, Brian Horsfield* 26-31

### Die Erosion des südafrikanischen Hochplateaus – Folgerungen für Tektonik, Klimageschichte und die Nachhaltigkeit der Bodenbewirtschaftung

*Samuel Niedermann, John Decker, Alexandre Kounov, Maarten de Wit* 32-37

### Landschaftsentwicklung und Klimawandel im südlichen Afrika

*Heinz Wilkes, Oliver Bens, Sabine Chabrilat, Kai Mangelsdorf, Jörg Völkel, Dirk Wagner, Achim Wehrmann* 38-45

### Der Bushveld-Komplex: die größte Intrusion der Erde und wichtigste Quelle für mineralische Rohstoffe der Platinmetalle

*Robert B. Trumbull, Ilya V. Veksler, David L. Reid* 46-49

### Anwendung der Fernerkundung in der Exploration und im Haldenmonitoring im südlichen Afrika

*Christian Mielke, Christian Rogass, Nina Boesche, Hermann Kaufmann, Luis Guanter* 50-57

### Magnetfeldbeobachtung im südlichen Afrika: regionale Daten zum Verständnis globaler Änderungen

*Monika Korte* 58-61

