

System Erde

GFZ-Journal

25
Deutsches
GeoForschungsZentrum GFZ

2016 – Heft 2

SCHWERPUNKT

Südamerika Ein dynamischer Kontinent



Editorial

Südamerika – Ein dynamischer Kontinent



Diese Ausgabe des GFZ-Journals „System Erde“ wurde im Dezember 2016 produziert und erscheint im Januar 2017. Das ist der Monat, in dem das Deutsche GeoForschungs-Zentrum seinen 25. Geburtstag feiert. Der Schwerpunkt Südamerika ist dabei durchaus passend, denn die Forscherinnen und Forscher des GFZ arbeiten dort seit der Gründung des Zentrums. Die Südpazifikküste mit den großen Subduktionsbeben, die Anden mit ihren Vulkanen und all die geologischen Prozesse, die in der Region sichtbar werden, sind wie die Seiten eines Lehrbuchs der Geologie – wenn man sie denn zu entziffern weiß. Selbst die so genannten passiven Kontinentalränder an den Küsten des Südatlantiks bieten uns tiefe Einblicke in die Erdgeschichte; sie sind Geoarchive erster Ordnung. Hinzu kommt, dass sie Lagerstätten für Rohstoffe bergen.

Mit diesen wenigen Sätzen ist der Bogen gespannt, der die Arbeit des GFZ umfasst: Wir erforschen Georisiken und Ressourcen, wir blicken weit in die Vergangenheit des Planeten zurück, um gegenwärtig ablaufende Prozesse besser zu verstehen und für die Zukunft vorzusorgen, wir nutzen dazu modernste Methoden und Geräte, die wir zum Teil selbst entwickeln.

Dabei bauen wir auf einer Geschichte auf, die weit länger als 25 Jahre zurückreicht. In diesem Jahr jährt sich die Einweihung des Königlichen Geodätischen Instituts auf dem Telegrafenberg zum 125. Mal. Was früher mit Messketten und Theodoliten mühsam kartiert wurde, wo komplizierte Pendelapparate und zentnerschwere Seismographen zum Einsatz kamen, das erfassen wir heute mit Satelliten und Sensoren; vielfach automatisiert. Zur Auswertung nutzen wir mathematische Verfahren ebenso wie Modellierungen.

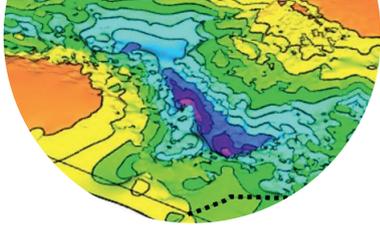
Eines aber hat sich nicht geändert seit den Anfängen der wissenschaftlichen Erdvermessung im 19. Jahrhundert: Immer noch müssen Menschen in die entlegensten Gebiete der Welt reisen, um vor Ort zu messen, Geräte zu installieren und Proben zu entnehmen. Selbst wenn wir millimetergenau Bewegungen der Erdkruste aus dem All vermessen können oder dem Knistern und Knacken beim Verschlucken von Erdplatten zuhören, so bedarf es immer noch der persönlichen Anschauung vor Ort, um die Prozesse zu verstehen.

Dabei ist, auch das eine Konstante über die Jahrhunderte hinweg, Teamwork gefragt. Das gilt für Expeditionen genauso wie für die Arbeit im Labor: Am GFZ vereinen wir Forscherinnen und Forscher aus der Chemie, der Physik, der Mathematik, Informatik und Biologie mit all den Zweigen der Geowissenschaften. Hinzu kommen das technische Personal und die Administration. Denn Gerätschaften müssen gebaut und gewartet, Reisen organisiert werden. Ihnen allen sei an dieser Stelle sehr herzlich für die Arbeit gedankt.

Der Dank geht natürlich auch an die Autorinnen und Autoren der Texte in dieser Ausgabe. Lassen Sie sich auf eine Reise in die Erdgeschichte mitnehmen, vom Auseinanderbrechen Afrikas und Amerikas über die Absenkung des Kontinentalrands bis zur heute noch andauernden Hebung der Anden.

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

Dr. Stefan Schwartze
Administrativer Vorstand



Inhalt

4

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

Sascha Brune, Simon E. Williams, R. Dietmar Müller, Stephan Sobolev

10

Rekonstruktion der Absenkungsgeschichte des Argentinischen Kontinentalrands

Ingo Dressel, Magdalena Scheck-Wenderoth, Judith Sippel

16

Das Rätsel der Anden-Orogenese: Ist der Erdmantel für den Start der Gebirgsbildung verantwortlich?

Onno Oncken

22

Das Knacken, Knistern und Knirschen beim Verschlucken einer kalten Platte Das IPOC-Observatorium überwacht seit zehn Jahren die Subduktionszone in Nordchile

Bernd Schurr, Heidrun Kopp, Günter Asch, Frederik Tilmann, Onno Oncken

30

Unterschätzte Unbekannte – Aktive Störungen in der Oberplatte großer Subduktionssysteme

Pia Victor, Matthias Kemter, Oktawian Ewiak, Thomas Ziegenhagen, Onno Oncken, Gabriel Gonzalez

36

Satellitengeodäsie und Erdbeben-deformation in der nordchilenischen seismischen Lücke

Marcos Moreno, Sabrina Metzger, Jonathan Bedford, Felix Hoffmann, Shaoyang Li, Zhiguo Deng, Jürgen Klotz, Onno Oncken

42 **Interview**

48 **Netzwerk**

63 **Ausgezeichnet**

Impressum

Herausgeber:

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

Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Redaktion:

Dr. Dietlinde Friedrich (Koordination)
Dr. Oliver Bens
Josef Zens (V.i.S.d.P.)

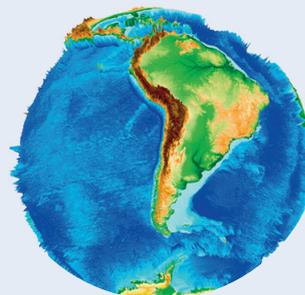
Layout:

Pia Klinghammer

Druck:

ARNOLD group – Großbeeren

Potsdam, Dezember 2016
ISSN 2191-8589



Titelbild

Topographie von Südamerika
in 100-facher Überhöhung

*EarthByte/Scripps Institution
of Oceanography;
3D-Visualisierung: Cesium*

Alle Abbildungen GFZ, soweit nicht anders gekennzeichnet



Alle Artikel auch im Internet verfügbar:
systemerde.gfz-potsdam.de

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

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

¹ Deutsches Geoforschungszentrum GFZ, Potsdam

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

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



Plattentektonische Geschwindigkeiten

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

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

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

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

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

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



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



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

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

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

Abrupte Plattenbeschleunigung

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

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

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

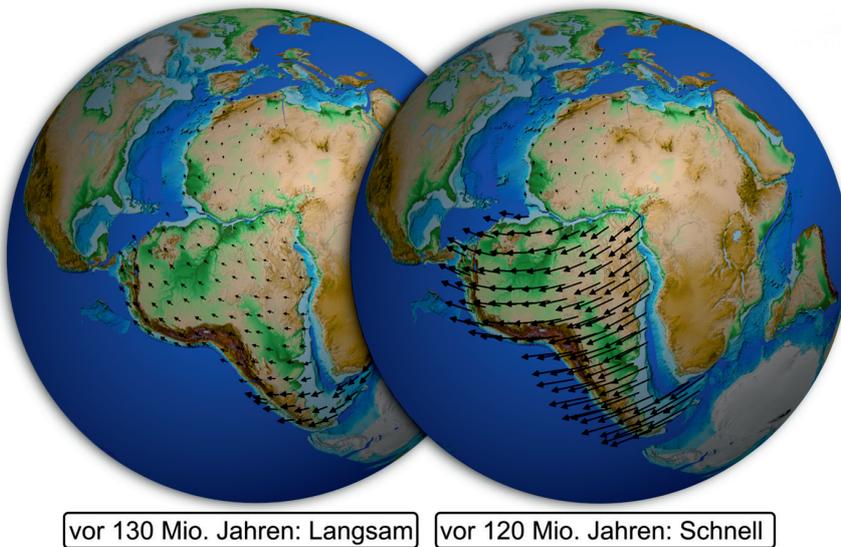


Abb. 2: Beschleunigung Südamerikas während der Trennung von Afrika. In wenigen Millionen Jahren steigt die Geschwindigkeit des Kontinents von 7 auf 40 mm pro Jahr. (Abb.: S. Brune, GFZ/CC BY-ND)

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

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

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

Wie ein zerreißendes Seil

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

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

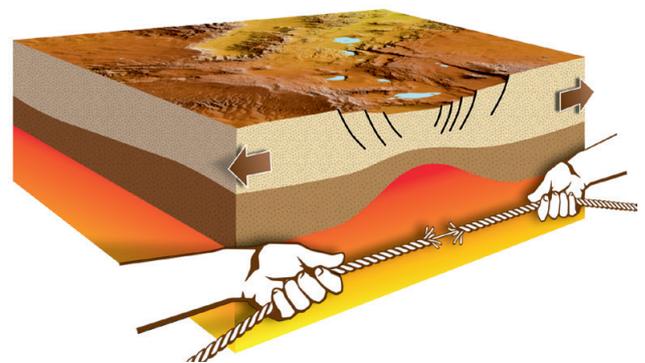


Abb. 3: Die Geschwindigkeit von Erdplatten steigt rapide, wenn Kontinente sich teilen. Der Grund ist, dass die Platten-geschwindigkeit von der Stärke der Riftzone abhängt. Diese nimmt während der Dehnung abrupt ab, während sich die Geschwindigkeit erhöht – wie bei einem zerreißenden Seil. (Abb: S. Brune,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

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

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

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

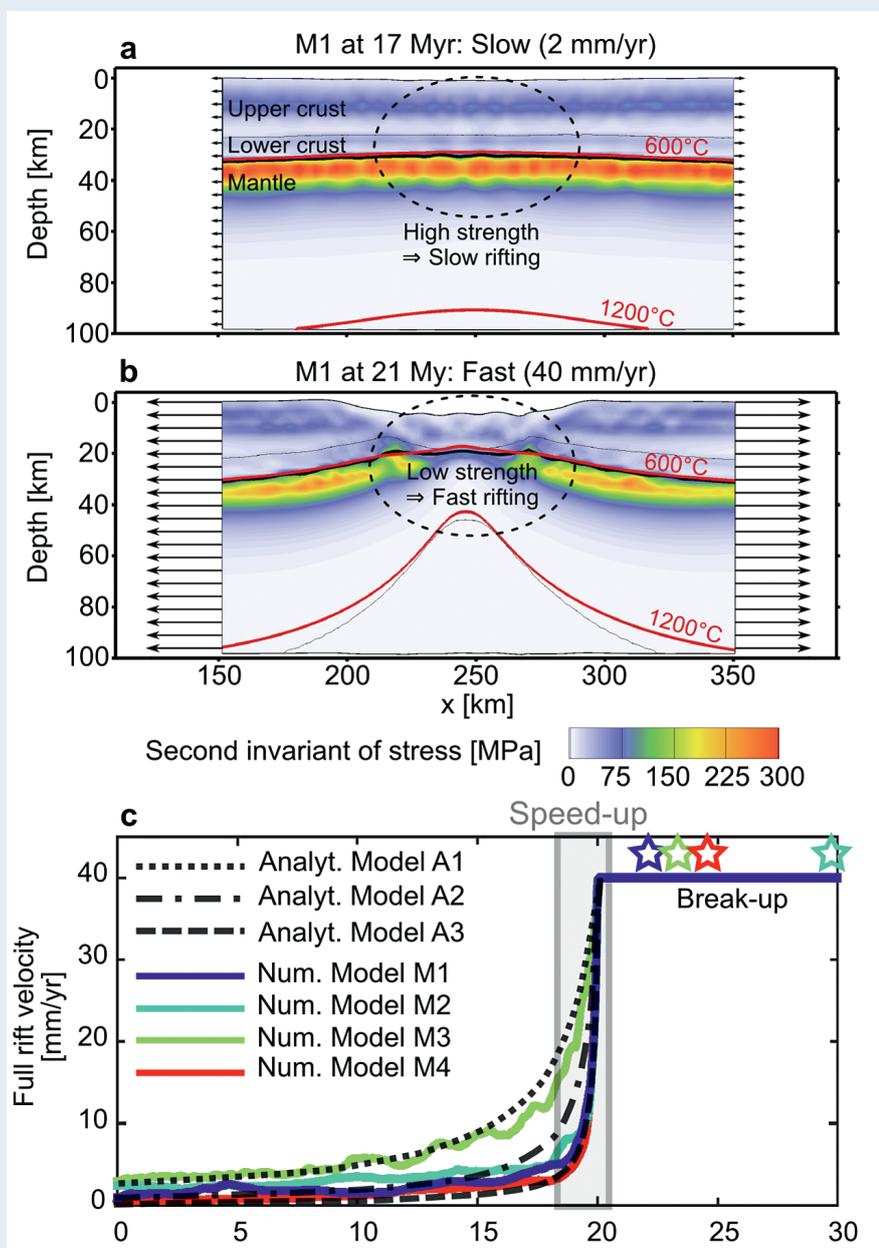


Abb. 4: Numerisches und analytisches Modell der Riftentwicklung bei konstanter Kraft (Brune et al. 2016). (a, b) Die Dehnungsgeschwindigkeit wird durch die zeitabhängige Stärke des Rifts bestimmt, hier als Spannung dargestellt. Wenn das Rift geschwächt wird, steigt die Riftgeschwindigkeit. (c) Unter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

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

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

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

Ausblick

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

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

Literatur

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

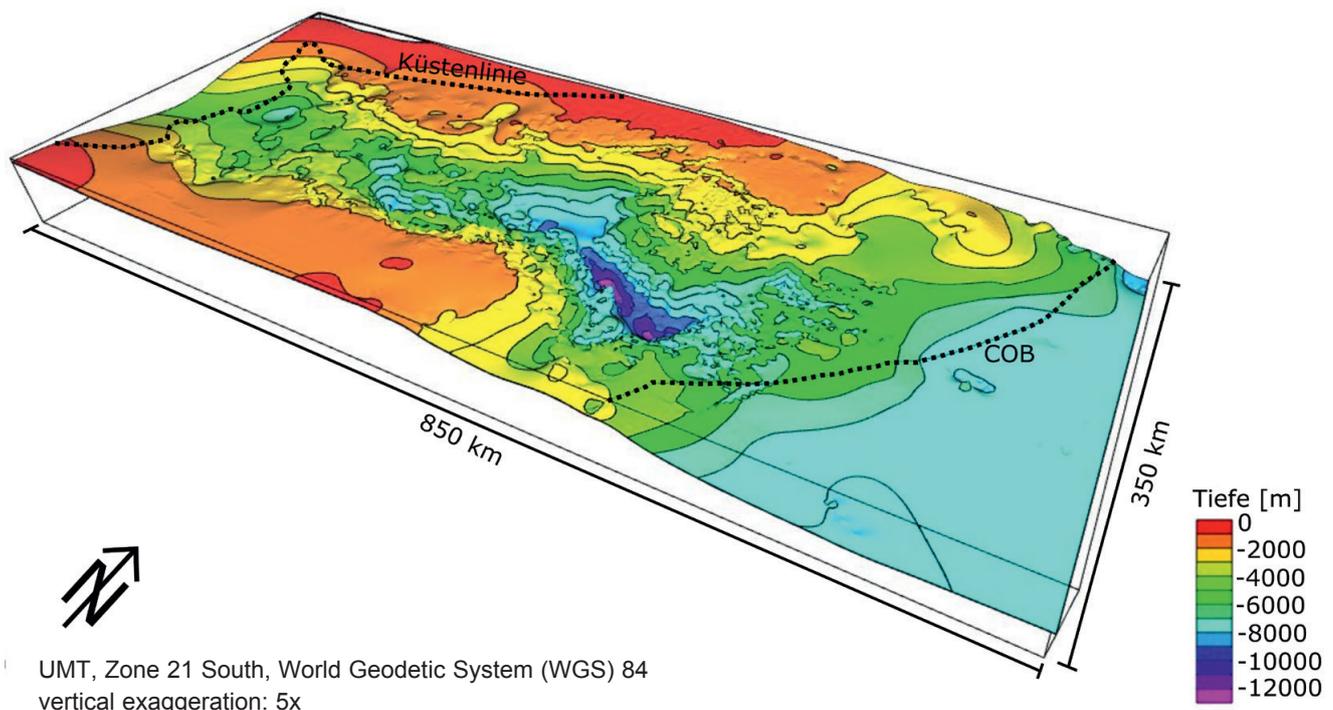
Rekonstruktion der Absenkungsgeschichte des Argentinischen Kontinentalrands

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

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

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

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



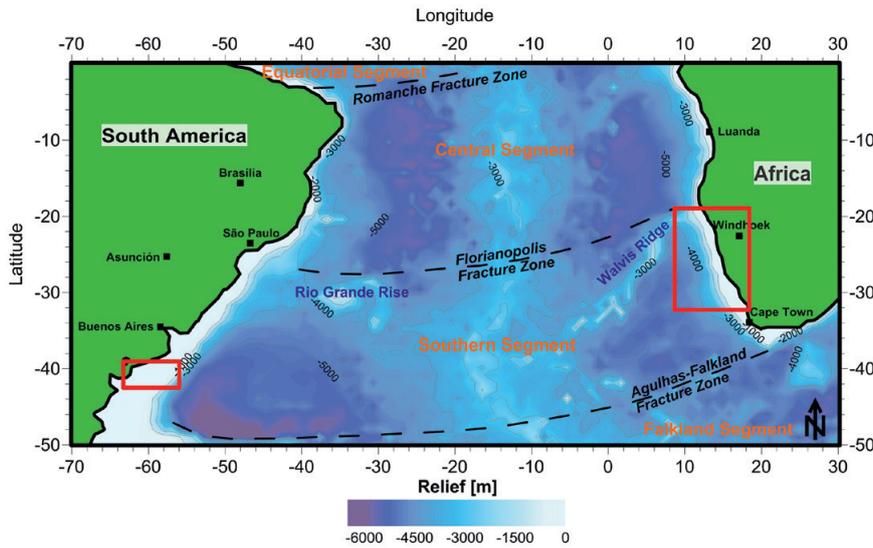


Abb. 1: Lage des Coloradobeckens am passiven Kontinentalrand vor der Küste Argentiniens im südlichen Segment des Südatlantiks (kleines rotes Rechteck, entspricht Ausschnitt in Abb. links). Die für das Coloradobecken rekonstruierte Absenkungsgeschichte wird ebenfalls mit analogen Ergebnissen vom dazu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

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

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

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

Ausgangsbasis

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

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

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

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



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

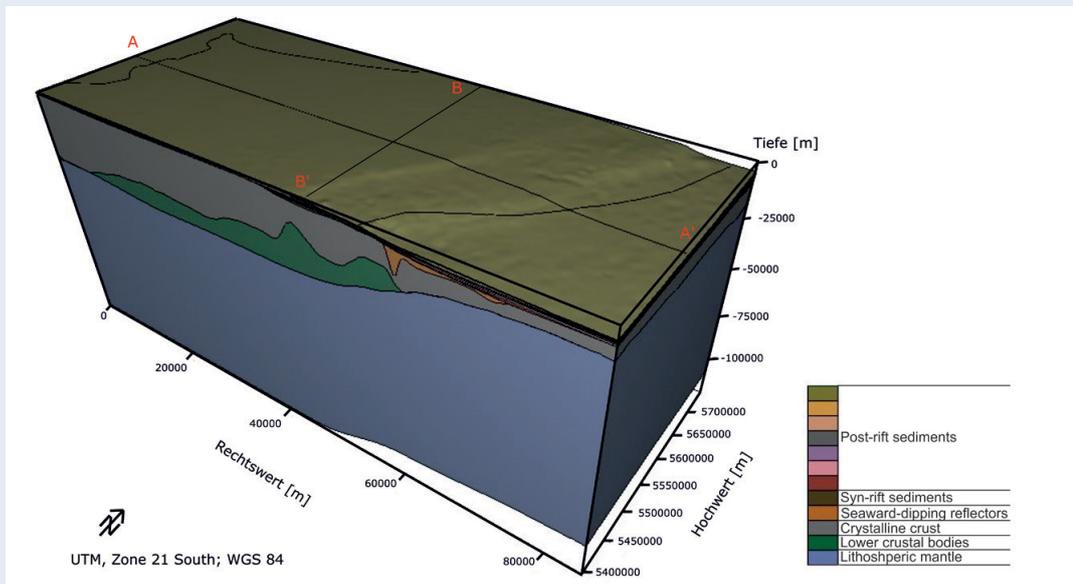


Abb. 2: 3D-Strukturmodell des Coloradobeckens (nach Autin et al., 2013, 2016; siehe rotes Rechteck in Abb. 1 für die Lage des Coloradobeckens). Stratigraphisch werden sieben Postrift-Einheiten und eine Synrift-Einheit unterschieden. Darüber hinaus liefert dieses Modell Informationen über Heterogenitäten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

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

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

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

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

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

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

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

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

Methodischer Ansatz zur Rekonstruktion der Absenkungsgeschichte

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

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

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

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

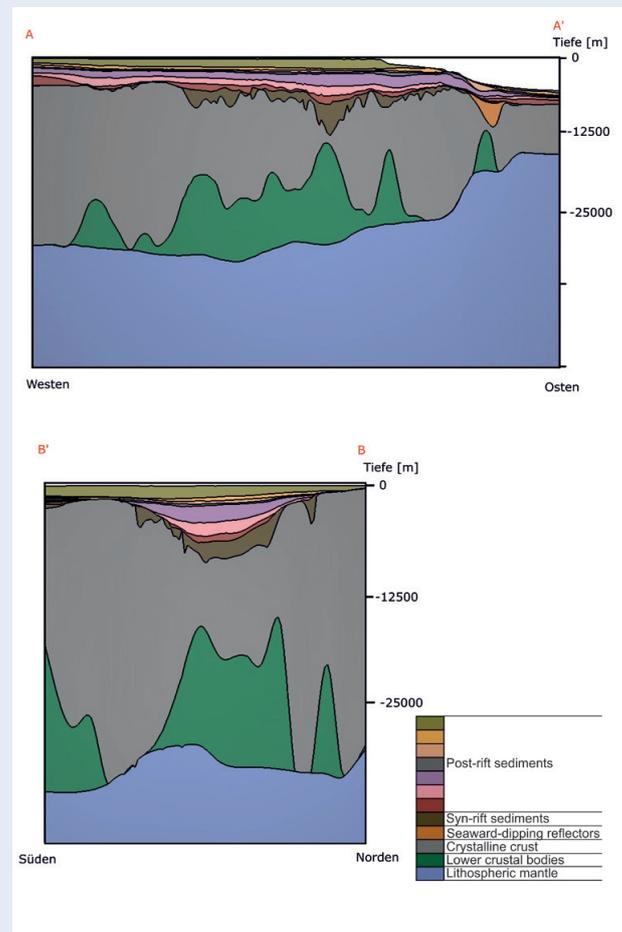


Abb. 3: 2D-Profil für das Coloradobecken (nach *Autin et al., 2013, 2016*). A) Ost-West verlaufendes Profil; B) Nord-Süd verlaufendes Profil. Abbildung 2 zeigt die Lage der Profile im Untersuchungsgebiet.

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

Erkenntnisse

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

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

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

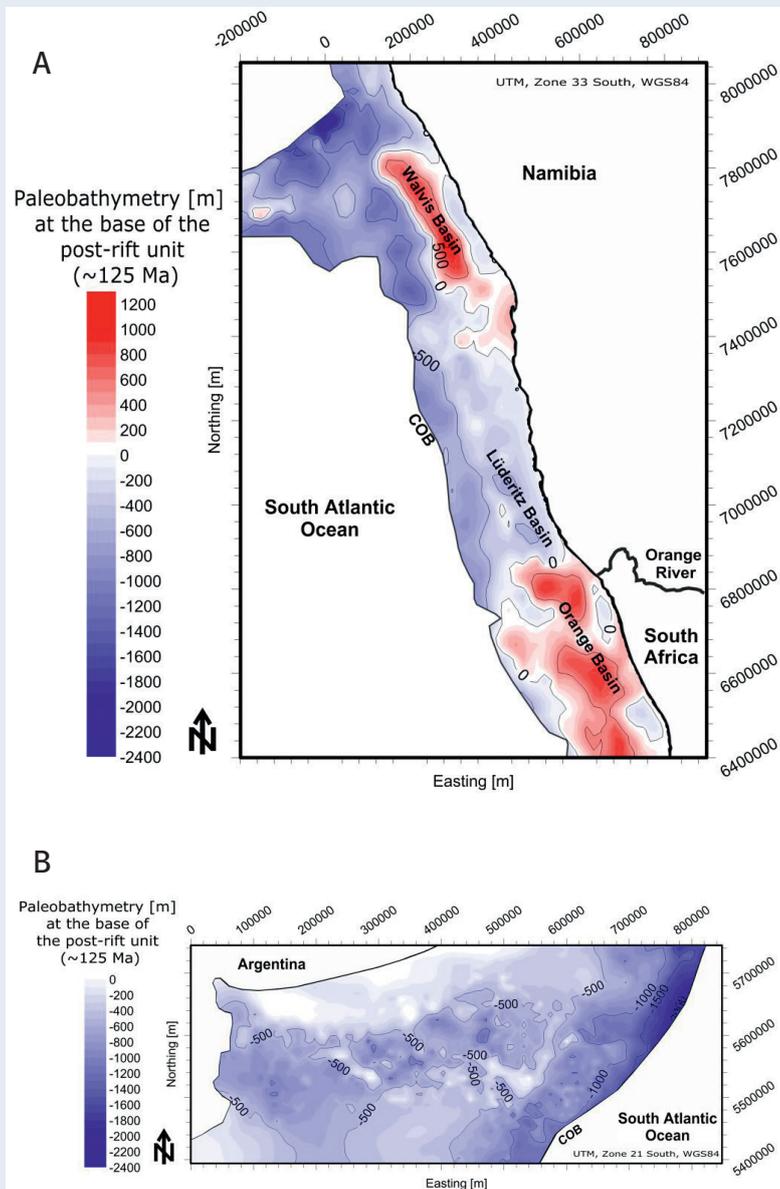


Abb. 4: Vergleich der Paläowassertiefen zu Beginn der Postriftphase (125 Ma): A) am Kontinentalrand vor Südafrika und Namibia (nach Dressel et al., 2015), B) am Kontinentalrand vor Argentinien (nach Dressel et al., 2016). Die Paläowassertiefen vor Argentinien deuten auf einen Ablagerungsraum zwischen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

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

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

Ausblick

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

Literatur

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

Das Rätsel der Anden-Orogenese: Ist der Erdmantel für den Start der Gebirgsbildung verantwortlich?

Onno Oncken

Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam

To this date, the question of why and how a plateau-type orogen formed with massive crustal thickening at the leading edge of western South America remains one of the hotly debated issues in geodynamics. During the Cenozoic, the Altiplano and Puna plateau of the Central Andes developed during continuous subduction of the oceanic Nazca plate in a convergent continental margin setting – a situation that is unique along the 60 000 km of convergent margins around the globe. The key challenge is to understand why a first-order mechanical instability of the later plateau extent developed along the central portion of the leading edge of South America only, as well as why and how this feature developed only during the Cenozoic, although the cycle of Andean subduction had been ongoing since at least the Jurassic. Although the widespread presence of partial melts or metamorphic fluids at mid-crustal level has been suggested to indicate upper plate weakening from heating and partial melting, it is recently found that upper plate strain weakening at lithospheric scale plays a significantly larger role. This first order control is tuned by factors affecting the strength balance between the upper plate lithosphere and the plate interface of the Nazca and South American plates such as variations in trenchward sediment flux affecting plate interface coupling and slab rollback or the role of inherited structures. Late initiation of orogeny in the Eocene, however, and its sustained action over tens of million years is now found to be related to the penetration of the slab into the lower mantle around 50 Ma ago, producing a slowdown of the lateral slab migration (slab anchoring), and dragging the upper plate against the subduction zone by large-scale return flow. The combination of these parameters was highly uncommon during the Phanerozoic leading to very few plateau style orogens at convergent margins like the Cenozoic Central Andes in South America or the Laramide North American Cordillera.



Seit seiner Gründung war das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ in der Erforschung der Anden engagiert, zunächst über den von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG getragenen Sonderforschungsbereich „Deformationsprozesse in den Anden“ gemeinsam mit der Freien Universität Berlin, der Technischen Universität Berlin und der Universität Potsdam, später, bis in die Gegenwart, über eine Vielzahl von z. T. noch laufenden Verbundprojekten. Der Grund liegt auf der Hand: Für die Erforschung von Subduktionsprozessen und ihren Folgen bezüglich der Deformation ist der südamerikanische Plattenrand mit den Anden geradezu prädestiniert. Wie in einem natürlichen Labor ist der Plattenrand hier zugänglich. Mit 7500 km Länge beherbergt er mit den Anden das längste durch aktive Subduktionsvorgänge gebildete Gebirge. Als einzige subduktionsgesteuerte Kordillere quert es eine Vielzahl von Zonen, an denen sowohl klimagesteuerte Randbedingungen als auch die Geometrie der Subduktionszone und die Subduktionsgeschwindigkeit systematisch über einen großen Bereich variieren. Trotz einer gemeinsamen Entwicklungsgeschichte zeichnen sich die verschiedenen Segmente der andinen Gebirgskette durch extreme Gegensätze in Bezug auf ihre Breite, Höhe und Klimabedingungen aus. Dies wird besonders bei einer Gegenüberstellung der ausladenden zentralen Anden – etwa 4 bis 6 km hoch und 800 km breit – und der sehr schmalen Patagonischen Anden – etwa 1 bis 3 km hoch und 300 km breit – deutlich (Abb. 1). Damit sind die Anden als Hochgebirge an einer Subduktionszone weltweit einzigartig – sie sind ein Paradoxon der Plattentektonik.

Obwohl die Subduktion mindestens seit dem Paläozoikum andauert und obwohl die Nazca-Platte seit längerem mit hohen Geschwindigkeiten unter Südamerika – heute mit 65 bis 70 mm pro Jahr – subduziert wird, ist das Andengebirge in seiner heutigen Form erst in den letzten rund 50 Mio. Jahren

Links: Das Foto entstand während einer Expedition des GFZ zu GPS-Messungen im Rahmen des SAGA-Projekts. Die Messungen dienen zur Beobachtung der Deformationen seit dem Antofagasta-Erdbeben 1995 (M_w 8,0). Die GPS-Station liegt rund 60 km südöstlich von Antofagasta in der Atacamawüste, 887 m über NN, etwa 5 km von der nächsten Straße entfernt. (Foto: F. Alberg, GFZ)

Left: The picture was taken during a GFZ expedition for GPS measurements of the SAGA project in Chile. They help to monitor the deformations since the Antofagasta earthquake in 1995 (M_w 8.0). The GPS-station is located ca. 60 km south-east of Antofagasta in the Atacama desert, 887 m above sea level, more than 5 km from the next road.

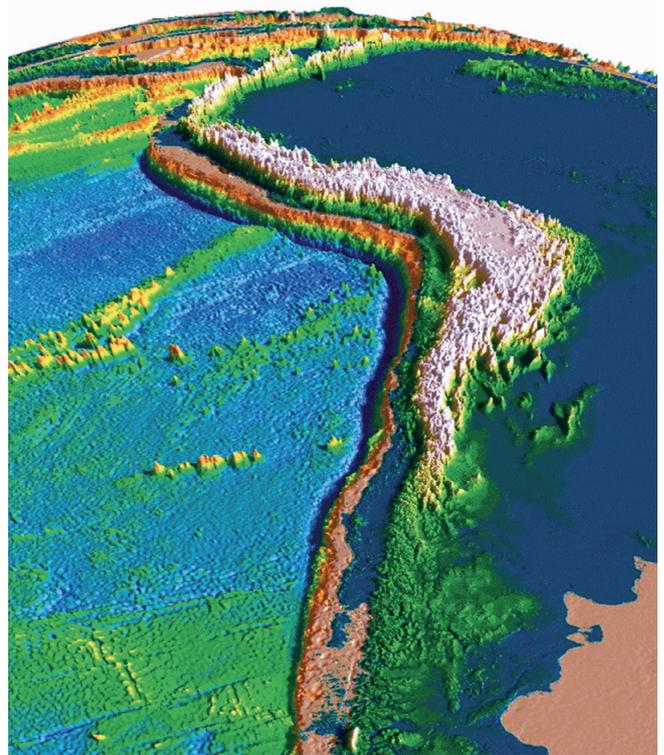


Abb. 1: Die Topographie des südamerikanischen Plattenrands zeigt deutlich den Tiefseeegraben vor der Küste, an dem die Nazca-Platte in den Erdmantel abtaucht und die hohen, ausladenden zentralen Anden im Kontrast zu den schmalen und niedrigen Südanden. (Abb.: GFZ)

Fig. 1: The topography of the South American plate boundary clearly shows the deep sea trench where the Nazca plate is subducted into the mantle as well as the contrast between the wide Central Andes and the narrow and much lower southern Andes.

entstanden (Oncken et al., 2006). In den zentralen Anden hat sich östlich der Vulkankette seit dem Erdzeitalter des Eozäns (vor rund 55 bis 38 Mio. Jahren) erst langsam und seit dem Miozän (vor rund 23 bis 5 Mio. Jahren) deutlich beschleunigt ein 3,8 bis 4,5 km hohes Hochplateau (Altiplano-Puna) herausgehoben, das nach dem Tibetplateau zweitgrößte Hochplateau der Erde mit einer Krustendicke von über 70 km. Gesteuert wurde diese Entwicklung durch eine Verkürzung der kontinentalen Erdkruste hinter dem Vulkanbogen um bis zu 300 km, ein Bereich, der in den meisten anderen Subduktionszonen nicht von stärkerer Deformation betroffen ist.

Im Süden, in den Patagonischen Anden, die selbst nur noch eine mittlere Höhe von 1 bis 2 km erreichen, fehlt ein solches Plateau. In den Zentralanden hat sich der Vulkanbogen in den letzten 200 Mio. Jahren um rund 200 km nach Osten verlagert. Er befindet sich heute auf dem Westrand des Hochplateaus. Im Gegensatz hierzu ist der magmatische Bogen im Süden weitgehend ortsfest geblieben und befindet sich in der heutigen Hauptkordillere. Insgesamt erfolgte aber auch hier die Entwicklung zu einer Kordillere erst seit dem Miozän, etwas später



Kontakt: O. Oncken
(onno.oncken@gfz-potsdam.de)

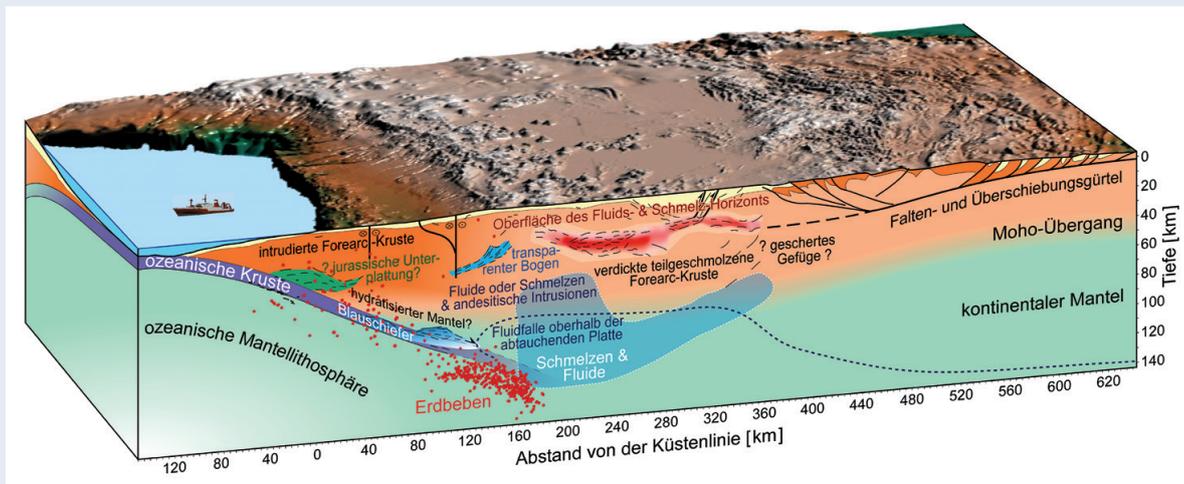


Abb. 2: Zusammengesetzte Sektion aus den seismischen Daten des ANCORP-Experiments (Oncken et al., 2003) mit einem der ersten hochauflösenden Schnitte durch einen konvergenten Plattenrand und eine subduktionsbezogene Kordillere in den zentralen Anden Nordchiles und Boliviens. Auffällig sind der Reflektor, der die abtauchende Nazca-Platte bis in rund 80 km Tiefe zeigt und die Gruppe von Reflexionsbündeln, die in der mittleren Kruste des Plateaus (etwa 20 bis 35 km Tiefe) angeordnet sind. Das Blockbild fasst alle geophysikalischen Untersuchungsergebnisse in interpretierter Form zusammen und unterstreicht damit die herausragende Rolle von Fluiden und Schmelzen im Bereich des zentralandinen Plateaus. (Grafik: M. Dziggel, GFZ)

Fig. 2: Composite section of seismic data from the ANCORP experiment (Oncken et al., 2003) with one of the first high-resolution sections across a complete convergent plate boundary and a subduction-related cordillera in the Central Andes. Note the reflections that image the dipping Nazca plate to more than 80 km depth and the melt-related reflection bands in the middle crust beneath the plateau (20 to 35 km depth). The 3D view summarizes all geophysical observations and their interpretation and underlines the dominant role of fluids and melts in the central domain.

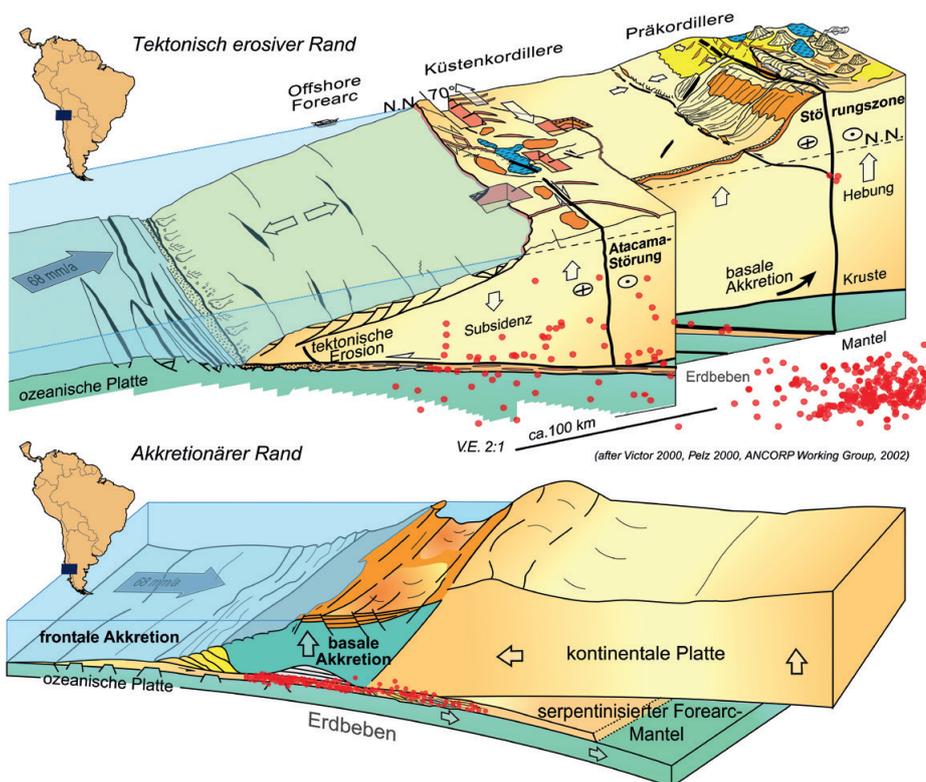


Abb. 4: 3D-Blockbilder des südamerikanischen Plattenrands von Nordchile (oben) und Südchile (unten) zeigen unterschiedliche Strukturen an der Kontinentspitze mit Subduktionserosion von der Plattenbasis im Norden und der Bildung eines Akkretionskeils und Unterplattung im Süden, gesteuert von der Dicke der im Tiefseegraben liegenden Sedimente. (Grafik: M. Dziggel, GFZ)

Fig. 4: 3D view of South American plate boundary of Northern Chile (top) and Southern Chile (bottom) shows contrasting deformation styles of the leading plate edge with subduction erosion in the north and evolution of an accretionary wedge in the South, which is closely linked to the presence of thick trench fill deposits.

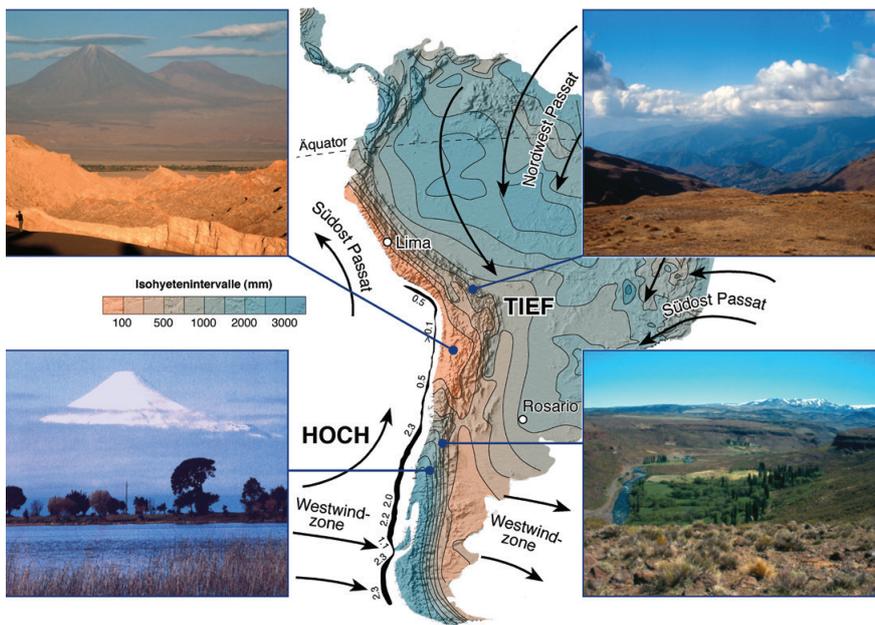


Abb. 3: Die atmosphärische Zirkulation über Südamerika und die Verteilung der Niederschläge (braun: niedrige Niederschlagsraten; blau: hohe Niederschläge). Die Bilder zeigen jeweils die stark kontrastierenden Verhältnisse an der Andenwestflanke mit dem Vulkanbogen und die Andenostflanke. Die Sedimentdicke im Tiefseegraben im Pazifik vor der Küste (gezeigt in km Sedimentdicke) korreliert direkt mit der Niederschlagsverteilung. (Fotos: O. Oncken, GFZ; Grafik: M. Dziggel, GFZ)

Fig. 3: Atmospheric circulation across South America and the distribution of precipitation (blue: high rates, brown: low rates). The images illustrate the stark contrasts between the west flank of the Andes and their eastern flank as well as the dramatic change across latitudes. The sediment thickness in the deep sea trench clearly correlates with the precipitation-controlled erosion.

als in den zentralen Anden. Die Andersartigkeit im Aufbau der Anden in den verschiedenen geographischen Breiten, die unterschiedliche Reaktion der kontinentalen Erdkruste auf die laufende Subduktion ozeanischer Kruste und die verschiedenen damit zusammenhängenden Phänomene enthalten den Schlüssel für das Verständnis von konvergenten Plattenrändern.

Die klassische Erklärung für diese Beobachtungen ist die Annahme, dass die stark verdickte Kruste unter den zentralen Anden nur von einer dünnen Mantellithosphäre unterlagert und daher sehr heiß, somit mechanisch schwach und leicht verformbar ist. Diese Vorstellungen lassen sich am besten mit geophysikalischen Verfahren überprüfen (Abb. 2), die ein Abbild vom Aufbau des tieferen Untergrunds liefern (Oncken et al., 2003, 2012; Schurr et al., 2006). Allerdings sind geophysikalische Beobachtungen dieser Art zunächst nichts anderes als Schnappschüsse des gegenwärtigen Zustands, die keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Vergangenheit liefern. Die Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der Deformation der Anden und die Kopplung dieser Information mit der zeitlichen Entwicklung anderer Größen – wie der Plattengeschwindigkeit, der Änderungen im Vulkanismus usw., zeigen etwa, dass die thermische Entwicklung zwar relevant ist, aber nicht die Hauptrolle spielt. Dasselbe gilt für die häufig als Auslöser für Deformation vermutete Plattenkonvergenzgeschwindigkeit: Die geologischen Daten über die Entwicklung der Geschwindigkeit, mit der der südamerikanische Rand zusammengestaucht wird, belegen, dass sich das Wachstum der Anden ständig beschleunigt hat, obwohl die Konvergenzgeschwindigkeit zwischen beiden Platten immer langsamer wurde. Sehr viel wichtiger für das Deformieren scheint dagegen die Schwächung der Kruste als Folge zunehmender Deformation und die Geschwindigkeit, mit der sich Südamerika nach Westen bewegt, zu sein (Oncken et al., 2006, 2012; Sobolev et al., 2006).

Obwohl in den Patagonischen Anden voraussichtlich dieselben Prozesse an und in der Subduktionszone stattfinden wie in den zentralen Anden, verhält sich dieser südliche Bereich völlig anders. Das trockene Klima in den zentralen Anden führt nämlich dazu, dass die Tiefseerinne vor diesem Abschnitt der Anden nahezu sedimentfrei ist (Abb. 3). Im Bereich des westlichen Altiplano und in der von seinem Rand bis zur Küste reichenden Atacamawüste (Niederschläge < 50 mm/Jahr) wird spätestens seit dem mittleren Tertiär kaum noch Material durch Niederschläge erodiert und in die Tiefsee transportiert. An der Westflanke der Südanden dagegen, bei Niederschlägen von > 3000 mm/Jahr, wird sehr viel Material erodiert und in den Tiefseegraben verfrachtet. Dieses wird direkt im Anschluss an die Ablagerung von der vorrückenden Südamerikanischen Platte gewissermaßen abgeschert und zum Aufbau eines akkretionären Keils verwendet (Abb. 4). Dieser Vorgang der Materialanlagerung durch Abschürfen der ozeanischen Sedimente ist nur dort möglich, wo genügend Sedimentmaterial bereit steht. Ganz anders stellt sich das Muster auf der landwärtigen Seite der Anden dar. Subtropischen Niederschlägen mit erheblicher Erosion in den Nordanden steht im zentralen Bereich und im Süden eine semiaride Ostseite mit nur sehr begrenzter Erosion gegenüber. Am stärksten ist die Herausbildung des Plateaus im ariden Breitenbereich zwischen etwa 16° und 28° südlicher Breite, dem Passatwindgürtel der Südhemisphäre.

Diese Zusammenhänge verweisen auf einen Mechanismus, der in den letzten Jahren zunehmend in die Diskussion gerät. Es ist lange bekannt, dass Niederschläge, ihre räumliche und zeitliche Verteilung die erosive Zerstörung von Gebirgen vorantreiben. Gleichzeitig erzeugt jedoch die Bildung einer topographischen Barriere ein Hindernis, das erheblich auf die atmosphärische Zirkulation rückwirkt und damit auch Niederschlag bindet und einen Regenschatten erzeugt. Zusätzlich zeigen

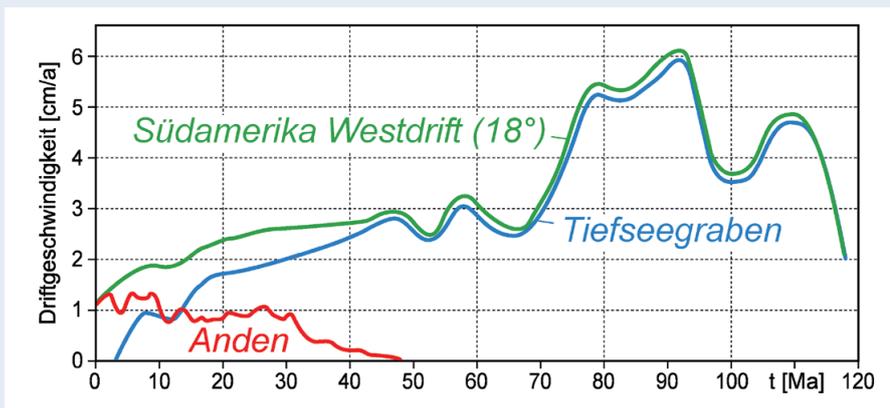


Abb. 5: Westdrift-Komponente der Bewegung Südamerikas und des Tiefseegrabens auf der Nazca-Platte, sowie die Zeiten von Deformation. Die rote Kurve zeigt die Entwicklung der Verkürzungsgeschwindigkeit in den zentralen Anden. (Grafik: M. Dziggel, GFZ)

Fig. 5: Westdrift rate of South American plate and of trench retreat. Red line shows evolution of shortening rate at Central Andes latitude.

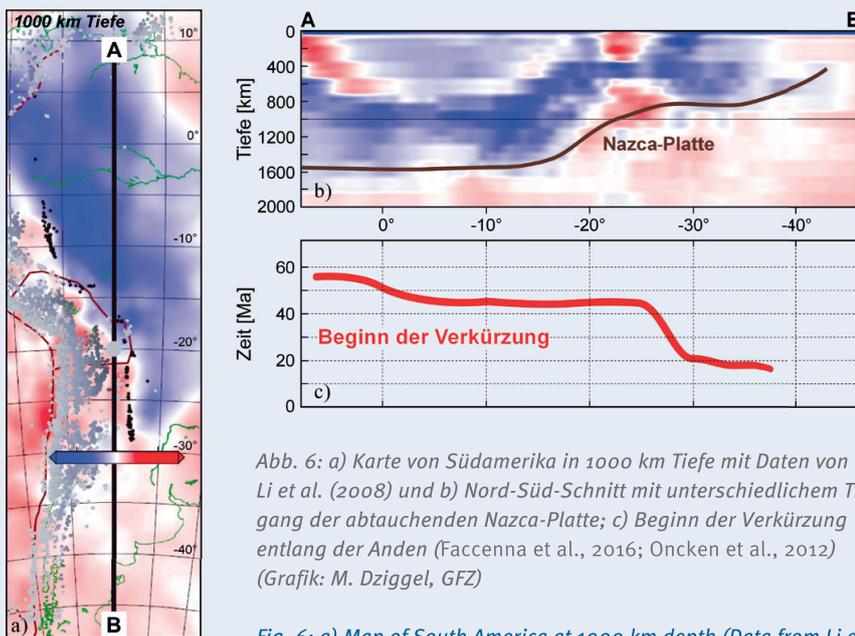


Abb. 6: a) Karte von Südamerika in 1000 km Tiefe mit Daten von Li et al. (2008) und b) Nord-Süd-Schnitt mit unterschiedlichem Tiefgang der abtauchenden Nazca-Platte; c) Beginn der Verkürzung entlang der Anden (Faccenna et al., 2016; Oncken et al., 2012) (Grafik: M. Dziggel, GFZ)

Fig. 6: a) Map of South America at 1000 km depth (Data from Li et al., 2008) and b) North-South section showing depth extent of Nazca slab; c) of the onset of shortening along the Andes (Faccenna et al., 2016; Oncken et al., 2012)

theoretische Betrachtungen (Willett et al., 1993; Vietor et al., 2005), dass aktive Gebirge dazu neigen, einem stationären Gleichgewicht zuzustreben. Dabei werden die klimagesteuerte Erosion und der Massenverlust an der Oberfläche wieder ausgeglichen durch Deformation der Erdkruste, durch die wieder neues Material tektonisch nach oben befördert wird. Damit wird nicht nur der erosiven Zerstörung entgegengewirkt, sondern ein rückgekoppelter Regelkreis zwischen Topographieentwicklung, atmosphärischer Zirkulation und Niederschlagsverteilung, klimagesteuerter Erosion sowie tektonischer Deformation hergestellt. Dies erklärt, warum Deformation und Erosion an der Oberfläche stets zusammenzuhängen scheinen.

Ein solches Gebirge funktioniert etwa wie ein laufendes Förderband, solange die äußeren Bedingungen gleich gehalten werden. Das recht junge Alter des Akkretionskeils vor den Patagonischen Anden weist darauf hin, dass dies nicht immer

der Fall war. Die großen Sedimentmengen, die gegenwärtig zum Aufbau des Akkretionskeils vor Südchile dienen, werden erst seit Beginn der Vergletscherung der Patagonischen Anden vor etwa 6 Mio. Jahren produziert. Erst die sehr effiziente glaziale Erosion hat die Menge Sedimente in den Tiefseegraben geliefert – hier liegen seither über 2 km mächtige Sedimente –, die den Aufbau eines Akkretionskeils ermöglicht haben. Am südamerikanischen Rand lässt sich exemplarisch zeigen, dass sich mehrere Bereiche von tektonischer Akkretion bis zu tektonischer Erosion von Norden nach Süden ablösen (Kukowski und Oncken, 2006). Der Plattenrand vor den zentralen Anden gilt inzwischen als Typvertreter, an dem tektonische Erosion dominiert. Bei diesem Vorgang ist hier seit dem Jura (vor 140 bis 200 Mio. Jahren) ein über 200 km breiter Streifen kontinentaler Kruste vernichtet worden und der vulkanische Bogen ist seit dem Jura um 200 km nach Osten in seine heutige Position gewandert. Die Südanden besitzen dagegen einen kleinen Keil

aus tektonisch angelagerten Sedimenten an der untermeerischen Spitze des Kontinentalrands. Ein weiterer Teil wird subduziert und lässt sich mit geophysikalischen Methoden als Auflage auf der ozeanischen Platte bis in große Tiefen nachweisen. Diese Auflage aus mächtigen, unverfestigten, wasserreichen Sedimenten reduziert die Reibungskräfte an der Plattengrenzfläche – und damit die Möglichkeit, die Oberplatte zu deformieren.

Dennoch beantworten diese Ergebnisse nicht, warum sich die Anden erst in den vergangenen 50 Mio. Jahren entwickelten, und das auch nur im zentralen und nördlichen Teil; die Südanden sind mit ihrer Entstehung seit etwa 20 Mio. Jahren deutlich jünger. Die oben beschriebenen Zusammenhänge vermögen die Entwicklung seit ihrer Bildung, vor allem die Beschleunigung in der Gebirgsbildung in den zentralen Anden und die lateralen Unterschiede in der Ausprägung und ihrem Aufbau zu erklären, nicht jedoch die Initiierung. Hier zeigen jüngste Forschungen des GFZ gemeinsam mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus Italien und den USA, dass diese wesentlich durch etwas anderes gesteuert wurden: Das Zurückweichen der ozeanischen Nazca-Platte vor der westwärts wandernden südamerikanischen Platte nahm vor etwa 50 Mio. Jahren schlagartig ab (Faccenna *et al.*, 2016). Die am GFZ erarbeiteten Ergebnisse zur zeitlichen Entwicklung der Westdrift Südamerikas, angetrieben durch den sich öffnenden Südatlantik, zeigen, dass der westwärts treibende südamerikanische Kontinent offensichtlich lange auf keinen Widerstand traf (Abb. 5), der ihn zur Ausbildung einer Deformationsfront – eines Gebirges – gezwungen hätte. Neue tomographische Studien und ihre Modellierung (Abb. 6) durch die Partner sowie unsere zeitliche Rekonstruktion zeigen nun, dass vor etwa 50 Mio. Jahren die abtauchende Nazca-Platte unter dem nördlichen und zentralen Teil Südamerikas die Grenze zum unteren Erdmantel erreichte und begann, in diesen einzutauchen. In diesem Teil des Erdmantels, der eine höhere Viskosität besitzt als der obere Erdmantel, wurde sie dabei quasi verankert und ein weiteres Zurückweichen vor der herandriftenden südamerikanischen Platte unterbunden – das Aufstauchen des Plattenrands wurde buchstäblich erzwungen. Anders ist dies im südlichen Südamerika, wo die Nazca-Platte erst vor 20 Mio. Jahren diese wichtige Grenze erreichte – und wo die Anden entsprechend später ihr Wachstum begannen, aber noch längst kein Hochgebirge erreicht ist. Die Modellierungsstudie zeigt zudem, dass sich die gesamte Kräftebilanz und der Materialfluss im Erdmantel bei diesem Vorgang ändern: Die Oberplatte wird nach dem Eindringen der ozeanischen Platte in den unteren Mantel geradezu zur ozeanischen Platte hin „gesaugt“, der Deformationsprozess an der Front der Oberplatte durch derartige Rückkopplung noch verstärkt.

Damit ist die lange offen gebliebene Frage, warum Hochgebirge an konvergenten, von Subduktion bestimmten Plattenrändern so selten sind, und warum die Anden trotz lang andauernder

Subduktion erst vor 50 Mio. Jahren begannen zu wachsen, neu beantwortet. Der Schlüssel zum Verständnis der Vorgänge an konvergenten Plattenrändern liegt damit nicht nur im Verständnis der Mechanik der Plattengrenze selbst, sondern weit darüber hinaus in der Kenntnis der positiv und negativ rückgekoppelten Wechselwirkungen zwischen Erdmantel und Erdkruste sowie bei der Festigkeitsentwicklung und der klimagesteuerten Umlagerung durch Massen an der Erdoberfläche.

Literatur

- Faccenna, C., Oncken, O., Holt, A., Becker, T.W. (2016 accepted): Growth of the Andes controlled by lower mantle subduction. – *Earth and Planetary Science Letters*.
- Kukowski, N., Oncken, O. (2006): Subduction Erosion - the 'Normal' mode of fore-arc material transfer along the Chilean margin? - In: Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H.-J., Ramos, V., Strecker, M., Wigger, P. (Eds.), *The Andes - Active Subduction Orogeny*, (Frontiers in Earth Sciences), Springer, pp. 217-236.
- Li, C., van der Hilst, R. D., Engdahl, E. R., Burdick, S. (2008): A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle. – *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 9, 5, Q05018.
- Oncken, O., Boutelier, D., Dresen, G., Schemmann, K. (2012): Strain accumulation controls failure of a plate boundary zone: Linking deformation of the Central Andes and lithosphere mechanics. - *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 13, 12, Q12007.
- Oncken, O., Hindle, D., Kley, J., Elger, K., Victor, P., Schemmann, K. (2006): Deformation of the Central Andean Upper Plate System - Facts, Fiction, and Constraints for Plateau Models. - In: Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H.-J., Ramos, V., Strecker, M., Wigger, P. (Eds.), *The Andes - Active Subduction Orogeny*, (Frontiers in Earth Sciences), Springer, pp. 3-27.
- Oncken, O., Sobolev, S. V., Stiller, M., Asch, G., Haberland, C., Mechie, J., Yuan, X., Lüthen, E., Giese, P., Wigger, P., Lüth, S., Scheuber, E., Götze, H.-J., Brasse, H., Buske, S., Yoon, M.-K., Shapiro, S., Rietbrock, A., Chong, G., Wilke, H., Gonzales, G., Bravo, P., Vieytes, H., Martinez, E., Rössling, R., Ricaldi, E., ANCORP Working Group (2003): Seismic imaging of a convergent continental margin and plateau in the central Andes (Andean Continental Research Project 1996 (ANCORP'96)). - *Journal of Geophysical Research*, 108, B7, 2328.
- Schurr, B., Rietbrock, A., Asch, G., Kind, R., Oncken, O. (2006): Evidence for lithospheric detachment in the central Andes from local earthquake tomography. - *Tectonophysics*, 415, 1-4, pp. 203-223.
- Sobolev, S. V., Babeyko, A., Koulakov, I., Oncken, O. (2006): Mechanism of the Andean Orogeny: Insight from Numerical Modeling. - In: Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H.-J., Ramos, V. A., Strecker, M. R., Wigger, P. (Eds.), *The Andes - Active Subduction Orogeny*, (Frontiers in Earth Sciences), Springer, pp. 513-535.
- Victor, T., Oncken, O. (2005): Controls on the shape and kinematics of the Central Andean plateau flanks: Insights from numerical modeling. - *Earth and Planetary Science Letters*, 236, 3-4, pp. 814-827.
- Willett, S., Beaumont, C., Fullsack, P. (1993): Mechanical model for the tectonics of doubly vergent compressional orogens. – *Geology*, 21, 4, pp. 371-374.

Das Knacken, Knistern und Knirschen beim Verschlucken einer kalten Platte

Das IPOC-Observatorium überwacht seit zehn Jahren die Subduktionszone in Nordchile

Bernd Schurr¹, Heidrun Kopp², Günter Asch¹, Frederik Tilmann¹, Onno Oncken¹

¹Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam

²GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel

The Integrated Plate Boundary Observatory Chile (IPOC) in northern Chile has been monitoring the largest seismic gap along the South American subduction zone for 10 years. When IPOC was initiated, it has been 130 years the last great earthquake in the region had occurred. And since then the Iquique gap had been accumulating a slip deficit along a >500 km segment of the plate boundary. Since IPOC's inception two large events, the 2007 M 7.7 Tocopilla and the M 8.1 2014 Iquique earthquakes, have broken parts of the gap. Both events were well recorded by IPOC, produce valuable data and advance our understanding of the subduction megathrust earthquake cycle. Last year, the Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR) has been extending IPOC with the GeoSEA ocean bottom observatory. In this ambitious project deformation will be measured where it cannot be picked up by land-based instruments, i. e. far offshore near the subduction trench. This will open the crucial updip section of the subduction plate boundary to research. IPOC has thus demonstrated the necessity of long-term monitoring to observe slow or rare events, but also that tenacity and patience pay off.



Subduktionszonen mit ihren spektakulären Vulkangürteln, tiefsten Ozeangraben und den stärksten und tiefsten Erdbeben sind eindrucksvolle Belege für die Theorie der Plattentektonik. An Subduktionszonen sinken kalte und schwere ozeanische Platten in den Erdmantel und treiben so die Konvektionszellen an, die der Motor für die Kontinentverschiebungen sind. Die durch den Subduktionsvulkanismus gebildeten Gesteine sind der wichtigste Beitrag zur Entstehung kontinentaler Kruste. Die hier in den Erdmantel eingetragenen Volatile und seltenen Elemente prägen langfristig dessen Gesamtzusammensetzung und die in Folge der Fluidzirkulation ausgefallenen Minerale sind eine wichtige Quelle für Bodenschätze, in Chile insbesondere für die großen Kupferlagerstätten.

So ist es nicht überraschend, dass Subduktionszonen zu den wichtigen Untersuchungsobjekten der Geowissenschaften gehören. Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ erforscht seit mehr als 20 Jahren die Subduktionszone entlang der zentralen und südlichen Anden in Südamerika (Oncken, 2016). Dabei hat sich über die Zeit der Fokus von den Anden selbst und den tiefen Prozessen, die zu Vulkanismus und Gebirgsbildung beitragen, zu den flacheren, seewärts gelegenen Bereichen verschoben, wo die stärksten Erdbeben auftreten. Besonders Chile bietet mit seiner sich über tausende von Kilometern erstreckenden und unterschiedliche tektonische und klimatische Zonen überspannenden Küstenlinie ein ideales natürliches Labor, um die Prozesse, die das Auftreten von starken Erdbeben steuern, zu untersuchen. Vor Chile schiebt sich der südamerikanische Kontinent über die ozeanische Nazca-Platte entlang einer Megaüberschiebung. Hierbei verhaken sich zwei Platten in relativ seichten Tiefen, wo die Gesteine noch kalt und spröde sind. Die südamerikanische Megaüberschiebung bricht meist in mehrere hundert Kilometer langen Segmenten und erzeugt so regelmäßig Erdbeben mit Magnitu-

den > 8 (Abb. 1). Allein in den letzten sechs Jahren gab es drei solcher Ereignisse in Chile. Da die ozeanische Platte gleichmäßig mit mehreren Zentimetern pro Jahr in den Erdmantel taucht, können so über Jahrzehnte viele Meter Versatz aufgestaut werden, die sich plötzlich in Erdbeben entladen. Das Aufstauen und Entladen ist ein einigermaßen regelmäßiger Vorgang. Wird er über lange Zeiträume beobachtet, können jene Segmente identifiziert werden, die seit langem nicht gebrochen sind und an denen sich wahrscheinlich eine hohe Spannung zwischen den Platten aufgebaut hat. Diese Bereiche weisen eine hohe Wahrscheinlichkeit für ein großes Erdbeben auf und werden als seismische Lücken bezeichnet. Möchte man die Entstehung eines großen Erdbebens möglichst aus der Nähe beobachten, bieten sich solche Stellen an. Der Norden Chiles wies bis vor kurzem eine der am längsten bestehenden seismischen Lücken auf (Abb. 1). Ein über 500 km langes Stück, das sich von der markanten Mejillones-Halbinsel bis in den Süden Perus erstreckt, zerbrach das letzte Mal 1877 in einem Erdbeben mit einer wahrscheinlichen Magnitude von etwa 9. Der durch das Beben ausgelöste Tsunami verwüstete weite Teile der Küste.

In Erwartung des nächsten großen Erdbebens wurde 2006 mit dem Aufbau des *Integrated Plate Boundary Observatory Chile* (IPOC) begonnen (Victor et al., 2011). IPOC besteht heute unter anderem aus 20 Multiparameterstationen, die in deutsch-französisch-chilenischer Zusammenarbeit betrieben werden (Abb. 1). Die als erste aufgebauten neun Stationen liefern seit mehr als zehn Jahren kontinuierlich hochwertige Daten. An den Multiparameterstationen werden schnelle (durch Seismometer) und langsame (durch kontinuierliches GPS) Bodenbewegungen, die Leitfähigkeit im Untergrund (durch elektrische Sonden und ein Magnetometer) und klimatische Parameter (durch eine Wetterstation) gemessen (Victor et al., 2011). Solche langfristigen Beobachtungen sind wichtig, um z. B. das extrem langsame elastische Zusammenstauchen der Oberplatte zu beobachten, das großen Erdbeben vorangeht (Moreno et al., 2016). Geduld und Ausdauer sind auch notwendig, um eines der seltenen großen Erdbeben zu erfassen, und hört man den Geräuschen im Erdinnern lange genug zu, tauchen auch jene Strukturen in den seismischen Daten auf, an denen nur relativ selten Erdbeben auftreten. Im Rahmen von IPOC werden zudem krustale Verwerfungen mit Extensometern (Victor et al., 2016) und Vulkane mit speziellen Observatorien überwacht.

Links: Eingang zur Erde. IPOC-Multiparameterstation PB17 in Chile. Die hochsensiblen Seismometer stehen hinter der Eisentür in einer in den Fels gesprengten Höhle. Im Hintergrund der Vulkan Ollagüe (Foto: B. Schurr, GFZ)

Left: Entrance to Earth. IPOC multi-parameter station PB17 in Chile. Behind the iron door, in a cave blasted into the rock, highly sensitive seismometers record the slightest ground movements. Ollagüe volcano in the background



Kontakt: B. Schurr
(schurr@gfz-potsdam.de)

Wo es hakt – die seismische Koppelzone

Die Installation von IPOC geschah zur rechten Zeit: In den ersten acht Jahren sind bereits die zwei größten Erdbeben in der fast 140jährigen Geschichte der seismischen Lücke aufgezeichnet worden – 2007 das Tocopilla-Beben (M 7,7; Schurr et al., 2012) und 2014 das Iquique-Erdbeben (M 8,1; Abb. 1;

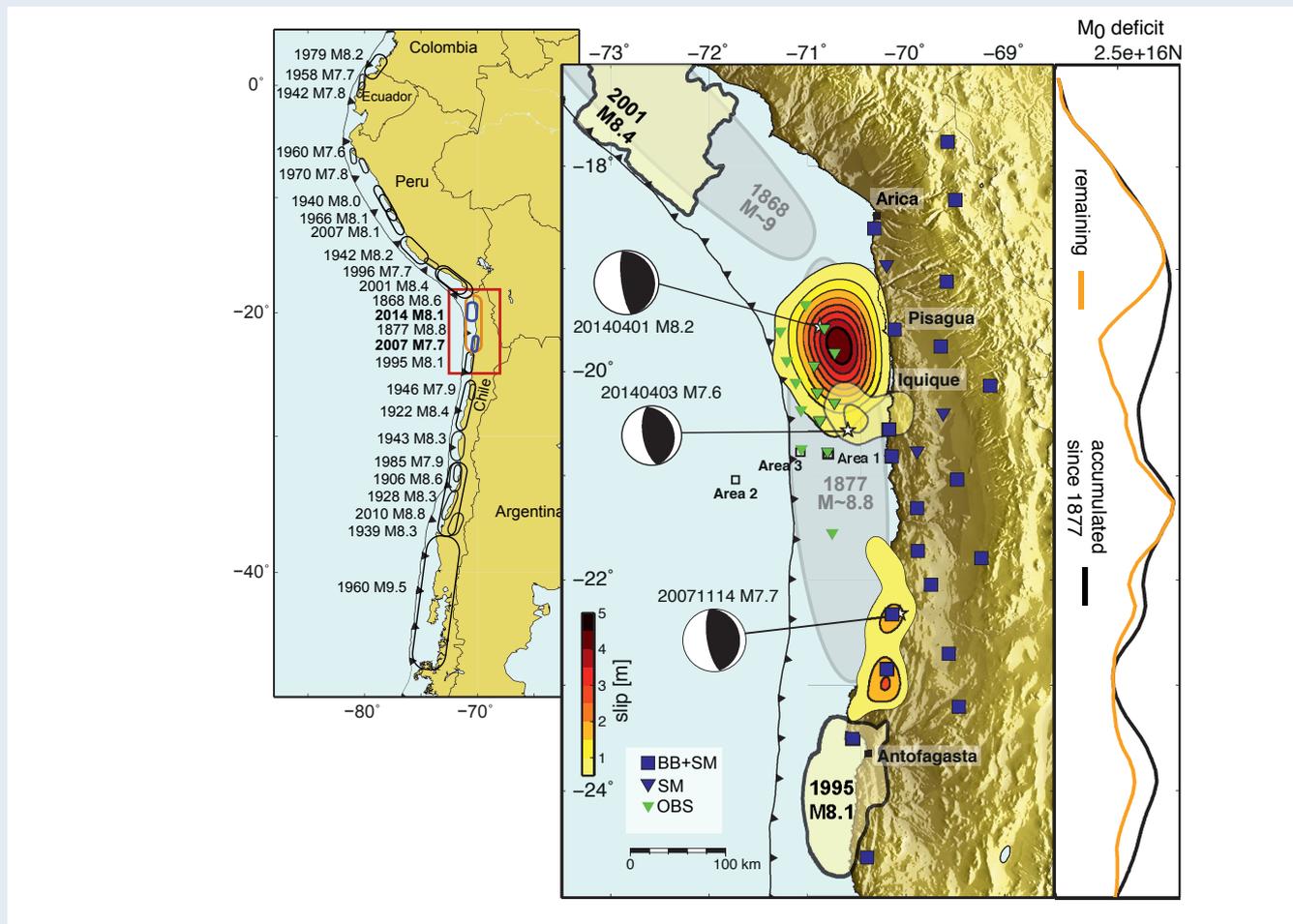


Abb. 1: Links: Große Erdbeben entlang der südamerikanischen Subduktionszone in den letzten 150 Jahren. Mitte: Karte des Integrated Plate Boundary Observatory Chile (IPOC); blaue Symbole markieren die Lage der Seismometer (BB= Broad Band, SM = Strong Motion). Ebenfalls dargestellt sind die Verteilungen des Versatzes der Erdbeben 1995, 2001, 2007 und 2014 (farbige Flächen), sowie die geschätzten Bruchdimensionen der großen Erdbeben aus dem vorletzten Jahrhundert (graue Flächen). Grüne Dreiecke markieren die Ozeanbodenseismometer (OBS; siehe Abb. 5). Rechts: Geschätztes Defizit des seismischen Moments vor und nach dem Iquique-Beben 2014 (Abb.: B. Schurr, GFZ)

Fig. 1: Left: Large earthquakes along the South American subduction zone in the last 150 years. Centre: Map of the IPOC stations (blue symbols). Slip distributions of large earthquakes from 1995, 2001, 2007, and 2014 are also plotted (colored regions). Rupture zones of the 1886 and 1877 events are estimated (grey regions). Inverted green triangles mark OBS locations (see Fig. 5 for detail). Right: Estimated seismic moment deficit before and after the 2014 event

Schurr et al., 2014, Tilmann et al., 2016). Diese haben zu wichtigen Erkenntnissen über Subduktionserdbeben in Chile und auch allgemein geführt. In Subduktionszonen treten die größten Erdbeben entlang der seismischen Koppelzone, oder auch seismogenen Zone, auf. Das ist der Bereich, in dem sich die Platten beim Übereinanderschieben verhaken und in Erdbeben wieder lösen. Ob die Platten haften oder gleiten, hängt von den Reibungseigenschaften der Kontaktflächen ab.

Das empirische Standardmodell der Subduktionsüberschiebung geht davon aus, dass die Platten in den obersten ungefähr zehn Kilometern aseismisch aneinander vorbeigleiten. Dies geschieht wahrscheinlich, weil durch das Auspressen des in den verschluckten Sedimenten enthaltenen Wassers sehr

hohe Drücke in der Verwerfungszone herrschen. Zudem fördern die bei niedrigen Temperaturen vorhandenen Tonminerale stabiles Gleiten. In etwas größeren Tiefen, wenn der größte Teil des ungebundenen Wassers entwichen ist und die Tonminerale bei höheren Drücken und Temperaturen umgewandelt wurden, beginnen die Platten zu haften, bevor sie in 40 bis 50 km Tiefe wieder gleiten. Der tiefere Übergang von Haften zu Gleiten, so das Modell, ist entweder temperaturbedingt, wenn bei etwa 350 °C Quarzminerale beginnen sich duktil zu verformen, oder aber setzt dann ein, wenn die ozeanische Platte mit dem Erdmantel in Kontakt tritt. Das Tohoku-Erdbeben 2011 in Japan (M₉) zeigte allerdings deutliche Abweichungen von diesem Modell. Hier trat der größte Versatz unweit des Tiefseegrabens in Tiefen auf, wo die Platte eigentlich hätte gleiten sollen.

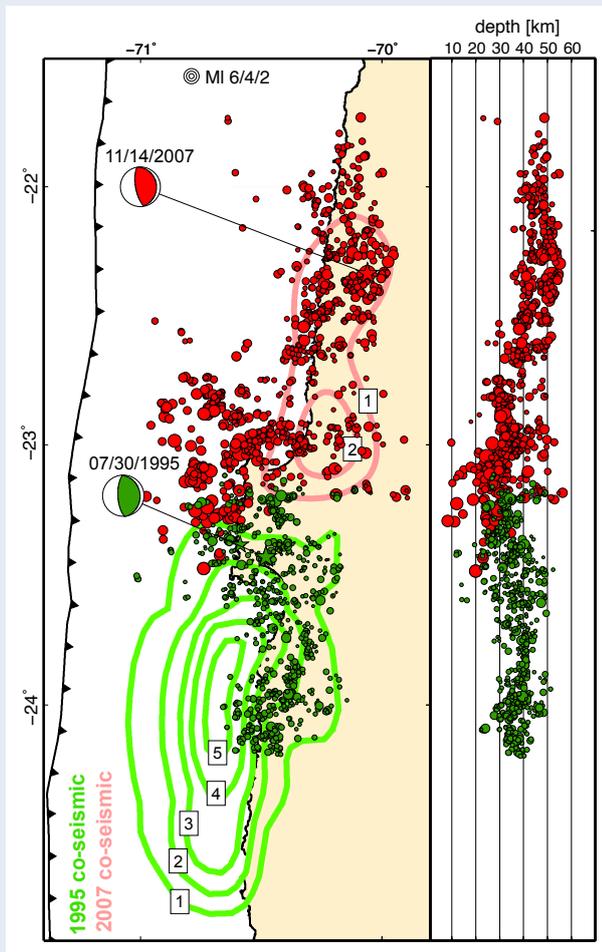


Abb. 2: Versatzkonturen (in Meter) und Nachbeben der Erdbeben von Antofagasta 1995 (grün) und Tocopilla 2007 (rot). Rechts: Tiefensektion entlang der geografischen Breite. Beide Nachbebenserien sind spiegelsymmetrisch relativ zur Mejillones-Halbinsel, obwohl sich der Versatz der Hauptbeben stark unterscheidet. (Abb.: B. Schurr, GFZ)

Fig. 2: Slip contours (in metre) and aftershocks (filled circles) of the M 8.1 1995 Antofagasta (green) and M 7.7 2007 Tocopilla earthquakes (red). On the right, a latitudinal cross section through the seismicity is shown. Both aftershock sequences show surprising symmetry across the centre of the Mejillones Peninsula, despite having different slip patterns.

Auch das Verhalten im tieferen Bereich der seismogenen Zone ist vielseitiger und komplexer als im einfachen Modell. Als Schurr et al. (2012) die Nachbeben des Tocopilla-Erdbebens (2007) mit denen des benachbarten Antofagasta-Erdbebens (1995) verglichen, ergab sich eine überraschende Symmetrie. Bei beiden traten die Nachbeben entlang eines schmalen Streifens im tiefsten Bereich der Koppelzone auf, obwohl sich die Hauptbrüche der beiden Erdbeben deutlich unterschieden (Abb. 2). Das Antofagasta-Beben zeigte den größten Versatz unterseisch, was für große Subduktionserdbeben in Südamerika typisch ist, während das Tocopilla-Erdbeben auf das untere Ende der Koppelzone, das in Chile unter Land liegt, begrenzt war. Die Autoren schlossen daraus, dass sich die Reibungseigenschaften des flacheren, marinen Bereichs von

der tieferen Zone unter Land unterscheiden und der tiefere Bereich besondere Voraussetzungen für das Auftreten von kleineren und mittleren Erdbeben bietet. Jener tiefere Bereich strahlt auch während des Hauptbebenbruchs die meiste hochfrequente seismische Energie ab (Tilmann et al., 2016). Dies hängt wahrscheinlich mit kleinräumig variierenden Reibungseigenschaften zusammen, die auch das Auftreten der Nachbeben förderten. Diese tiefe Zone mit ihren besonderen Eigenschaften ist inzwischen auch an sehr vielen anderen Subduktionszonen beobachtet worden. Dass in Südamerika diese Zone unter Land ist und die Hauptkoppelzone, die die größten Erdbeben erzeugt, unter See und beide also durch die Küstenlinie getrennt sind, ist wohl kein Zufall: Viel mehr ist es wahrscheinlich so, dass die unterschiedlichen Reibungseigenschaften entlang der Kontaktfläche langfristig die Verformung der Oberplatte beeinflussen und so zur Hebung der Küste führen.

So war es auch keine Überraschung, dass das große Iquique-Erdbeben (M 8,1) auf der Seeseite der Koppelzone auftrat (Abb. 1). Ungewöhnlich war allerdings, dass es sich zwei Wochen lang mit einer Vorbebenserie ankündigte (Schurr et al., 2014; Bedford et al., 2016). Mit der IPOC-Instrumentierung konnten der langfristige Spannungsaufbau, die Vorbebenserie und der Bruch des Hauptbebens lückenlos gemessen und analysiert werden (Schurr et al., 2014; Bedford et al., 2016; Cesca et al., 2016). Da nahezu alle IPOC-Daten offen zugänglich sind und der geowissenschaftlichen Community frei zur Verfügung gestellt werden, wurde aus dem Iquique-Erdbeben eines der am besten untersuchten Subduktionsbeben überhaupt.

GeoSEA – ein Observatorium am Meeresboden

Die meisten großen Subduktionsbeben treten unterseisch auf und so erfolgt auch der Spannungsaufbau an der Plattengrenzfläche unterhalb des Meeresbodens. Die Platten haften dabei nicht gleichmäßig, sondern nur in bestimmten Bereichen unterschiedlicher Größe (sogenannte *Asperities*) aneinander. Asperities zu lokalisieren und deren mechanische Ursachen zu verstehen ist eine wichtige Aufgabe der Geowissenschaften, weil sie Ort und Größe von Erdbeben festlegen. In Subduktionszonen können Asperities lokalisiert werden, indem das durch das Haften der Platten hervorgerufene Zusammenstauchen der Oberplatte z. B. durch GPS gemessen und dann modelliert wird (Moreno et al., 2016). Dies gelingt umso besser, je näher die Messungen an der Verformung vorgenommen werden. Die Methode stößt aber in Subduktionszonen an Grenzen, weil dort die Messungen auf die Landseite begrenzt sind. Die Annahme, dass der seichteste Bereich der Subduktionszone gleich hinter dem Tiefseegraben keine Spannungen aufbauen kann, beruht auch darauf, dass diese so weit seawärts vom Land aus bisher nicht gemessen werden konnten. Es ist daher, trotz aller damit einhergehenden Schwierigkeiten, von größter Bedeutung, die Messungen auf den Ozeanboden

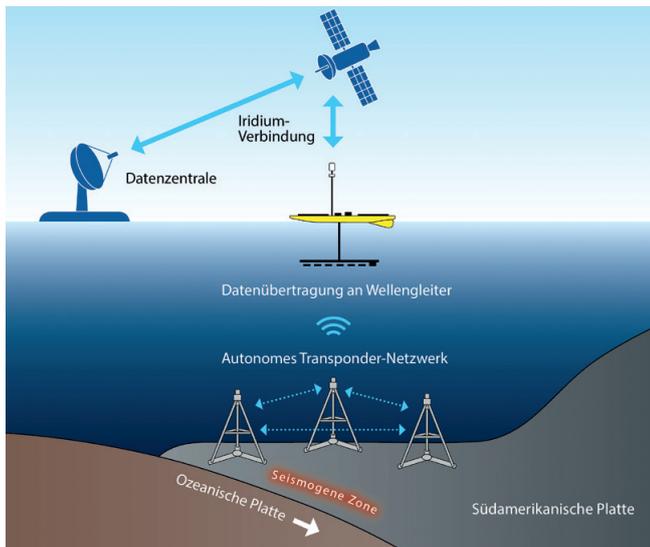


Abb. 3: Schematische Darstellung des Netzaufbaus des GeoSEA-Arrays auf der südamerikanischen Platte vor Nordchile (Grafik: C. Kerstens, GEOMAR)

Fig. 3: Sketch of the network set-up for the GeoSEA arrays on the South American plate offshore North Chile

auszuweiten. Hierzu werden seit einiger Zeit Ozeanbodenseismometer genutzt, die beispielsweise auch nach dem Iquique-Erdbeben 2014 in den Pazifik ausgebracht wurden, um Nachbeben besser lokalisieren zu können.

Eine neue Möglichkeit, Krustendeformationen am Meeresboden zu erfassen, quasi das Analogon zu der an Land genutzten satellitengestützten GPS-Technologie, bietet die Meeresbodengeodäsie. Am GEOMAR wurde in den letzten Jahren ein Netzwerk an Meeresbodenstationen entwickelt, die mittels akustischer Signale miteinander kommunizieren. Aus der Laufzeit der Signale lässt sich die Distanz zwischen den einzelnen Stationen ermitteln (Abb. 3).

Gleichzeitig erfassen die Messstationen des GeoSEA-Netzwerks (Geodetic Earthquake Observatory on the SEAFloor) neben dem Wasserdruck auch Neigungsänderungen, so dass sowohl horizontale als auch vertikale Bewegungen ermittelt werden können. Die Stationen verbleiben für einen Zeitraum von bis zu fünf Jahren autonom im Wasser. Eine weitere Komponente des Netzwerks ist ein Wellengleiter, der sowohl die Funktionalität des Netzwerks in der Tiefe überprüft, als auch dabei hilft, die Daten zur Oberfläche zu transferieren (Abb. 4).

Als Vorbereitung für die Installation des GeoSEA-Arrays vor Nordchile war eine hochauflösende Meeresbodenkartierung des Kontinentalhangs eine Voraussetzung, um geeignete Orte für das Ausbringen der Messgeräte zu finden. Hierzu diente



Abb. 4: Der Wellengleiter dient als Schnittschnelle zwischen dem Meeresboden und der Wasseroberfläche. (Foto: D. Lange, GEOMAR)

Fig. 4: The waveglider serves as communication interface between the ocean floor and the sea surface.

maßgeblich der erste Fahrtabschnitt der Ausfahrt SO244 des neuen Forschungsschiffs SONNE. Im Rahmen dieser Expedition erfolgten im November 2015 Tauchgänge eines autonomen Unterwasserfahrzeugs sowie die flächenhafte Kartierung des Untersuchungsgebiets mittels eines Fächerecholots. In den dadurch ausgesuchten Zielgebieten wurden drei Sub-Netzwerke des GeoSEA-Arrays im zweiten Fahrtabschnitt im Dezember 2015 installiert.

Das GeoSEA-Netzwerk in Nordchile besteht aus insgesamt 23 autonomen Meeresboden-Transpondern, die auf etwa 4 m hohen Stahltripoden auf den Meeresboden abgefiert werden.

Für die Installationen wurden drei Gebiete am mittleren und unteren Kontinentalhang sowie seewärts des Tiefseegrabens identifiziert (Abb. 5). Das Netzwerk in Gebiet 1 auf dem mittleren Hang besteht aus acht Transponderstationen, die paarweise auf vier topographischen Rücken stehen, die den Verlauf von Verwerfungen markieren. In Gebiet 2 auf der ozeanischen Platte seewärts des Tiefseegrabens messen fünf Transponder die Öffnung von Extensionsbrüchen. Das dritte Messgebiet befindet sich in Wassertiefen von über 5000 m auf dem unteren Kontinentalhang, wo insgesamt zehn Stationen den diffusen tektonischen Spannungsaufbau verfolgen. Die ersten Testdatensätze, die nach einigen Tagen mit Hilfe des Wellengleiters gesichert wurden, zeigten eine Präzision von ± 2 mm über eine Entfernung von bis zu 2500 m. Zudem wurden Datensätze der Messungen des Drucks, der Schallgeschwindigkeit, der Salini-

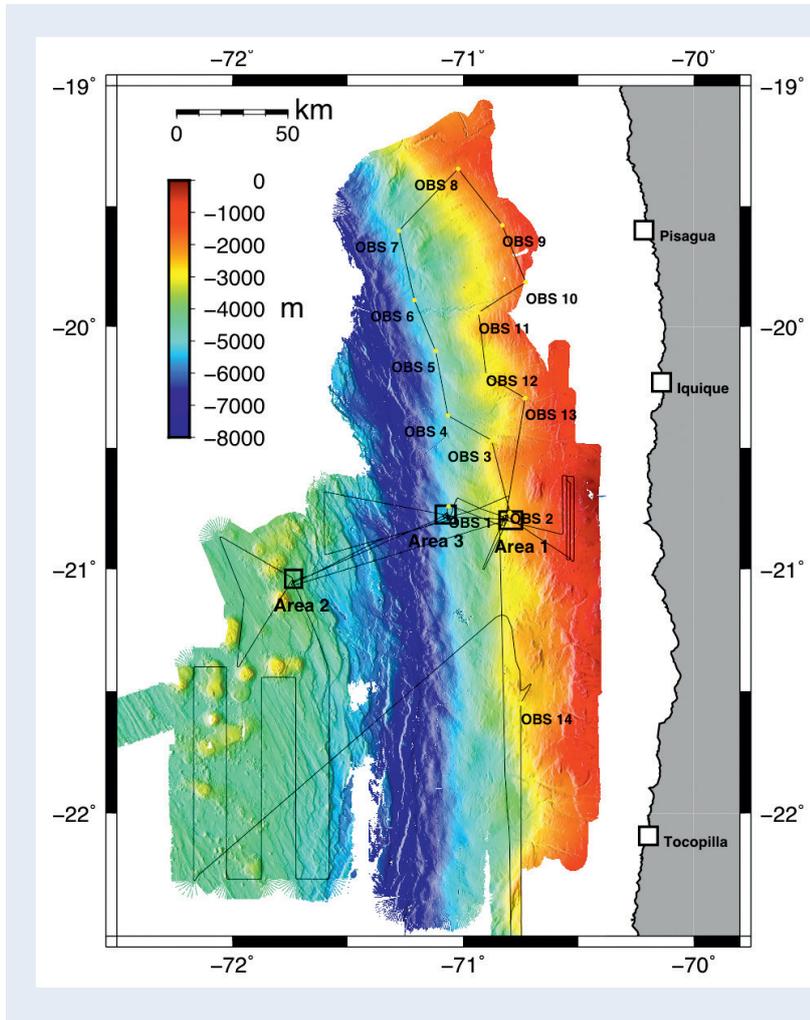


Abb. 5: Fahrtroute des FS SONNE während der Ausfahrt SO244-II (schwarze Linie). Gezeigt sind die drei Einsatzgebiete des GeoSEA-Netzwerks (schwarze Boxen) sowie die Lokationen der Ozeanbodenseismometer. Der chilenische Tiefseegraben ist dunkelblau markiert; westlich davon ist die ozeanische Platte (grün) zu erkennen, die sich unter den Kontinentalhang (östlich des Tiefseegrabens und gelb/rot markiert) schiebt. (Abb.: GEOMAR)

Fig. 5: Route of the RV SONNE during the cruise SO244-II (black line). Plotted are also the areas of the GeoSEA arrays (black boxes) and ocean bottom seismometer locations. The Chilean trench is marked in dark blue, in the west in green is the oceanic plate, as it slides under the continental shelf (yellow and red).

tät und der Temperatur gesichert, anhand derer die Funktionalität der Netzwerke verifiziert werden konnte.

Im Anschluss an die Installation des geodätischen Netzwerks wurden 14 Ozeanbodenseismometer am Meeresboden ausgebracht, um die seismische Aktivität aufzuzeichnen (Abb. 1 und 5). Diese Geräte wurden im Herbst 2016 durch das U.S.-amerikanische Forschungsschiff LANGSETH geborgen.

Wo es zerrt – die intermediären Intraplattenbeben

Die Erdbeben entlang der Koppelzone sind zwar die größten, aber bei weitem nicht die häufigsten seismischen Ereignisse in der chilenischen Subduktionszone. Ein Blick auf die langjährige Seismizitätskarte des IPOC-Untersuchungsgebiets zeigt das dichteste Auftreten von Beben in einem Streifen weit landeinwärts, nahe dem Vulkanbogen (Abb. 6). Die Färbung der Punkte weist den Beben Tiefen um die 100 km zu, und im Querschnitt wird ein geneigtes seismisches Band deutlich, die

sogenannte Wadati-Benioff-Zone, ein Markenzeichen fast aller Subduktionszonen. Diese Erdbeben treten im Innern der in den Erdmantel sinkenden ozeanischen Lithosphärenplatte auf. Ihr typischer Herdmechanismus zeugt von Zugspannung entlang der Platte und unterscheidet sich daher deutlich von den Beben in der Kopplungszone. In Erdmanteltiefe (> 60 km) brechen Gesteine normalerweise nicht spröde, sondern verformen sich unter Spannung duktil, also aseismisch. Tiefherdbeben sind daher nicht leicht zu erklären. Einen Hinweis auf ihre Ursache gibt uns die Tatsache, dass sie, bis auf wenige Ausnahmen (Schurr et al., 2013), nur in ozeanischen Subduktionszonen vorkommen. Es ist wahrscheinlich, dass die ozeanische Lithosphäre in Mineralen gebundenes Meerwasser mit in die Tiefe trägt. Diese hydratisierten Minerale werden bei höheren Temperaturen und größerem Druck instabil und das Wasser wird freigesetzt, was kurzzeitig zu einer Reduzierung des Umgebungsdrucks führt und so Sprödrübrüche zulässt – soweit die Theorie. Der Querschnitt in Abb. 6 zeigt, dass die Wadati-Benioff-Zone tatsächlich aus mindestens zwei Bändern besteht. Die sogenannte doppelte seismische Zone ist ebenfalls

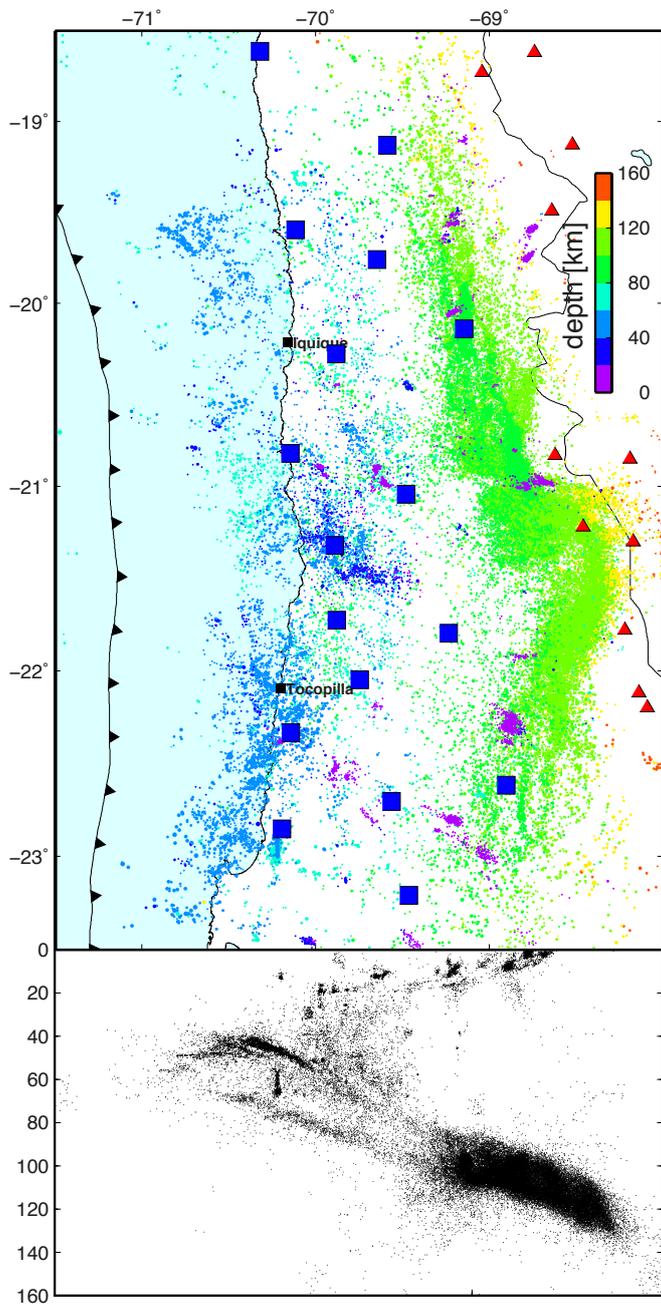


Abb. 6: Erdbebenverteilung im IPOC-Untersuchungsgebiet. Die Einfärbung der Erdbeben gibt Auskunft über ihre Tiefe. Unten: Querschnitt in West-Ost-Richtung. Am häufigsten treten Erdbeben in intermediären Tiefen zwischen 80 bis 120 km auf. Blaue Quadrate sind IPOC-Stationen, rote Dreiecke markieren Vulkane. (Abb.: B. Schurr, GFZ)

Fig. 6: Seismicity map of the IPOC study region. Earthquakes are colored according to depth. Lower panels show cross section in west-east direction. Most events occur at intermediate depths between 80 and 120 km. Blue squares are IPOC stations, red triangles are volcanoes.

ein typisches Merkmal von Subduktionszonen und entsteht wahrscheinlich dadurch, dass die hydratisierten Krusten- und Mantelgesteine entlang unterschiedlicher Isothermen/-baren entwässern. Die Theorie löst auch noch ein anderes Rätsel: Vulkanismus tritt dort auf, wo eine kalte Platte verschluckt wird. Tatsächlich weisen Subduktionsvorseiten die kältesten Geothermen überhaupt auf, weil die permanent nachgeschobene kalte ozeanische Lithosphäre auch die Umgebungsgesteine kühlt. Jedoch dringt das aus der subduzierten Platte freigesetzte Wasser in den Mantelkeil ein und senkt dort dessen Schmelztemperatur. Und tatsächlich konnte tomografisch abgebildet werden, dass Magmen, die zu Vulkanen aufsteigen, ihren Ursprung an den Erdbebennestern in ungefähr 100 km Tiefe haben (Schurr et al., 2003).

Fazit und Ausblick

IPOC hat die ersten zehn Jahre der Überwachung der seismischen Lücke in Nordchile erfolgreich absolviert. Das Konzept von IPOC, den Apex eines seismischen Zyklus mit einer Vielzahl moderner Sensorik zu beobachten, um daraus Grundsätzliches über Subduktions- und Erdbebenprozesse zu lernen, hat sich bewährt. Bisher wurden die zwei größten Erdbeben seit fast 140 Jahren aus nächster Nähe beobachtet und haben überraschende und neue Einsichten z. B. in den Spannungsaufbau und -abbau gewährt. Das letzte große Erdbeben von 2014 hat trotz seiner Magnitude (> 8) nur einen relativ kleinen Teil der seismischen Lücke gebrochen. In den zurückbleibenden Bereichen wurden die Spannungen noch weiter erhöht und sind immer noch ausreichend für ein oder zwei weitere Megaerdbeben (Schurr et al., 2014). IPOC hat auch gezeigt, dass lange Beobachtungszeitreihen notwendig sind, um langsam ablaufende Prozesse oder seltene Ereignisse zu erfassen und dass sich die Ausdauer und Beharrlichkeit lohnt. IPOC wurde über die Jahre kontinuierlich weiterentwickelt und ausgebaut. Der nächste Schritt war die Ausweitung der Beobachtung auf die Seeseite der Subduktion durch das GEOMAR. Die Vielzahl der entwickelten Technologien und gewonnenen Daten werden dazu beitragen, Megaerdbeben an Subduktionszonen in Zukunft besser zu verstehen.

Literatur

- Bedford, J., Moreno, M., Schurr, B., Bartsch, M., Oncken, O. (2015): Investigating the final seismic swarm before the Iquique-Pisagua 2014 Mw 8.1 by comparison of continuous GPS and seismic foreshock data. - *Geophysical Research Letters*, 42, 10, pp. 3820-3828.
- Cesca, S., Grigoli, F., Heimann, S., Dahm, T., Kriegerowski, M., Sobiesiak, M., Tassara, C., Olcay, M. (2016): The Mw 8.1 2014 Iquique, Chile, seismic sequence: a tale of foreshocks and aftershocks. - *Geophysical Journal International*, 204, 3, pp. 1766-1780.
- Moreno, M., Metzger, S., Bedford, J., Hoffmann, F., Li, S., Deng, Z., Klotz, J., Oncken, O. (2016): Satellitengeodäsie und Erdbebendeformation in der nordchilenischen seismischen Lücke. – *System Erde*, 6, 2, pp. 36-41.
- Oncken, O. (2016): Das Rätsel der Anden-Orogenese: Ist der Erdmantel für den Start der Gebirgsbildung verantwortlich? – *System Erde*, 6, 2, pp. 16-21.
- 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, pp. 299-302.
- Schurr, B., Asch, G., Rietbrock, A., Trumbull, R., Haberland, C. (2003): Complex patterns of fluid and melt transport in the central Andean subduction zone revealed by attenuation tomography. - *Earth and Planetary Science Letters*, 215, 1-2, pp. 105-119.
- Schurr, B., Mechie, J., Yuan, X., Schneider, F. M., Sippl, C. (2013): Können Kontinente untertauchen? Kontinentkollision und -subduktion – Tektonik, Tiefenstruktur und geodynamische Prozesse unter dem Pamir, Tien Shan und Hindukusch. - *System Erde*, 3, 2, pp. 6-11.
- Tilmann, F., Schurr, B., Cesca, S., Dahm, T., Saul, J., Palo, M., Moreno, M., Bedford, J., Oncken, O., Wang, R., Zhang, Y. (2016): Neue Einsichten in den Ablauf großer Erdbeben: Kombination innovativer Analyseverfahren erlaubt Rekonstruktion von Bruchverläufen. - *System Erde*, 6, 1, pp. 24-31.
- Victor, P., Kemter, M., Ewiak, O., Ziegenhagen, T., Oncken, O., Gonzalez, G. (2016): Unterschätzte Unbekannte – Aktive Störungen in der Oberplatte großer Subduktionssysteme. – *System Erde*, 6, 2, pp. 30-35.
- Victor, P., Schurr, B., Brändlein, D., Klotz, J., Ritter, O., Asch, G., Walter, T. R., Sobiesiak, M., Oncken, O. (2011): Beobachtung der letzten Phase eines seismischen Zyklus in Nordchile: IPOC – europäisch-südamerikanisches Netzwerk. - *System Erde*, 1, 1, pp. 24-29.

Unterschätzte Unbekannte – Aktive Störungen in der Oberplatte großer Subduktionssysteme

Pia Victor¹, Matthias Kemter¹, Oktawian Ewiak², Thomas Ziegenhagen¹, Onno Oncken¹, Gabriel Gonzalez³

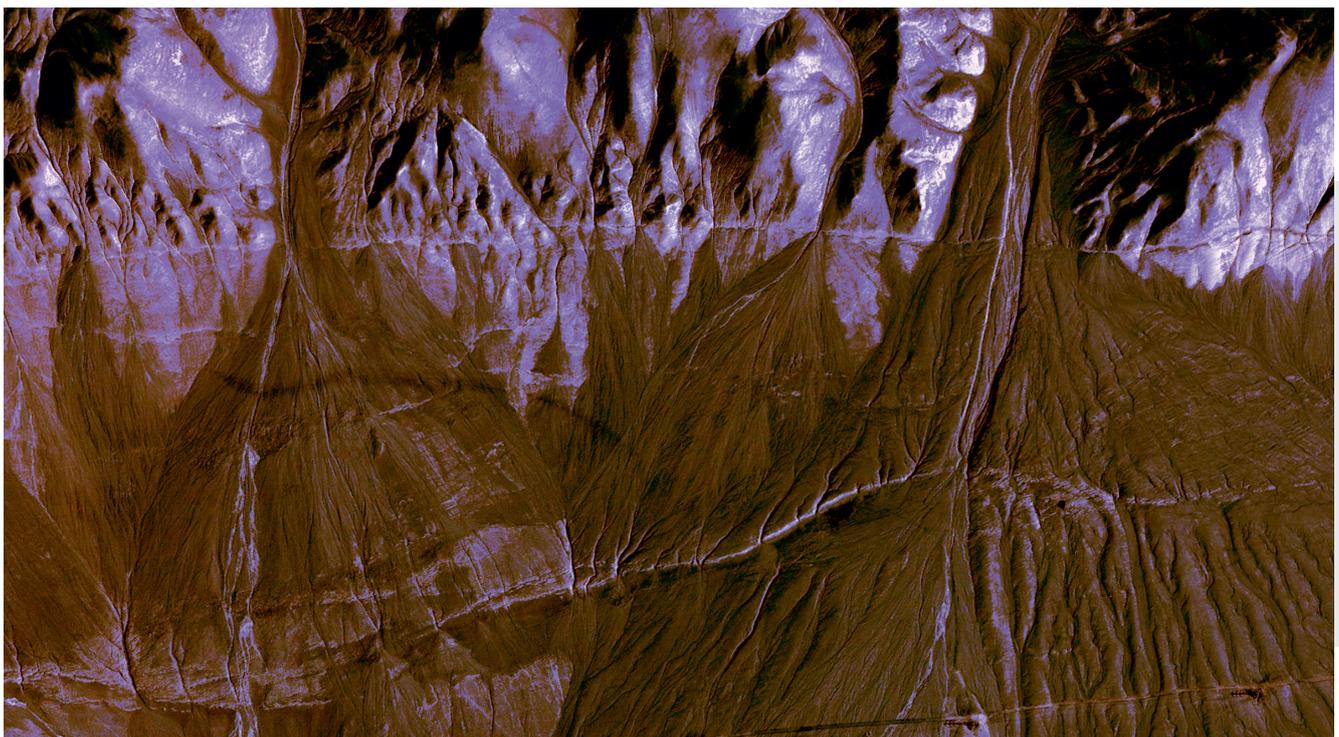
¹ Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam

² Tauw GmbH Dortmund

³ Universidad Catolica del Norte, Antofagasta, Chile

The Atacama Fault System (AFS) is an active trench-parallel fault system, located in the forearc of N-Chile directly above the subduction zone interface. Due to its well-exposed position in the hyper arid forearc of N-Chile it is the perfect target to investigate the interaction between the deformation cycle in the overriding forearc and the subduction zone seismic cycle of the underlying megathrust. Although the AFS and large parts of the upper crust are devoid of any noteworthy seismicity or historically documented earthquakes, at least three M=7 earthquakes in the past 10 ky have been documented in the paleoseismological record, demonstrating the potential of large events in the future.

We apply a two-fold approach to explore fault activation and reactivation patterns through time and to investigate the triggering potential of upper crustal faults. 1) A new methodology using high-resolution topographic data allows us to investigate the number of past earthquakes for any given segment of the fault system as well as the amount of vertical displacement of the last increment. This provides us with a detailed dataset of past earthquake rupture of upper plate faults which is potentially linked to large subduction zone earthquakes. 2) The IPOC Creepmeter array provides us with high-resolution time series of fault displacement accumulation for eleven stations along the four most active branches of the AFS.



An der Westküste Südamerikas befindet sich eine der tektonisch aktivsten Zonen unseres Planeten. Dort, wo sich die ozeanische Nazca-Platte unter den südamerikanischen Kontinent schiebt, befindet sich die Subduktionszone. An dieser Grenzfläche kommt es durch die kontinuierliche Konvergenz der beiden Platten (6,7 cm/Jahr) immer wieder zu großen Überschiebungserdbeben. Die Wiederkehrrate solcher Ereignisse in Nordchile liegt bei etwa 120 Jahren, und neben dem instrumentell gut dokumentierten Iquique-Erdbeben 2014 (Mw 8,1; Schurr et al., 2014) sind vier weitere Erdbeben mit Magnituden > 8 historisch gut belegt.

Aber was spielt sich oberhalb dieser Plattengrenze in der südamerikanischen Kontinentalplatte ab? Typischerweise entwickelt sich in diesem Bereich eine plattenrandparallele Störungszone, die eine zusätzliche Grenzfläche in der kontinentalen Oberplatte bildet. Zwar sind diese Störungen oft bekannt, ihr seismisches Potenzial wird jedoch in den meisten Fällen unterschätzt. Wie beispielsweise im Fall des Hanshin-Erdbebens, welches sich genau an solch einem Störungssystem in Japan ereignete und die Stadt Kobe 1995 völlig unerwartet traf. Das gebrochene Segment der Nojima-Störung wurde zuvor aufgrund fehlender historischer und instrumenteller Erdbeben als inaktiv eingestuft.

Heute ist bekannt, dass diese Störungen Wiederkehrzeiten von mehreren tausend Jahren haben, so dass instrumentelle und historische Kataloge nicht ausreichen, um Aussagen über eine potenzielle Gefährdung zu treffen. Eine Störung kann jederzeit reaktiviert werden, auch wenn sie mehrere tausend Jahre im „Schlafmodus“ verweilt. Oft sind es deshalb diese unterschätzten Störungen die, falls sie aktiv werden, Beben mit verheerenden Folgen für die lokale Bevölkerung und die Infrastruktur auslösen können.

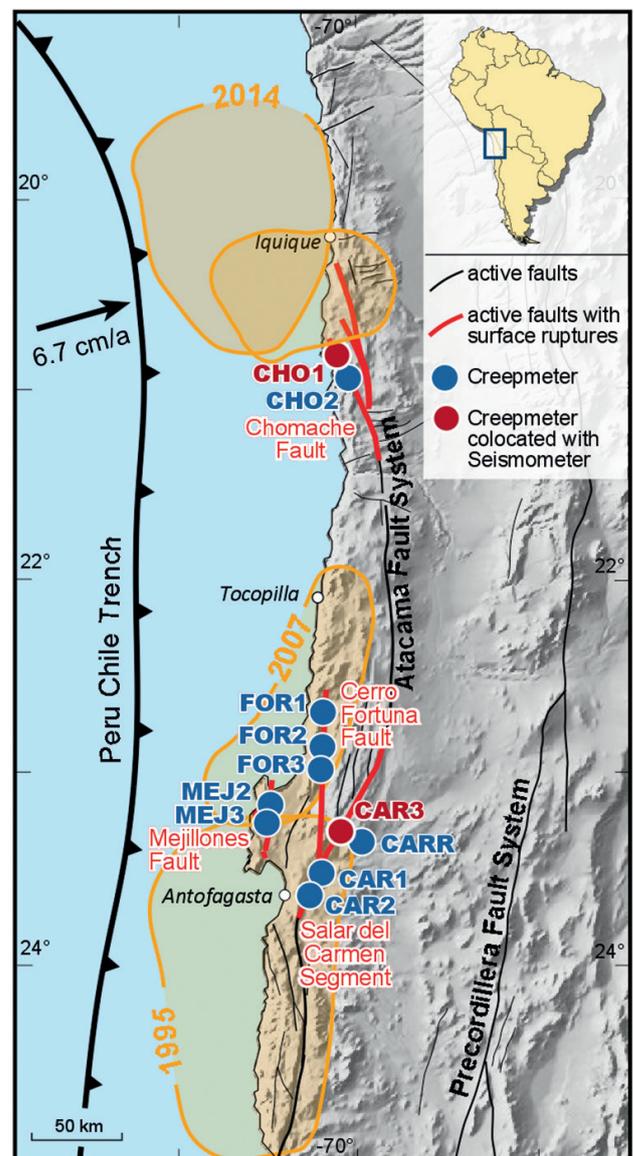


Abb. 1: Der Verlauf der Atacama-Störungszone in der chilenischen Küstenkordillere. Störungssegmente mit eindeutig durch Erdbeben erzeugten Oberflächenbrüchen sind rot markiert. Diese Segmente werden mit mindestens zwei Creepmetern überwacht. Die großen Subduktionsbeben der vergangenen Jahre sind als gelbe Ellipsen dargestellt.

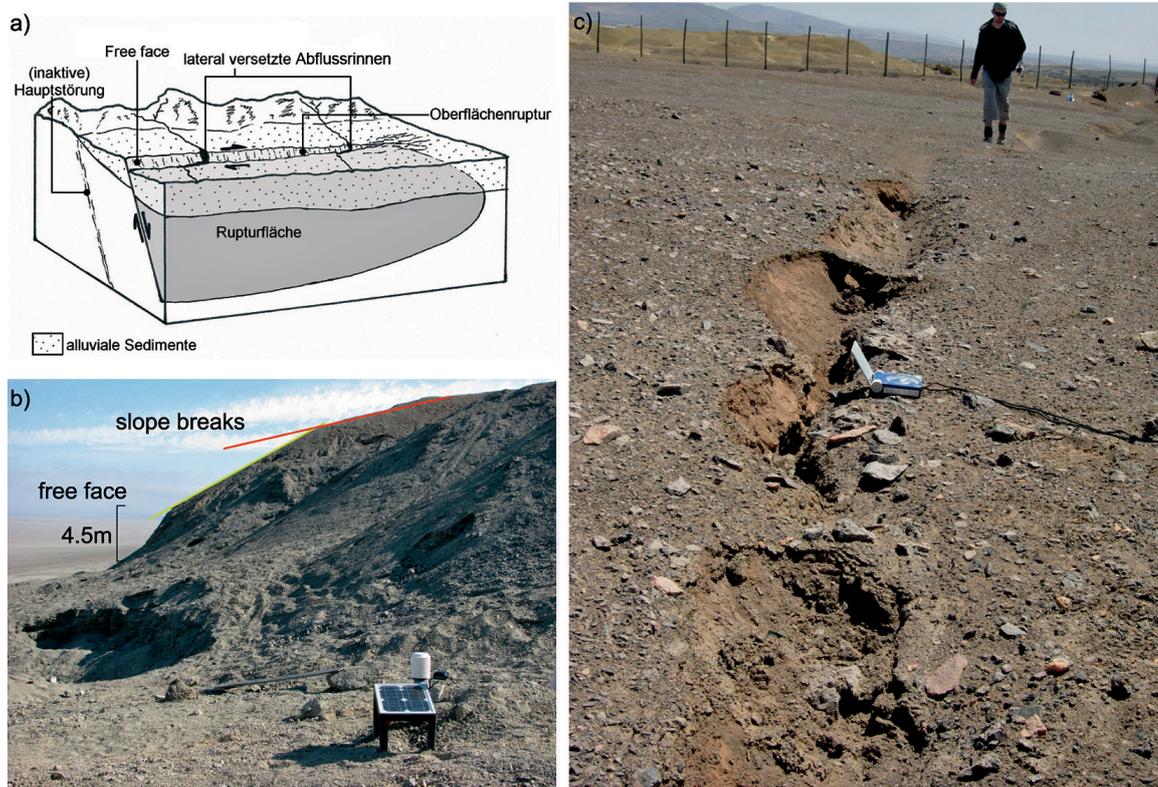
Links: Komplexes Muster von Oberflächenbrüchen der Atacama-Störungszone, die durch prähistorische Erdbeben erzeugt wurden. Mindestens zwei Bruchzonen sind auf diesem Ausschnitt zu erkennen, die im ariden Klima der Atacamawüste perfekt konserviert worden sind. Spezielle Bildbearbeitungstechniken auf der Grundlage eines Google Earth-Satellitenbilds machen auch kleinere Strukturen sichtbar (Ausschnitt etwa 5 km).

Left: Complex pattern of surface ruptures along the Atacama Fault System that originates from pre-historic earthquakes. At least two separate ruptures can be identified from this section, which have been preserved perfectly in the arid climate of the Atacama desert. Image processing techniques allow the visualisation of small-scale structures (image covers about 5 km).

Fig. 1: Map of the Atacama fault system (AFS) outcropping in the Coastal Cordillera of Northern Chile. Segments of the AFS marked in red are characterized by surface ruptures and identified as active. These fault segments are equipped with at least two creepmeter stations to monitor the current displacement. Large subduction zone earthquakes in the recent past are marked with yellow ellipses.



Kontakt: P. Victor
(pia.victor@gfz-potsdam.de)



Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Deutschen Geo-Forschungszentrum GFZ nutzen den westlichen Plattenrand Südamerikas in Nordchile als natürliches Laboratorium, um die Prozesse an einer plattenrandparallelen Störung zu erforschen. Zwischen den Städten Iquique im Norden und Paposo im Süden ist die Atacama-Störungszone (AFS für Atacama fault system) über 460 km entlang der chilenischen Küstenkordillere sehr gut aufgeschlossen (Abb. 1). Dieses Störungssystem wurde bereits in der frühen Kreidezeit (vor rund 100 bis 140 Mio. Jahre) angelegt und kompensiert die schiefe Komponente der Plattenkonvergenz. Seit ihrer Entstehung wurde die AFS mehrfach reaktiviert und bildet heute ein komplexes Störungssystem, welches sich aus zahlreichen Segmenten zusammensetzt. Trotz eindeutiger Spuren großer Erdbebenbrüche an der AFS gibt es keine historisch dokumentierten Erdbeben entlang dieser Störungszone seit der spanischen Besiedlung vor etwa 500 Jahren und kaum instrumentell gemessene Seismizität in der gesamten Oberplatte. Deshalb ist die Untersuchung prähistorischer Erdbeben mit Hilfe morphologischer und geologischer Archive ein fundamentaler Schlüssel, um Hinweise über die Magnituden, die Verteilung und die Wiederholraten großer Erdbeben in dieser Region zu erhalten. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ erforschen gemeinsam mit chilenischen Kolleginnen und Kollegen die vergangenen und aktuellen Prozesse an der AFS und nutzen dabei einen zeitskalenübergreifenden Ansatz: Sie untersuchen die prähistorischen Oberflächenbrüche mit hochaufgelösten topographischen Datensätzen in Kombination mit geologischen Archiven und leiten daraus das Reaktivierungspotenzial sowie Aussagen über Anzahl und Magnituden vergangener Erdbeben ab. Außerdem wird das AFS mit einem Netzwerk von Sensoren, sogenannten Creepmetern, überwacht, um die Kopplung der AFS mit der Subduktionszone zu untersuchen.

Die Morphologie der Störungen – Schlüssel zu prähistorischen Erdbeben in einem extrem trockenen Wüstengebiet

Die meisten oberflächennahen Erdbeben hinterlassen charakteristische Spuren an der Erdoberfläche. Diese typischen Landschaftsformen werden in der tektonischen Geomorphologie als sogenannte morphologische Indikatoren verwendet, um Aufschluss über tektonische Prozesse in der Vergangenheit zu erhalten. Verschieben sich die durch eine Störungszone getrennten Krustenblöcke bei einem Erdbeben vertikal zueinander, entsteht eine Bruchstufe, die von wenigen Zentimetern bis über 10 m hoch sein kann (Abb. 2).

Schieben sich die Blöcke hingegen seitwärts aneinander vorbei, ist dies häufig durch das Verbiegen oder sogar durch das Abschneiden von Bach- und Flussläufen in der Landschaft dokumentiert. Die extreme Trockenheit der Atacamawüste in Nordchile bietet bei der Suche und Erforschung solcher Spuren nahezu perfekte Bedingungen, denn die teilweise in Bruchteilen von Sekunden entstandenen morphologischen Indikatoren bleiben über hunderttausend Jahre lang erhalten. Dies ermöglicht eine nahezu vollständige Rekonstruktion der Entstehungsgeschichte der AFS.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ haben eine Methode entwickelt, mit der Segmente mit besonders hoher Wahrscheinlichkeit für eine Reaktivierung ermittelt werden können. Zunächst werden die Oberflächenrupturen entlang der gesamten Störung kartiert und dann deren vertikale Versatzbeträge ermittelt (Abb. 3). Zudem werden Segment-Endpunkte (*tip points*) von Oberflächenrupturen kartiert, da diese die Bruchlänge großer Erdbeben kontrollieren können (Wesnousky, 2006). Empirische Untersuchungen zeigen einen direkten

Abb. 2: a) Typische Landschaftsformen einer durch Erdbeben gebildeten Störung. Die in der Tiefe entstandene Bruchfläche erzeugt an der Oberfläche eine Bruchstufe. Eine seitliche Verschiebung führt zu versetzten Abflussrinnen; b) Bruchstufe an der Mejillones-Störung. Das free face repräsentiert den Vertikalversatz des letzten Erdbebens, wohingegen die slope breaks die vorangegangenen Erdbeben dokumentieren; c) Beispiel einer nur 25 cm hohen Bruchstufe, die sich im Zusammenhang mit dem Antofagasta-Subduktionsbeben 1995 (Mw 8,1) bildete (Fotos: P. Victor, GFZ)

Fig. 2: a) Typical morphological markers for earthquake related ruptures. The rupture plane at depth causes a fault scarp with a free face at the surface in case of vertical displacement. In case of strike-slip motion streams and gullies are offset; b) Normal fault scarp at the Mejillones fault. The free face represents the vertical displacement from the last earthquake rupture, whereas the slope breaks document the penultimate events; c) Example of a 25 cm rupture generated during the 1995 Mw=8.1 Antofagasta earthquake.

Zusammenhang zwischen der Bruchfläche – also der Bruchlänge und dem Versatz – und der Erdbebenmagnitude (Wells und Coppersmith, 1994), der direkt für die Magnitudenabschätzung genutzt werden kann. Vereinfacht heißt das: je länger die kartierte Oberflächenruptur ohne geometrische Komplikationen verläuft und je höher der vertikale Versatz ist, desto größer ist das Potenzial für Erdbeben mit hohen Magnituden. Mit einem quantitativen Ansatz ist es den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am GFZ erstmalig gelungen, die Anzahl von Erdbeben entlang eines mehrfach reaktivierten Störungssegments allein aus topographischen Daten zu ermitteln (Ewiak et al., 2015). Im Zuge dieser Studie gelang es ebenfalls, einen Algorithmus zu entwickeln, der ausschließlich den vertikalen Versatz des letzten Erdbebens automatisch aus topographischen Profilschnitten abtastet und quantifiziert. Daraus kann eine deutlich verbesserte Magnitudenbestimmung erfolgen, als durch die bisher verwendete, kumulative Versatzhöhe (Abb. 3).

Diese neuen Ergebnisse ermöglichen es, zukünftig Aussagen über die prähistorische Erdbebenaktivität an langen und komplexen Störungszonen treffen zu können, die vorher nur durch aufwendige Untersuchungen und lokal begrenzt möglich waren.

Die Atacama-Störung ruckelt im μm -Maßstab

Zusätzlich zu den Untersuchungen prähistorischer Erdbeben werden die derzeitigen Verschiebungen an der AFS im Rahmen des Integrated Plate Boundary Observatories (IPOC; Victor et al., 2011) mit einem einzigartigen Netzwerk aus Creepmetern überwacht (Abb. 1). Da es Hinweise von anderen Plattenrändern gibt, dass Störungen in der Oberplatte von großen Subduktionsbeben getriggert werden können (Toda und Tatsumi, 2013), wird in diesem Projekt untersucht, wie die verschiedenen Segmente der AFS auf kleine und große Erdbeben reagieren und ob das Phänomen des Triggerns auch in Chile beobachtet werden kann.

Seit November 2008 zeichnen die IPOC-Creepmeter kontinuierlich die Aktivität an vier ausgewählten Störungssegmenten (Abb. 1) auf. Creepmeter funktionieren nach einem simplen

Prinzip: Eine Metallstange ist auf einer Seite der Störung befestigt und kann sich auf der anderen Seite reibungslos bewegen. Dort wird die Bewegung mittels magnetischer Induktion hochpräzise gemessen. Die Messungen erfolgen alle 30 s bei einer Auflösung von etwa 1 μm . Der Aufbau sowie die Technik zur Datenaufnahme, -verarbeitung und Datenübertragung wurde am GFZ speziell für das IPOC-Creepmeter-Netzwerk entwickelt. Die mittlerweile elf Creepmeter arbeiten solar-betrieben, ohne Unterbrechung und nahezu störungsfrei. Ihre Daten werden regelmäßig via Satellit an das GFZ gesendet. Die Creepmeter werden in etwa 50 bis 70 cm Tiefe vergraben, um äußere Einflüsse zu minimieren. Mit Hilfe einer abseits der Störungszone installierten Referenzstation kann festgestellt werden, welche Anteile der Signale tatsächlich mit der Störungsaktivität zusammenhängen und welche auf äußere Einflüsse oder das Instrument selbst zurückzuführen sind. Die Referenzdaten belegen, dass die kurz- und langfristigen Aktivitäten, die mit den IPOC-Creepmetern gemessen werden, in direktem Zusammenhang mit den Störungen stehen.

Die Daten der Stationen zeigen über den bisherigen Beobachtungszeitraum keinen eindeutigen langfristigen Trend, der unmittelbar Hinweise auf eine kontinuierliche Relativbewegung entlang der Störung geben würde (Abb. 4). Solch ein Signal würde bedeuten, dass ein Großteil der Spannung auf der Störung kontinuierlich abgebaut würde, d. h. die Störung kriecht. Die erfassten Signale zeigen stattdessen, dass die AFS verhakt ist und sich dadurch permanent Spannung aufbaut. Dies kann zu elastischen Verformungen in der Oberplatte führen. Die AFS scheint allerdings einen anderen Modus gefunden zu haben, Spannung – zumindest teilweise – abzubauen. Die Zeitreihen zeigen, dass sich auf den beobachteten Störungen plötzliche Sprünge ereignen (sudden displacement events). Mit Größen zwischen 1 und 100 μm sind sie zu klein, um einen sichtbaren Versatz an der Oberfläche zu erzeugen. Dank der extrem feinen Auflösung der Instrumente können diese Ereignisse aufgezeichnet und analysiert werden (Abb. 4, 5). Die genaue Untersuchung dieser Ereignisse ergab, dass sie quasi zeitgleich mit oder ein wenig nach einem Subduktionsbeben stattfinden. Erstaunlich ist, dass selbst weit entfernte Erdbeben wie das Maule-Erdbeben 2010, das Tohoku-Erdbeben 2011 und das Ecuador-Erdbeben 2016 plötzliche Versätze an den Störungen auslösen. Dies bedeutet, dass die Atacama-Störung getriggert werden kann, wenn auch über den Beobachtungszeitraum hinweg nur in kleinem Maße. Allerdings zeigen diese weltweit in dieser Präzision erstmalig gemachten Beobachtungen, dass es anscheinend unterschiedliche Trigger-Mechanismen gibt. Dabei spielt die Magnitude und Entfernung des auslösenden Erdbebens höchstwahrscheinlich eine Schlüsselrolle. Erste Korrelationen der Creepmeter-Daten mit den Seismogrammen der auslösenden Erdbeben zeigen, dass z. B. für weit entfernte Beben die sogenannte Oberflächenwelle den Versatz an der AFS auslöst (Abb. 5). Dies deutet auf einen dynamischen Prozess hin.

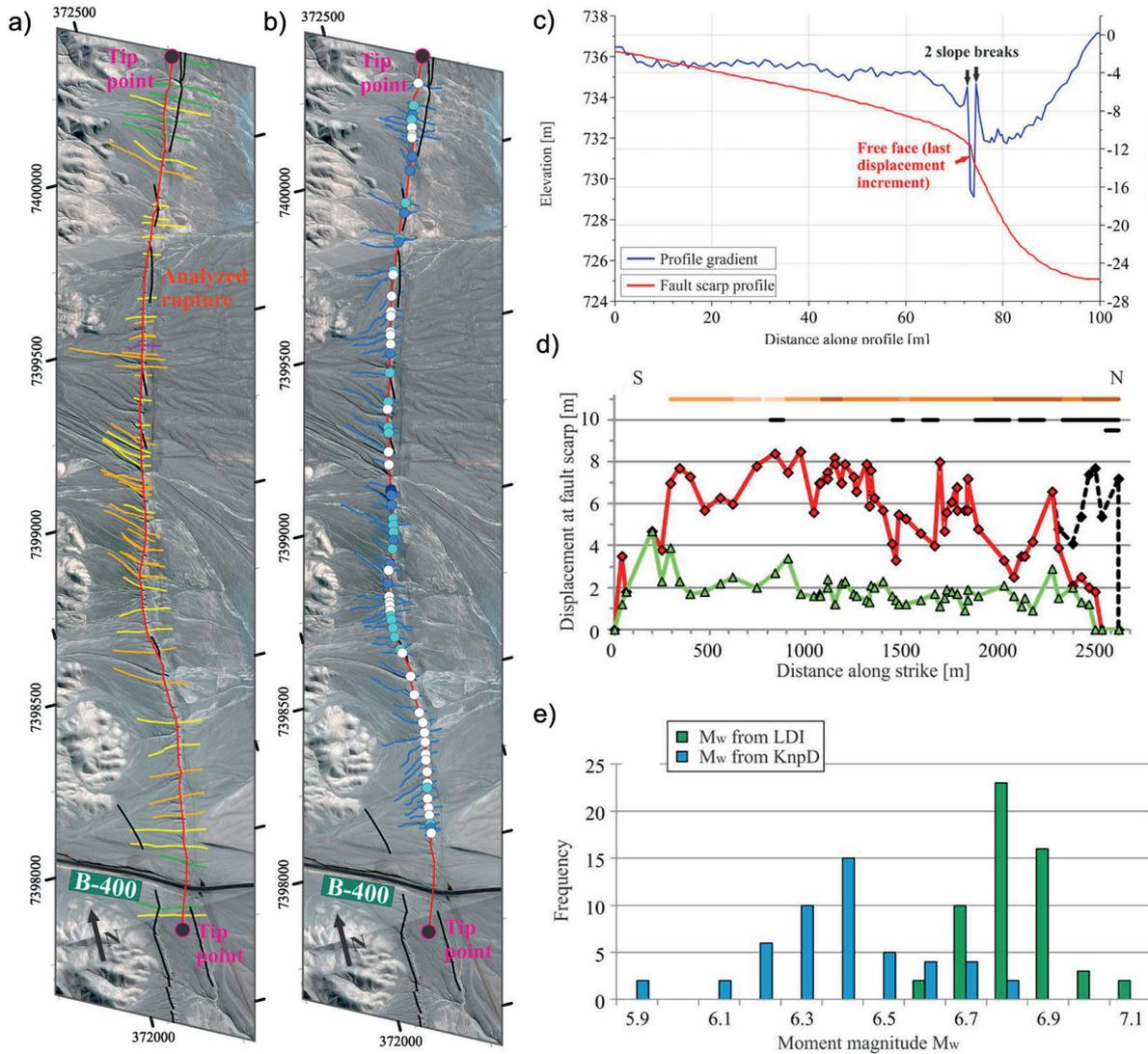


Abb. 3: Auswertung der Bruchstufenmorphologie an der Salar del Carmen-Störung. a) Verlauf des analysierten Bruchs mit hochauflösend vermessenen Querprofilen; b) Analyse der Steilstufen in Erosionsrinnen als Proxy für die Anzahl von Paläoerdbeben; c) automatisiertes Analyseverfahren der Steigungsänderung von topographischen Querprofilen; d) Darstellung des vertikalen Gesamtversatzes (rot) und des Versatzes während des letzten Bebens (grün); e) die Abschätzung der Paläomagnitudo des letzten Erdbebens für diesen Oberflächenbruch liegt zwischen 6,4 und 6,8.

Fig. 3: Investigation of fault scarp morphology of the Salar del Carmen Fault. a) Distribution of surveyed topographic profiles along strike of the rupture; b) Analysis of the number of knickpoints in gullies as proxy for number of paleoearthquakes; c) Automated method to detect gradient changes in topographic fault scarp profiles; d) Plot of the cumulative displacement (red) and the displacement of the last increment (green); e) Estimation of paleomagnitude of the last earthquake along the analyzed rupture ranging from 6.4 to 6.8.

Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen an der AFS zeigen, dass die Störungen in der Oberplatte extrem aktiv sind. Die hier vorgestellten Beobachtungen an den prähistorischen Oberflächenbrüchen weisen darauf hin, dass diese in den vergangenen 10 000 Jahren mehrfach durch Erdbeben mit einer Magnitude bis zu 7 erschüttert wurden und daher die Wahrscheinlichkeit für eine Reaktivierung nicht unterschätzt werden darf. Die Untersuchung verschiedener Segmente ergab dabei auch, dass es Bereiche gibt, die momentan in einem Schlafmodus

verweilen. Die fundamentale Frage, ob die fehlende Aktivität direkt mit der Segmentierung der Subduktionszone zusammenhängt, soll durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse der direkten Überwachung der Störungen mit dem Creepmeter-Netzwerk des IPOC zeigen eindeutig, dass es eine enge Kopplung zwischen Subduktionsbeben und Versätzen an der AFS gibt. Welche Parameterkonstellationen dabei eventuell für das Auslösen großer Erdbeben in der Oberplatte verantwortlich sein können, wird in Zukunft am GFZ im Fokus dieses zeitskalenübergreifenden Forschungsansatzes stehen.

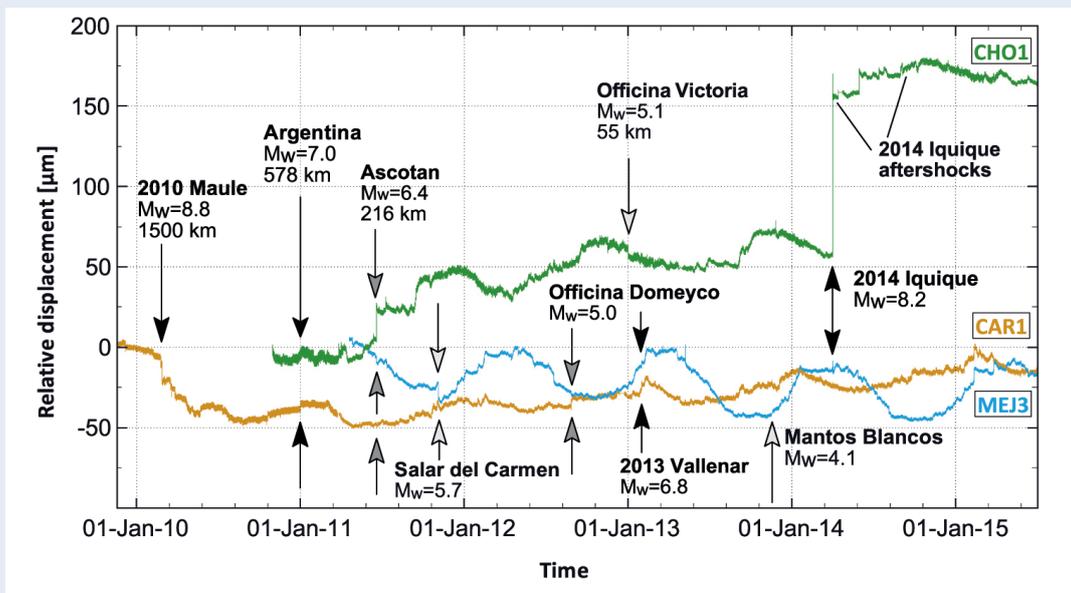


Abb. 4: Zeitreihen von Creepmeter-Messdaten über den Beobachtungszeitraum von fünf Jahren an drei verschiedenen Störungssegmenten. Diese zeigen kleine Versatzereignisse, die durch Subduktionsbeben ausgelöst wurden. Besonders auffällig sind die Versätze, die durch große Erdbeben, wie das Iquique-Erdbeben 2014 oder das Maule-Erdbeben 2010 ausgelöst wurden.

Fig. 4: Time series of creepmeter stations show that subduction zone earthquakes trigger little displacement events. The largest offsets occur remotely triggered by large earthquakes like the 2010 Maule or 2014 Iquique earthquakes.

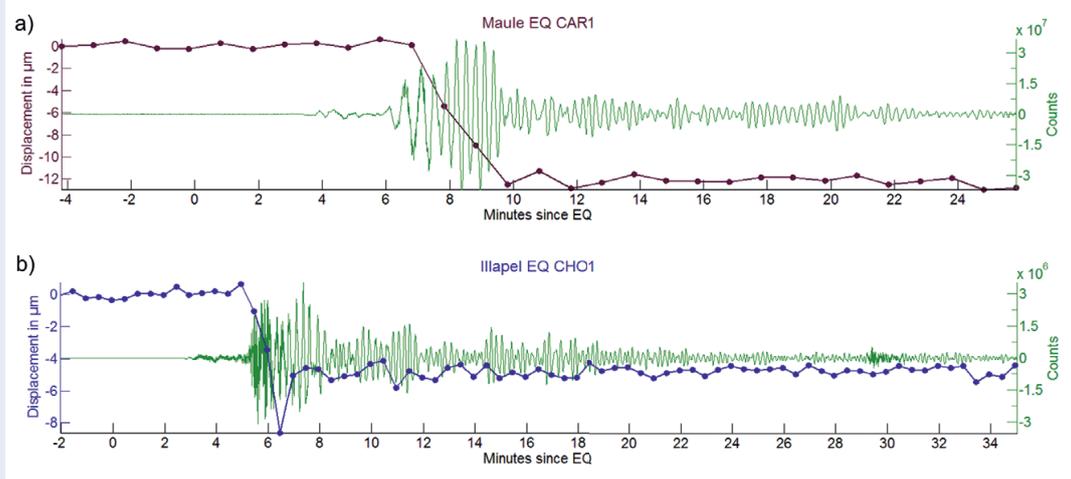


Abb. 5: Beispiele für durch Oberflächenwellen großer Erdbeben ausgelöste Versätze an der AFS, die an den Creepmeter-Stationen aufgezeichnet wurden: a) Das Maule-Erdbeben 2010 (M_w 8,8) in Südchile löste einen kleinen Versatz an der Salar del Carmen-Störung etwa 7 min nach dem Hauptbeben in 1600 km Entfernung aus. Das dazugehörige Seismogramm (grün) zeigt, dass dies zeitgleich mit dem Eintreffen der ersten Oberflächenwellen geschah; b) das Illapel-Erdbeben 2015 (M_w 8,3) löste ebenfalls einen Versatz an der AFS aus. Auch hier ist der Versatz zeitgleich mit dem Eintreffen der Oberflächenwellen des 1100 km entfernten Hauptbebens zu erkennen.

Fig. 5: Examples of remotely triggered fault displacement events recorded on creepmeter stations along the AFS: a) The 2010 M_w =8.8 Maule earthquake in south central Chile triggered fault displacement on every monitored fault during passage of the seismic surface waves. Triggered displacement occurred about 7 min after the mainshock in 1500 km distance; b) The 2015 M_w =8.3 Illapel earthquake likewise triggered surface displacement on the AFS recorded at all creepmeter stations during the passage of the seismic surface wave. Displacement occurred 5 min after the mainshock in 1100 km distance.

Literatur

- Ewiak, O., Victor, P., Oncken, O. (2015): Investigating multiple fault rupture at the Salar del Carmen segment of the Atacama Fault System (northern Chile): Fault scarp morphology and knickpoint analysis. - *Tectonics*, 34, 2, pp. 187-212.
- 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, pp. 299-302.
- Toda, S., Tsutsumi, H. (2013): Simultaneous Reactivation of Two, Subparallel, Inland Normal Faults during the Mw 6.6 11 April 2011 Iwaki Earthquake Triggered by the Mw 9.0 Tohoku-oki, Japan, Earthquake. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 2B, pp. 1584-1602.
- Victor, P., Schurr, B., Brändlein, D., Klotz, J., Ritter, O., Asch, G., Walter, T. R., Sobiesiak, M., Oncken, O. (2011): Beobachtung der letzten Phase eines seismischen Zyklus in Nordchile: IPOC – europäisch-südamerikanisches Netzwerk. - *System Erde*, 1, 1, pp. 24-29.
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J. (1994): New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 4, pp. 974-1002.
- Wesnousky, S. G. (2006): Predicting the endpoints of earthquake ruptures. - *Nature*, 444, 7117, pp. 358-360.

Satellitengeodäsie und Erdbeben- deformation in der nordchilenischen seismischen Lücke

Marcos Moreno, Sabrina Metzger, Jonathan Bedford, Felix Hoffmann, Shaoyang Li, Zhiguo Deng, Jürgen Klotz, Onno Oncken
Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam

Subduction earthquakes are the most powerful naturally occurring terrestrial processes often resulting in catastrophic fatality counts and decimation of human infrastructure. Over the past decades, great efforts have been undertaken to improve the understanding of the subduction earthquake physics. The Integrated Plate Boundary Observatory in Chile (IPOC) is a multi-instrument network installed in 2007 in the Northern Chile Seismic Gap, where a large magnitude earthquake was expected soon. On April 1st 2014, a portion of the IPOC-monitored region broke, producing the Mw 8.1 Iquique earthquake. In the year leading up to this event, IPOC's instruments captured some unusual transient seismic and geodetic signals, resulting in a unique dataset recording the preparatory phase of a large earthquake. We combined IPOC data with satellite radar interferometry (InSAR) data to analyze not only the earthquake itself but also the interseismic phase and a detailed foreshock series before the main event. We found that the earthquake ruptured a zone on the plate interface that was highly locked before the earthquake. Additionally, we were able to characterize the aseismic (silent) slip that occurred in the two weeks leading up to the event by combining seismic and geodetic data. Application of these analyses in real-time might enable geoscientists to identify runaway processes that can precede large subduction earthquakes.



Die Wucht großer Erdbeben entlang von Subduktionszonen endet meist in einer Katastrophe für die Bevölkerung und die Infrastrukturen. Nirgends wird auf der Erde mehr Energie auf natürliche Weise rasch freigesetzt als bei Subduktionsbeben. Bei hohen Plattenkonvergenzraten wird an der verhakten Trennfläche zweier Kontinente enorme Spannung aufgebaut, die in großen ($M_w > 8$) respektive gigantischen ($M_w > 9$) Erdbeben mit Bruchlinien von 100 bis zu 500 km Länge wieder freigesetzt wird. Nur dank der genauen Analyse der kleinsten seismischen und aseismischen Verschiebungen können die Prozesse besser verstanden werden, welche zur Aufladung seismischer Energie vor und zur Freisetzung während eines großen Erdbebens führen. Mit dem Integrated Plate Boundary Observatory Chile (IPOC, Schurr *et al.*, 2016) beobachtet das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ in Zusammenarbeit mit weiteren internationalen Partnerinstitutionen dieses Gebiet engmaschig. Mit 50 fest installierten GPS-Empfängern und 70 Kampagnenpunkten verfügt das IPOC über eine dichte instrumentelle Abdeckung. Die räumliche und zeitliche Deformation dieses Untersuchungsgebiets kann somit mit einer noch nie dagewesenen Präzision vermessen werden.

Aufgebaut wurde IPOC in der sogenannten nordchilenischen seismischen Lücke, in welcher seit dem letzten gigantischen Beben 1877 ($M_w \sim 9$) kein großes Beben stattfand – bis zum 1. April 2014, als das Iquique-Erdbeben das mittlere, nördliche Segment der Lücke nach einer langen Serie kleiner Vorbeben durchbrach. Die IPOC-Instrumente haben dieses Ereignis hochpräzise aufgezeichnet. Für die Forscherinnen und Forscher ist dies ein Glücksfall. So konnten diese Daten mit interferometrischen Verschiebungskarten von Radarsatelliten (InSAR) und numerischen Modellen kombiniert werden, um die Kinematik der Plattentrennfläche über den Zeitraum eines gesamten Erdbebenzyklus zu beschreiben.

Links: Installation eines GPS-Instruments auf einem Kampagnenmesspunkt des IPOC-GPS-Netzwerks. Der Messpunkt liegt auf dem Altiplano in 4200 m Höhe nahe dem Salar del Huasco (Hintergrund) und der Grenze zwischen Chile und Bolivien. (Foto: M. Moreno, GFZ)

Left: Installation of a GPS instrument on a periodically measured GPS marker of the IPOC GPS network. The marker is located on the Altiplano at 4200 m altitude near the Salar del Huasco (background) and the national boundary between Chile and Bolivia.

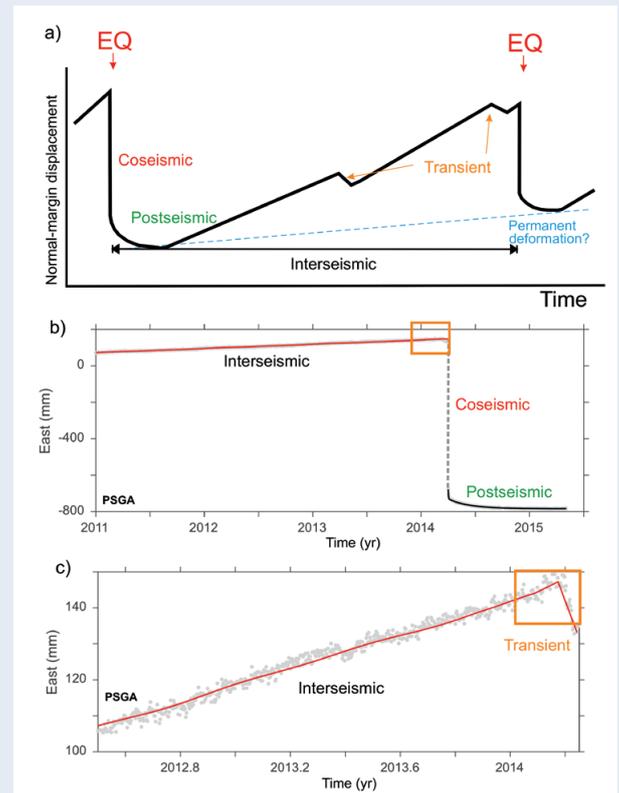


Abb. 1: Oberflächendeformation während eines Erdbebenzyklus als a) schematisierte Darstellung zwischen zwei großen Subduktionsbeben und b) als beobachtete GPS-Tageslösungen der GPS-Station PSGA vor, während und nach dem Iquique-Erdbeben 2014. Eine transiente Deformation kurz vor dem Hauptbeben (orange Quadrat) wird vergrößert in c) dargestellt. (Abb.: GFZ)

Fig. 1: Surface deformation during an earthquake cycle a) schematized between two large subduction earthquakes and b) as observed (daily solutions) of the GPS Station PSGA before, during and after the Iquique Earthquake 2014. Transient deformation preceding the main shock is highlighted in the orange box and shown enlarged in c).

Deformation in Subduktionszonen während eines Erdbebenzyklus

Erdbeben entstehen durch das wiederholte mechanische Wechselspiel von Aufladen und Freisetzen von Energie entlang von Plattengrenzen. Ein Erdbebenzyklus umfasst dabei die Zeitspanne von einem großen Erdbeben bis zum nächsten. Die tektonischen Prozesse innerhalb eines Zyklus umfassen dabei die ganze Bandbreite an Geschwindigkeit und Signalstärke (mm/a bis m/s). Ein Zyklus besteht normalerweise aus drei Phasen (Abb. 1a): der langsame und stete Belastungsanstieg (interseismische Phase), die Freisetzung der Belastung durch Erdbeben (koseismische Phase) und eine transiente Entspannung über Jahre bis Jahrzehnte (postseismische Phase) bis zum erneuten Belastungsanstieg des nächsten Zyklus.



Kontakt: Marcos Moreno
(marcos.moreno.switt@gfz-potsdam.de)

In der interseismischen Phase verursacht das stete Abtauchen der ozeanischen Platte eine anwachsende Belastung des verhakten Teils der Trennfläche zwischen den Platten und eine weitflächige Stauchung des kontinentalen Vorbogens. Interseismische GPS-Deformationsraten auf der kontinentalen Platte sind deshalb meistens parallel zur Bewegungsrichtung der ozeanischen Platte ausgerichtet und nehmen landeinwärts mit zunehmender Distanz zur Plattengrenze ab (Abb. 3). Der Verhakungsgrad der Trennfläche variiert lateral stark und deutet auf extrem stark oder gar nicht verhakete Gebiete hin oder aber auf aseismische Zonen (Moreno et al., 2010). Übersteigt die stetig aufgebaute Belastung eine kritische Grenze, wird sie in der koseismischen Phase blitzschnell in Form elastischer Energie – einem Erdbeben – entladen. Dabei bewegt sich die Kruste in die entgegengesetzte Richtung und die tektonische Belastung wird neutralisiert. Die Stärke der Verschiebung kann entlang der Trennfläche stark variieren und korreliert oft mit jenen Gebieten, welche während der interseismischen Phase besonders stark verhakt waren (z. B. Moreno et al., 2010). Um die seismische Gefährdung besser einschätzen zu können, ist es daher von großer Wichtigkeit, den Verhakungsgrad zu kartieren und dessen physikalischen Ursprung zu verstehen. Die postseismische Phase ist definiert durch eine kurze Phase des Nachrutschens (afterslip) während einiger Monate bis Jahre (z. B. Bedford et al., 2013) und einer gleichzeitigen viskoelastischen Entspannung des Erdmantels während einiger Jahre bis Jahrzehnte (Sun et al., 2015) und tritt nur nach großen Erdbeben auf. Die Reibungskraft entlang der Plattentrennfläche wächst wieder an, die Fläche verhakt sich erneut und das System befindet sich in einer weiteren interseismischen Phase. Auch dann kann es zu kleinen, transienten, seismischen oder aseismischen Verschiebungsereignissen kommen (Dragert et al., 2001; Abb. 1a,c), deren Ursprung aber noch ungeklärt ist, da es bisher nur wenig dokumentierte Beispiele gibt (z. B. Schurr et al., 2014).

Satellitengeodäsie

GPS-Beobachtungen mit einer Genauigkeit von Millimetern bilden seit Anfang der 1980er Jahre die Datenbasis für physikalische Erdbebenmodelle. Im Gegensatz zu seismischen Beobachtungen dokumentieren sie auch aseismische Verschiebungen. Bei gesicherter Datenkommunikation stellen kontinuierliche GPS-Messstationen die Plattenbewegungen (nahezu) in Echtzeit bereit. Erste Bestrebungen, die Erdoberflächenbewegungen des chilenischen Plattenrands zu messen, gab es am GFZ ab 1993 (Klotz et al., 2001). Heute umfasst das Kampagnen-GPS-Netzwerk des GFZ inklusive den IPOC-Punkten über 300 Messpunkte entlang der 3000 km langen Plattengrenze (Abb. 2). Dank der regelmäßigen Vermessung kann jeder Region die entsprechende Phase des seismischen Zyklus' zugeordnet werden (z. B. Klotz et al., 2001; Moreno et al., 2010). Darüber hinaus betreibt das GFZ neun kontinuierli-

che IPOC-GPS-Stationen, deren Daten gemeinsam mit seismischen Daten an alle Kooperationspartner übermittelt werden. Das GFZ prozessiert diese Daten mit dem hauseigenen Programm EPOS8 (Earth Parameter and Orbit determination System), berechnet mit Hilfe von Netzwerklösungen die täglichen Positionskordinaten und stellt diese allen Partnern zur Verfügung (<https://kg3-dmz.gfz-potsdam.de/ipoc>).

Eine weitere satellitengeodätische Methode, welche die GPS-Daten ergänzt, ist die Radar-Satelliteninterferometrie (InSAR). Die Methode hat sich nach dem Start der europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1 und -2 zu Beginn der 1990er Jahre als Verfahren zur Beobachtung tektonischer Prozesse auf unterschiedlichen Zeitskalen etabliert. Dabei werden zwei Radarbilder verglichen, welche zu verschiedenen Zeiten dieselbe Region zeigen. Die Differenz der Wellenphasen ergibt die Verschiebung, ausgedrückt in farbkodierten Interferenzstreifen, welche den Phasenkreis durchlaufen (siehe Beispiel in Abb. 4). Die Aufsummierung der Streifen ergibt die Bodenverschiebung in Sichtlinie relativ zu einem Referenzpunkt innerhalb des Satellitenbilds. Atmosphärische und topographische Signalkomponenten werden, wenn möglich, mit Hilfe von Wetter- oder Höhenmodellen herausgerechnet. Die Genauigkeit von InSAR-Daten liegt im Bereich von Zentimetern oder sogar Millimetern, falls eine Zeitreihenanalyse von mehreren Radarbildern vorliegt (z. B. Metzger und Jónsson, 2014).

Die partielle Schließung der seismischen Lücke in 2014 durch das Iquique-Erdbeben

Eine erste Analyse der IPOC-Daten sowie älterer GPS-Kampagnendaten hat gezeigt, dass der Verhakungsgrad der nordchilenischen seismischen Lücke stark variiert (Abb. 3). Dabei wurde der Versatz auf der Plattengrenze mittels finiter Elemente beschrieben, welche auch die viskoelastische Reaktion auf den konstanten Druckaufbau berücksichtigen (Li et al., 2015). Das resultierende Modell zeigt eine heterogene Verhakung mit zwei stark verhakten Gebieten, die durch eine kriechende Fläche getrennt sind. Am Rand der seismischen Lücke scheint die Plattengrenze nur leicht verhakt. Am südlichen Ende der Lücke markiert die Mejillones-Halbinsel (Abb. 2) eine Brücke zum stark verhakten Gebiet weiter südlich, welches das letzte Mal beim Antofagasta-Erdbeben 1995 zerbrochen ist. Das Iquique-Erdbeben durchbrach nun das mittlere, nördliche Segment der nordchilenischen Lücke (Abb. 4) (z. B. Schurr et al., 2014; Duputel et al., 2015). Die IPOC-GPS-Stationen registrierten koseismische Verschiebungen in Richtung des Tiefseegrabens von bis zu 84,7 cm und 24,4 cm Absenkung. Ein Interferogramm zweier Radarbilder des kanadischen Satelliten RADARSAT-2 zeigt mehr als 22 konzentrische Interferenzstreifen mit einem Zentrum 60 km vor der Küste auf etwa 19,8° südlicher Breite (Abb. 4). Mit einer Signalwellenlänge von 5,6 cm und unter Berücksichtigung der doppelten Signallaufzeit entspricht dies mehr als

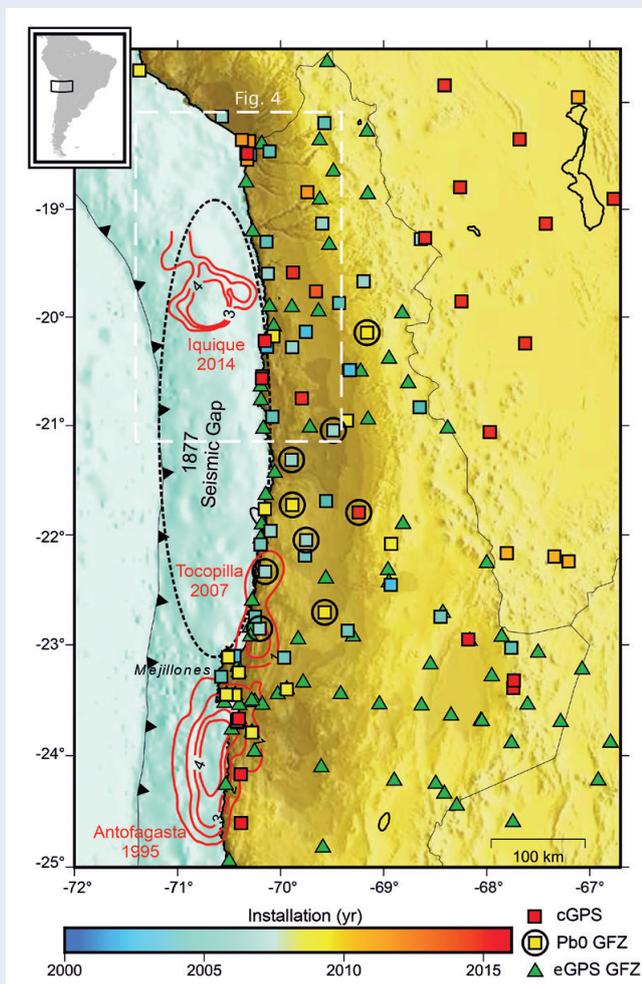


Abb. 2: Karte des IPOC-GPS-Netzwerks; kontinuierliche GPS-Stationen (cGPS) sind mit Quadraten und einer zeitlich aufgelösten Farbgebung des jeweiligen Messbeginns gekennzeichnet. Schwarz eingekreiste Stationen markieren die Stationen des GFZ-Plattenrandobservatoriums- (PbO) und Dreiecke die Kampagnen-GPS-Messpunkte (eGPS). Die Versatzmodelle der letzten großen Erdbeben sind mit roten Linien markiert (Iquique: Duputel et al., 2015; Tocopilla, Antofagasta: Schurr et al., 2014), der Tiefseegraben mit einer schwarzen Linie und Dreiecken, die nordchilenische seismische Lücke mit einer schwarzen Ellipse und das Ausmaß der Karte in Abb. 4 mit einem weißen Rechteck. (Abb.: GFZ)

Fig. 2: Map of the full IPOC GPS network including campaign markers (triangles) and continuously operating GPS instruments (cGPS). The latter are color-coded by the first date of data acquisition and black circles mark plate boundary observatory (PbO) stations. Triangles mark campaign GPS markers (eGPS). The trench (black line and triangles) marks the upper end of the plate boundary. Slip models of the last large earthquakes are marked by red lines (Iquique: Duputel et al., 2015; Tocopilla, Antofagasta: Schurr et al., 2014), the 1877 seismic gap by black dashed and the extent of Fig. 4 by the white dashed rectangle.

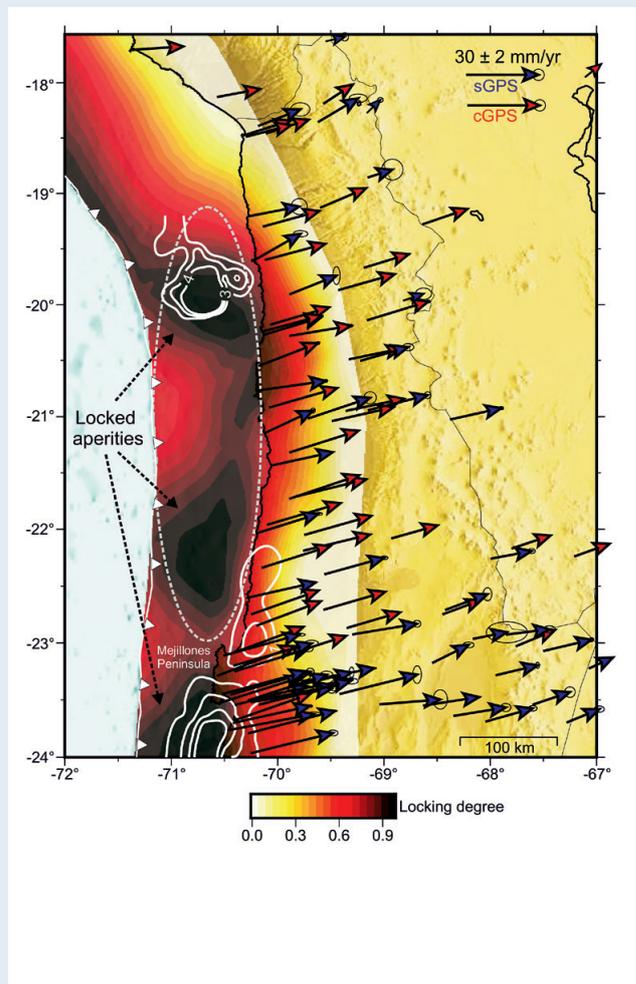


Abb. 3: Interseismische GPS-Geschwindigkeiten und Verhakungsgrad vor dem Iquique-Erdbeben 2014 und Versatzmodelle der letzten großen Erdbeben (weiße Linien, Duputel et al., 2015; Schurr et al., 2014). Geschwindigkeiten der kontinuierlichen (in rot) und episodischen GPS-Messungen (in blau) sind symbolisch als Pfeile dargestellt. Die Verhakungskarte entlang der Plattengrenze (weiße Linie mit Dreiecken) zeigt komplett verhakte Zonen in schwarz-dunkelrot und frei rutschende Zonen in hellgelb-weiß. Die vom Iquique-Beben tangierte Trennfläche war vor dem Beben stark verhakt. (Abb.: GFZ)

Fig. 3: Interseismic GPS velocities (red arrows: continuous measurements, blue arrows: campaign measurements), color-coded locking degree of the plate boundary along the trench (white line and triangles) before the 2014 earthquake and slip models of the recent large earthquakes (Duputel et al., 2015; Schurr et al., 2014). Freely slipping zones are marked in white-yellow, locked zones in black-red. The area co-located with the rupture plane of the Iquique earthquake was highly locked before the event.

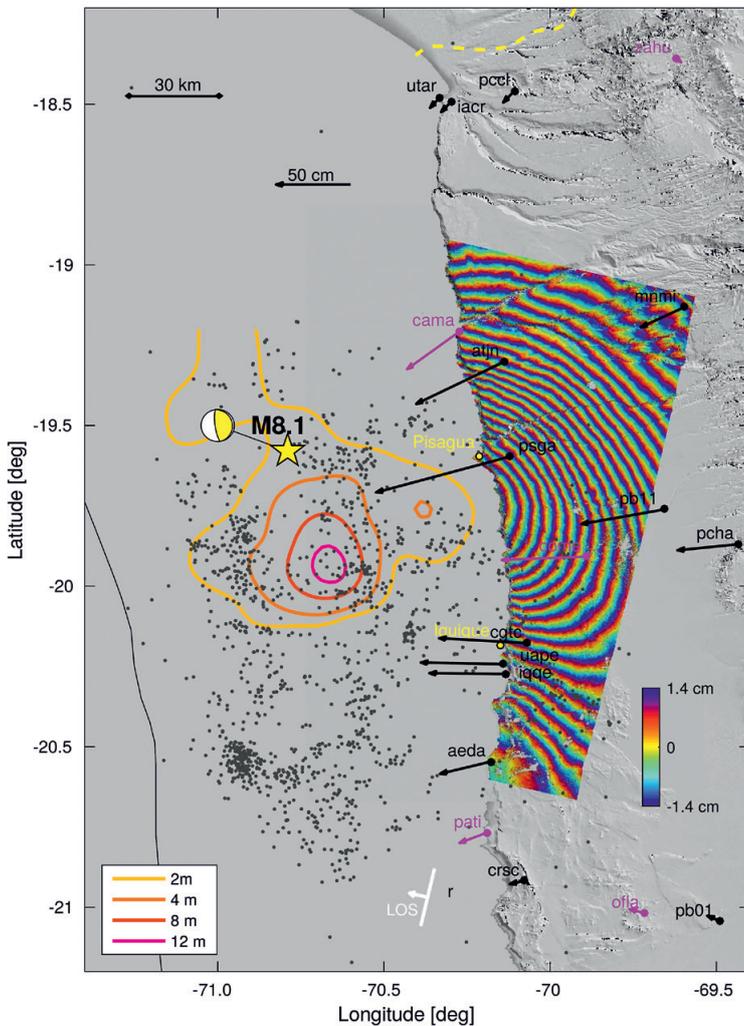


Abb. 4: Koseismischer Versatz des Iquique-Bebens 2014 (das Epizentrum ist mit einem gelben Stern markiert), gemessen mit GPS und InSAR. Schwarze Pfeile zeigen kontinuierliche, pinke episodische GPS-Daten. Jeder Interferenzstreifen des RADARSAT-2-Interferograms entspricht 2,8 cm relativer Verschiebung in Sichtlinie des Satelliten (weißer Pfeil). Das Trennflächen-Versatz-Modell (farbige Linien; Duputel et al., 2015) und die Epizentren der Nachbeben (graue Punkte) sind ebenfalls eingezeichnet. (Abb. GFZ)

Fig. 4: Co-seismic offset of the 2014 Iquique Earthquake (epicenter marked with a yellow star) as observed with GPS (black arrows: continuous data, pink arrows: campaign data) and InSAR data. Each interferometric fringe corresponds to 2.8 cm relative displacement in line-of-sight from the Radarsat-2 satellite (white arrow). The epicenter of the color-coded slip-model (Duputel et al., 2015) and aftershocks (grey dots) are indicated next to the fault trench (black line).

61 cm Verschiebung in Sichtlinie. Das Hauptbeben verursachte mehr als 5 m Versatz auf einer relativ kleinen Fläche der Plattengrenze von 80 km x 80 km, welche praktisch deckungsgleich mit einem der zwei stark verhakten Gebiete ist (Abb. 4, Schurr et al., 2014; Duputel et al., 2015). Die Ruptur stoppte bei der kriechenden Zone, die wahrscheinlich wie eine Barriere wirkte. Das Beben hat nur einen Bruchteil der seit 1877 in der seismischen Lücke gespeicherten Energie freigesetzt. Das Potenzial für weitere große Erdbeben bleibt deshalb insbesondere im südlichen Teil der seismischen Lücke bestehen. Die hier gespeicherte elastische Energie entspricht einem Erdbeben mit mindestens Magnitude 8,5.

Vorausgehende Aktivitäten des Iquique-Erdbebens

Das Iquique-Beben wurde über zwei Wochen von einer Vorbebenreihe und transientser Deformation eingeleitet (Abb. 1c). Die größte und prominenteste Serie von Vorbeben begann mit einem Beben der Magnitude 6,7 und dauerte vom 16. März 2014 bis zum Hauptbeben am 1. April 2014. Diese vom IPOC-Netzwerk registrierten Signale gehören zu den detailliertesten Aufzeichnungen von Vorläufern großer Erdbeben (Schurr et al., 2014; Bedford et al., 2015). Die Vorbeben durchbrachen erst den Rand des stark verhakten Gebiets und näherten sich dem

Epizentrum des Hauptbebens. Die Vermutung liegt nahe, dass die Vorläufer und das Hauptbeben mechanisch gekoppelt waren. Die Plattengrenze begann sich nämlich schon vor dem Hauptbeben langsam zu entkoppeln, was den Druck auf die benachbarte, stark verhakten Zone vergrößerte und schlussendlich zum akuten Bruch führte. Mit Hilfe der GPS-Daten und der seismischen Herdmechanismen der Vorbeben konnte abgeschätzt werden, wieviel Krustenbewegung durch die seismischen Vorläufer verursacht wird und wieviel durch aсейsmische Prozesse (Bedford et al., 2015). Dabei wurde die Oberflächenbewegung einzelner GPS-Stationen basierend auf den Vorbeben modelliert und mit den tatsächlich beobachteten Verschiebungen verglichen (Abb. 5). Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die GPS-Stationen direkt nach den größten Vorbeben zusätzlich aсейsmische, also für die Seismometer nicht registrierbare Bewegungen gemessen hatten. Diese Erkenntnis bildet einen wichtigen Baustein zum verbesserten Verständnis der Initialisierung großer Erdbeben.

Herausforderungen der Zukunft

Zeitlich und räumlich hochaufgelöste GPS- und InSAR-Beobachtungen bilden die Grundlage neuartiger Modelle und haben gemeinsam mit seismischen Daten zur Entdeckung kleinster

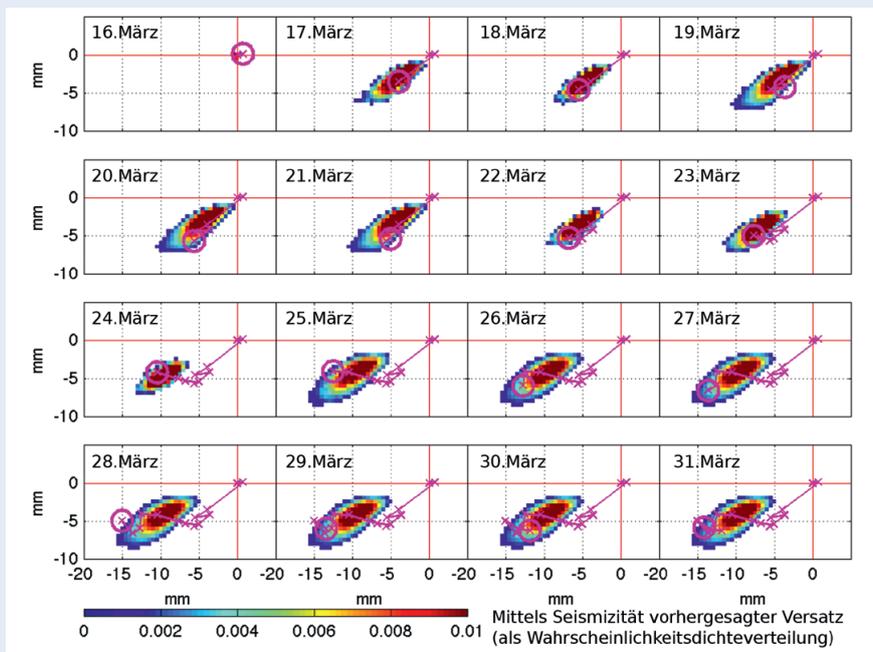


Abb. 5: Kumulative transiente Bewegungen einer GPS-Station kurz vor dem Iquique-Erdbeben (in pink; Kreuze bezeichnen Tagespositionen) im Vergleich zur berechneten Position, basierend auf Vorbeben Daten (GEOFON-Erdbebenkatalog, <http://geophon.gfz-potsdam.de>). Die farbkodierte Wahrscheinlichkeitsverteilung der berechneten Position entspricht dem 95 %-Fehlerbereich des kumulierten Versatzes. (Abb.: GFZ)

Fig. 5: Daily transient offset observations (cumulative; pink crosses and lines) of a GPS Station shortly before the Iquique earthquake in comparison to predicted offsets based on foreshocks (GEOFON catalogue, <http://geophon.gfz-potsdam.de>). The color coded probability density function is equal to 95 %-uncertainties of the cumulative offset.

Details der Plattenbewegung geführt (z. B. Schurr *et al.*, 2014). Die instrumentelle Beobachtung der seismogenen Zone der Plattengrenze kann relativ kostengünstig mit zusätzlichen kontinuierlichen GPS-Stationen an strategisch wichtigen Positionen verbessert werden. Weitere fünf bis zehn kontinuierliche GPS-Stationen sind in Zusammenarbeit mit dem chilenischen seismologischen Dienst bereits in Planung. Mit dem verdichteten Netzwerk können z. B. langsame, aseismische Versätze über eine Zeitskala von Stunden bis Wochen aufgezeichnet werden. Im InSAR-Bereich verdichten sich die regelmäßigen Aufnahmen dank neuer Satellitenmissionen zu Zeitspannen von weniger als einer Woche.

Bei Subduktionszonen sind satellitenbasierte geodätische Messmethoden meist auf die Landmassen der kontinentalen Platte limitiert. Beim Modellieren kann daher nur die eine, kontinentale Seite des Modellraums mit realen Beobachtungen verifiziert werden, was zu ungenügend bestimmten oder sogar instabilen Modellparametern führt. Messdaten von der ablandigen Seite des Tiefseegrabens wären daher äußerst wertvoll für die Aussagekraft der Modelle. Hier bieten sich Unterwasser-GPS-Instrumente an, wie sie z. B. in Japan erfolgreich installiert und ausgewertet wurden (Sato *et al.*, 2011). Das GEOMAR hat im Jahr 2016 vor der chilenischen Küste insgesamt 23 Transponder im Rahmen des GeoSEA-Projekts installiert (Schurr *et al.*, 2016), die Versätze des Seebodens mit Millimeter-Genauigkeit registrieren können.

Literatur

- Bedford, J., Moreno, M., Baez, J. C., Lange, D., Tilmann, F., Rosenau, M., Heidbach, O., Oncken, O., Bartsch, M., Rietbrock, A., Tassara, A., Bevis, M., Vigny, C. (2013): A high-resolution, time-variable afterslip model for the 2010 Maule Mw = 8.8, Chile megathrust earthquake. - *Earth and Planetary Science Letters*, 383, pp. 26-36.
- Bedford, J., Moreno, M., Schurr, B., Bartsch, M., Oncken, O. (2015): Investigating the final seismic swarm before the Iquique-Pisagua 2014 Mw 8.1 by comparison of continuous GPS and seismic foreshock data. - *Geophysical Research Letters*, 42, 10, pp. 3820-3828.
- Dragert, H., Wang, K., James, T. S. (2001): A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface. - *Science*, 292, 5521, pp. 1525-1528.
- Duputel, Z., Jiang, J., Jolivet, R., Simons, M., Rivera, L., Ampuero, J.-P., Riel, B., Owen, S. E., Moore, A. W., Samsonov, S. V., Ortega Culaciati, F., Minson, S. E. (2015): The Iquique earthquake sequence of April 2014: Bayesian modeling accounting for prediction uncertainty. - *Geophysical Research Letters*, 42, 19, pp. 7949-7957.
- Klotz, J., Khazaradze, G., Angermann, D., Reigber, C., Perdomo, R., Cifuentes, O. (2001): Earthquake cycle dominates contemporary crustal deformation in Central and Southern Andes. - *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 3-4, pp. 437-446.
- Li, S., Moreno, M., Bedford, J., Rosenau, M., Oncken, O. (2015): Revisiting viscoelastic effects on interseismic deformation and locking degree: A case study of the Peru-North Chile subduction zone. - *Journal of Geophysical Research*, 120, 6, pp. 4522-4538.
- Metzger, S., Jónsson, S. (2014): Plate boundary deformation in North Iceland during 1992–2009 revealed by InSAR time-series analysis and GPS. - *Tectonophysics*, 634, pp. 127-138.
- Moreno, M., Rosenau, M., Oncken, O. (2010): 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. - *Nature*, 467, 7312, pp. 198-202.
- Sato, M., Ishikawa, T., Ujihara, N., Yoshida, S., Fujita, M., Mochizuki, M., Asada, A. (2011): Displacement above the Hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. - *Science*, 332, 6036, p. 1395.
- Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoehner, 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, pp. 299-302.
- Schurr, B., Kopp, H., Asch, G., Tilmann, F., Oncken, O. (2016): Das Knacken, Knistern und Knirschen beim Verschlucken einer kalten Platte – Das IPOC-Observatorium überwacht seit zehn Jahren die Subduktionszone in Nordchile. - *System Erde*, 6, 2, pp. 22-29.
- Sun, T., Wang, K. (2015): Viscoelastic relaxation following subduction earthquakes and its effects on afterslip determination. - *Journal of Geophysical Research*, 120, 2, pp. 1329-1344.

Interview

(Foto: E. Gantz, GFZ)

Forschen in Südamerika

Interviews mit fünf Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern

► Interview mit Isabel Urrutia Ulloa

What was the particular reason to apply for a PhD scholarship at the GFZ?

In 2010, a big earthquake occurred in Concepción, the city where I live in Chile. As a consequence of the shake, we had no electricity and water for weeks; our routines were totally affected by the event. I was at home without much to do. Then my professor contacted me to inform me that several teams from Europe were coming to measure the earthquake impact. He was gathering students to work in collaboration with them. So I went to fieldwork and I helped Chilean scientists who work at the GFZ and at the Potsdam University. That is how I was involved with the GFZ and in a project to do research with the GPS data, which they were measuring. So I did my diploma half of the time in Chile, and the other half here in Potsdam.

Could you please describe your research themes?

I am studying the relationship between the recurrence of large earthquakes and the morphology of the landscape. Before, during and after an earthquake, we

observe significant changes of the continental displacements, showing a repeated pattern along time, which seems to leave an imprint on the surface. The question is, can we use this imprint to better understand the kinematic of the plate tectonics and the seismic cycle behavior. By using the surface displacements recorded by GPS and numerical modeling techniques, we infer the displacements that may occur at depth, where the contact of the tectonic plates takes place and the earthquakes are nucleated; and we compare them with the morphological patterns observed on the landscape.

Could you please tell us about some personal impressions during your research stays in Germany?

In general, everything is quite different. At the beginning I felt I was a bit far from the knowledge that people have here. The training is different in Chile. For example I had to improve my computer skills. This was emotionally sometimes difficult.



Für diese Ausgabe von „System Erde“ hat **Christine Bismuth** vom Internationalen Büro am GFZ mit Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern über ihre Erfahrungen während ihrer Forschungsarbeiten in Südamerika gesprochen.

Die Interviews wurden in der Sprache belassen, in der sie geführt wurden.

Kontakt:
Internationales Büro (ib@gfz-potsdam.de)

In your opinion, what are future relevant topics of geoscientific research that address societal and scientific challenges?

There are so many questions without answer. Starting for example that we want to forecast earthquakes. This still is very far, because of the lack of data. This is a huge challenge!

Is damage prevention and risk mitigation an issue in Chile?

Well, we have improved our prevention of damages, especially since the Valdivia earthquake (1960). Seismic services have been improved during the last decades and a competence cluster for natural hazards has been founded. But of course there is still much to do, to improve the communication between government and scientists. Since most of the Universities in Chile are private, there is almost no connection between government and universities. And only few people are interested to do research. Certainly in geosciences we are old fashioned and we need to improve.



Isabel Urrutia Ulloa studierte Geologie an der Universität von Concepción in Chile. Ihre Masterarbeit fertigte sie im Rahmen des MARISCOS-Projekts am GFZ über die numerische Modellierung von Oberflächendeformationen während des seismischen Zyklus' in der Subduktionszone auf den Santa Maria Inseln (37°S) an. Sie promoviert an der FU Berlin im Rahmen des GeoSim-Graduiertenkollegs. In ihrer Dissertation arbeitet sie Zusammenhänge zwischen Deformationsmustern unterschiedlicher Raum-Zeit-Skalen entlang der südamerikanischen Subduktionszone heraus. Betreut wird sie am GFZ von Dr. Marcos Moreno und Prof. Onno Oncken.

(Foto: E. Gantz, GFZ)



(Foto: E. Gantz, GFZ)



What is needed to improve geosciences in Chile?

In my experience, I learned geosciences only by using paper and pen. We need a new generation of scientists. And that is also another reasons why I decided to do a PhD. We need young people to refresh the academy and science in Chile.

What did you like in Germany, Potsdam, at the GFZ? What is not so good?

Well there is a huge difference between Chile and Germany. From the access to information and education until how works the health insurance or even the public transport. For me there is a great tolerance, here I do not experience that kind of sexism like in Chile. I like here, that there are more opportunities and respect for woman.

What would you tell other foreign scientists who are considering a research stay at GFZ?

I would say that research at GFZ is a very interesting and great experience. Even though we have cultural differences, we are complementary, and always there are things to share and learn from each other. It seems to me that Germans are super structured, and are used to have and design specific things for specific tasks. It might be that we Chileans lack this sort of organization and development, but the lack has made us more creative for coming up with new ways to resolve problems. ■



Isabel Urrutia Ulloa bei Geländearbeiten auf der Insel Santa María bei Arauco, Chile
(Foto: D. Melnick, Universität Potsdam)

Renee van Dongen hat an der Universität Wageningen, NL, Erd- und Umweltwissenschaften studiert. In ihrer Masterarbeit analysierte sie die Effekte von Klimawandel und Landmanagement auf die Bodenverteilung und Abflussbedingungen im Awach-Kano-Einzugsgebiet in Kenia. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms EarthShape promoviert sie an der TU Berlin über den Einfluss der Vegetation auf den Sedimenttransport und fluviale Einschnitte in den Küstenkordillieren von Zentralchile. Ihr Betreuer am GFZ ist Jun. Prof. Dirk Scherler.

► Interview mit Renee van Dongen

Could you please give us some background information on the scientific topics of your PhD?

The EarthShape project is looking on the influence of biotic and climatic processes on the formation the Earth surface and the Earth's topography. My part in this project is to look on the influence of vegetation on sediment transports and river incision. First I have to address sediment transport in the catchments with different vegetation covers. Second I have to investigate on discharge variability in catchments with different climate and vegetation. I will also use an ecohydrological model to test hypothesis on the influence of vegetation on river discharge. Finally I will combine the first steps into a river incision model.

Why this kind of research has to be explicitly conducted in Chile and not somewhere else nearer?

The region is our natural laboratory. It is one of the best locations: You are within one country; we stay on the same longitude. We can cover a huge climate-vegetation gradient. Because we want to investigate the influence of climate and vegetation on the evolution of landscapes, we need to have the other conditions constant. All the catchments are from the same lithology. They are situated in the coastal cordillera, which means the catchments are not influenced by the last glacial maximum and there is no volcanic input.

During the fieldwork: Did the local people understand your project?

We had a paper for them explaining the project and showing the partnership with Universities from Chile. When the people saw that Universities from their countries were involved likewise, they believed that it was a research project and they trusted. But sometimes people were asking us what we were doing at the river, as they were afraid that the rivers would be privatized. Companies (or people) in Chile can buy (parts of) rivers, and then they can do everything they want.

Did you make some experience in South America, which according to your opinion should be taken into consideration for other projects or from which other scientists at the GFZ could take advantage?

The first thing that comes on my mind is the attitude of the people, who are more relaxed. Especially in stressful situation, for example you are standing in the middle of nowhere with a flat tire – they say do not worry we will fix it. But on the other hand you have to check on people that they really did what you agreed on they should do. Everything is less easily accessible, not only areas but also data. You have to be a bit more flexible to work there.

In the future, what would be according to your opinion relevant themes of geoscientific research, to address societal and scientific challenges?

The El Niño and La Niña effects. Research shows that those effects are going to increase, but we have to look also on the impact of those events on landscapes, sediment transports and hazards.



*Renee van Dongen
bei der Probennahme
auf 2222 m Höhe
am Cerro El Roble,
Chile
(Foto: S. Stock,
Univ. Göttingen)*

Have you been in areas, which are vulnerable to geohazards, such as droughts and floods?

In the desert, once in 80 years you have one big rain event. We could not easily access on of our sides, because the road was gone, and half of the city was completely flushed away because of a mud stream. The interesting thing was that everybody was building their house again on the same spot. We could identify dangerous areas. Also the Tsunami risk in Chile is quite high. But still people build their houses near the coastline.

Your research project links climate scientists, hydrologists, and geologists. How do you experience this interdisciplinary exchange?

We have ecologists and geologists in the projects. The main difficulty is the time scale and the spatial scale. The geologists are looking on landscape scale and geological scale, while the biologist and the ecologists are looking at bacteria in the soil on a very small scale within a day. The different scales are really challenging but that is also very interesting to look at. We have also to determine terminologies, and we have to agree on repetition for statistical reasons. We have to develop methodologies concerning the interdisciplinary approach. This is definitely our aim within the project. ■

► Interview mit Hugo Soto

What are your research themes?

I have been studying the seismicity before and after the April 2014 M 8.1 Iquique, Chile earthquake, one of the biggest earthquakes that happened in the North of Chile. This is an area where GFZ scientists has been operating the IPOC network (Integrated Plate Boundary Observatory Chile), dedicated to the study of earthquakes and deformation at the continental margin of Chile. Therefore there are many data available, which I am using to study the patterns related to the seismicity of this earthquake.

The first milestone is to create a catalog of the seismic events related to the Iquique earthquake. This earthquake is very interesting because it filled part of the gap of seismicity that was known to exist in the North of Chile. But there still seems to be enough energy stored with the potential to be released in another significant event. This latent potential, added to the unusually long and extensive series of precursor events that prece-

ded the mainshock, make the Pisagua earthquake seismicity a really exciting matter of study.

How would you characterize the specific challenges of a research project in South America?

One specific challenge is to continue making progress in the knowledge of the Chilean subduction zone. For example, it is thought that there should be a relationship between the earthquakes and the mountain formation. But nobody knows exactly the physical nature of this relationship. There are also some theories to describe the structure of the seismogenic zone along the Chilean subduction. But these are still just unverified theories, which need to be analyzed in a deeper way.

Did you make any experience in South America which according to your opinion should be taken into consideration for other projects or from which other scientists at the GFZ could take advantage?

I think that the communication among South American scientists has not been as close as one would like it to be. In this context, GFZ could be an ideal place where other South American researchers could meet and create links, which continue over time after they go back to



Hugo Soto hat in Chile an der Universidad de Concepcion Physik und Geophysik studiert. In seiner Masterarbeit untersuchte er nicht-lineare seismische Wellen. Seine Doktorarbeit an der FU Berlin zu den seismischen Mustern vor und nach dem großen Iquique-Erdbeben in Chile 2014 wird von Prof. Onno Oncken, Prof. Frederik Tilmann und Dr. Bernd Schurr betreut.

(Foto: E. Gantz, GFZ)

their countries. In this sense, GFZ could be a bridge not only to connect people involved in geoscience, but also to share data of common interest.

In your opinion what are future relevant themes of geoscientific research that address societal and scientific challenges?

I think that at least in Chile there is still missing a solid link between the geophysics in itself, geoscience researchers and the people not related to science. If this connection were stronger, the people would be better prepared when facing geophysical phenomena like earthquakes, volcano eruptions and tsunami. It is our responsibility as scientists to be in contact not only with the people who are not involved in science, but also with those who make the decisions like politicians and with the media. Unfortunately the Chilean media either do not give enough information or it is so vague and ambiguous. This is something that needs to be revised and improved.

What did you like in Germany, Potsdam, at the GFZ? What was not so good?

What I really like in Germany is the public transport! This is really different and

broader than in Chile. Here you find trains, subways, trams and busses, which 80 % of the time are on time! And whatever the time may be, you always find how to go back home. Maybe the weather is not so pleasant, but really most of the things seem to work well enough. I like the country.

What would you tell other foreign scientists who wish to do research at the GFZ?

I would tell them that if they have the opportunity to come here and to do research at the GFZ they should take advantage of this. Because GFZ is a great place to do scientific research in geoscience, where you can always find the right person who can answer your questions or guide you if any problem shows up.

Research at GFZ is done in a multidisciplinary way. There are researchers from very different fields, who through their varied points of view enrich the discussion on a specific subject. In my opinion, this is a more appropriate way to address a problem, than in an institution focused in studying only about one research area. ■

► Interview mit Felix Hoffmann

Was sind Ihre Forschungsthemen?

Mein Forschungsthema ist die Beobachtung des seismischen Zyklus an der Subduktionszone der Westküste Südamerikas am Beispiel des Iquique-Bebens 2014 in Nordchile. Während Hugo Soto seismische Daten verwendet, analysiere ich geodätische Daten. Ich schaue mir die Oberflächenbewegungen an, die im Zuge des Bebens von Satelliten aufgenommen wurden. Diese führe ich auf ein inverses Modell des Untergrunds zurück. Die Geometrie meines Modells bildet dabei die Oberfläche bzw. das „Interface“ der subduzierenden Nazca-Platte ab. Wir haben kontinuierliche GPS-Stationen vor Ort, die täglich Daten liefern. Dazu haben wir Kampagnendaten. Einmal im Jahr stellen wir eine Antenne auf und messen die Daten über mehrere Tage und haben damit einen Vergleich zum Vorjahr. InSAR heißt Interferometric Synthetic Aperture Radar, das ist eine Methode, bei der ein Satellit ein Radarbild vom Boden macht, und dann kommt derselbe Satellit eine Woche später und macht ein weiteres Bild von derselben Stelle. Diese Bilder werden übereinander gelegt – es wird ein Interferogramm gebildet. Oberflächenbewegungen werden als Phasenunterschiede des imaginären Anteils der Radarwelle dargestellt. Wir führen das auf eine Deformation zurück, die im Zuge eines Erdbebens stattfand. InSAR eignet sich besonders gut für Nordchile, weil es dort kaum Vegetation gibt. Ein solches Interferogramm kann mehrere 100 km abdecken, was wichtig ist für das langwellige tektonische Signal, das wir untersuchen.



*Hugo Soto am Geysirfeld von El Tatio bei San Pedro de Atacama, Chile
(Foto: Universidad de Concepcion)*

Felix Hoffmann auf dem Gipfel des Vulkans Láscar, in dessen Nähe mehrere Kampagnen-GPS-Punkte liegen (Foto: GFZ)



Gibt es ganz besondere Aspekte in Ihrer Forschungsarbeit, die nur in Südamerika zur Anwendung gekommen sind?

Wir haben ein extrem schnelles Wiederkehrintervall von Erdbeben an dieser Subduktionszone. In anderen tektonisch aktiven Regionen der Erde ist dies selten. In Chile passieren extrem viele Erdbeben in kurzer Zeit. Es gab ein großes anderes Event in der jüngsten Vergangenheit in Chile: das Maule-Erdbeben 2010 (Mw 8,8), das vom GFZ untersucht wurde. Es ist eine einzigartige Situation, dass sich die Forscher quasi auf ein nächstes größeres Erdbeben vorbereiten konnten. In Nordchile war ein Erdbeben überfällig, da das letzte größere Beben 1877 registriert wurde. Deswegen gibt es dort ein einzigartiges GPS-Netzwerk im Zuge des IPOC-Projekts.

Was sind die besonderen Herausforderungen eines Projekts in Südamerika?

Zum einen die Entfernung. Diese lässt die Kosten eines solchen Projektes natürlich steigen. Wir brauchen vor Ort unbedingt ein Netzwerk von Chilenen, die sich auskennen. Das klappt ganz gut. Es ist aber schwierig über Ländergrenzen hinaus zu gehen. Es gibt z. B. auch in Peru Stationen. Aber wir könnten während unserer Kampagnenmessungen nicht einfach über die Ländergrenzen hinausgehen und dort etwas aufbauen, obwohl die Tektonik natürlich Ländergrenzen ignoriert. Das würde sicherlich Probleme geben. Die regionale Zusammenarbeit ist kaum vorhanden. Das ist teilweise schade, weil wir eigentlich Daten aus anderen Ländern als Chile benötigen würden.

Was wären Ihrer Ansicht nach die nächsten wichtigsten Themen für Südamerika, sowohl wissenschaftlich wie auch gesellschaftspolitisch?

Von wissenschaftlicher Seite wäre es wichtig, das Netzwerk zu bewahren und vielleicht sogar auszudehnen, sowohl von den Instrumenten wie auch von den Leuten. Es hilft, chilenische Kollegen in die Arbeit zu integrieren. Es würde nichts bringen, wenn nur Deutsche das machen würden.

Zum nicht wissenschaftlichen Teil: Chiles Wirtschaft ist sehr stark vom Kupfer abhängig. Der Kupferbergbau macht aber auch einige Probleme. Es liegt in unserer Verantwortung, auf die Chilenen einzuwirken, dass wenn der Kupferbergbau einmal nicht mehr möglich ist, sie ihre Wirtschaft auf anderen Standbeinen aufbauen. Der Reichtum des Landes steht und fällt mit den Kupferminen. Die jungen Leute haben kaum eine Perspektive. Das ganze Bildungssystem in Chile kostet sehr viel Geld. Viele müssen einen Kredit aufnehmen und in den ersten Arbeitsjahren müssen hohe Summen abbezahlt werden. Der Appell an uns ist, dass wir vielleicht nicht nur Doktoranden sondern auch Studenten mit Stipendien unter die Arme greifen. ■



Felix Hoffmann hat während seines Masterstudiums der Geowissenschaften an der Universität Potsdam zu InSAR-Beobachtungen in Nordostargentinien zu aktuellen Veränderungen der Erdkruste im Inneren des Gebirgsplateaus gearbeitet. Seine Doktorarbeit fertigte er im Rahmen des GeoSim-Projekts zu Oberflächenbewegungen an der Subduktionszone der Westküste Südamerikas an. Sein Betreuer am GFZ ist Prof. Onno Oncken.

(Foto: E. Gantz, GFZ)

► Interview mit Begoña Parraquez

What was your motivation to apply for a PhD position at the GFZ?

I studied at the University of Concepcion first Physics and then Geophysics. After my studies I worked for four years at the Chilean Navy Hydrographic and Oceanographic Service within the Chilean National Tsunami Warning Center (SNAM). The work was very nice, because I worked on Tsunamis. In 2014 we had a very big earthquake, the Iquique earthquake, and I was monitoring the Tsunami during this moment. This was a very exciting and important moment in my life. When I was at the University I developed a technique the teleseismic tomography. The tomography is the same we use in medicine, when we use x-ray to observe the brain or other parts of the body. You use the seismic waves to study the Earth. I study the Peninsula the Mejillones, in the North of Chile. The peninsula is situated southern of a big seismic gap in the North of Chile. The Iquique earthquake is the last earthquake in this gap. All the people thought when the earthquake occurred in the North, that the rupture zone would fill the whole gap. But the Iquique Earthquake is in the middle. The Mejillones Peninsula is in the end of this gap. This is a very special place, because the peninsula divides the northern and the southern part of this area and stopped the earthquake. With teleseismic local tomography we want to see what happened below the peninsula. We are interested in studying the velocity and its change. We generate a view picture, in slice and profile where you can see what happened with the ocean plate when it is subducted. Like that you can observe what happened below the peninsula. I studied very well the Tsunami in Iquique. When you are investigating you need to show the results to the people.

Begoña Parraquez studierte Physik und Geophysik an der Universidad de Concepcion in Chile. Nach ihrem Masterabschluss arbeitete sie für vier Jahre im Tsunami-Frühwarnzentrum am chilenischen Marineinstitut für Hydrographie und Ozeanographie. Von 2012 bis 2013 leitete sie die operative Abteilung des Zentrums. Sie war für den Betrieb, die Kommunikationsprotokolle und für die Ausbildung der Angestellten wie auch für die Tsunamiwarnung verantwortlich. Am Zentrum erlebte sie das große Iquique-Erdbeben 2014. Dieses Erdbeben war Anlass und Motivation für die Wiederaufnahme ihrer Studien und für ihre Doktorarbeit an der FU Berlin. Sie untersucht mit seismischen Tomographieverfahren die Struktur der Megathrust-Unterbrechung bei Mejillones. Professor Onno Oncken und Dr. Bernd Schurr sind ihre Betreuer am GFZ.



(Foto: E. Gantz, GFZ)

Because the people need to know what happened during the Earthquake and during the Tsunami. This is my first motivation. I am less interested in publishing a lot of papers, when people do not know what happen. I feel a great responsibility for the people, because Tsunamis are very dangerous.

How did you get into contact with the GFZ?

I was working with the Navy, a nice job with a lot of responsibility. This job however was only operative, you do not investigate. To understand what happened, I felt I needed more knowledge, and I wanted to study again. So I talked with a professor at the University, and he told me about Dr. Schurr and the IPOC network here at the GFZ.

What are your specific research themes?

With this technique, the local teleseismic tomography, you can create different pictures to estimate the development of the velocity inside the plate. I generate different properties like velocity, velocity ratio and velocity contrast. By this technique you can observe what happened in the boundary between the Earth's Crust and the mantle, in the Oce-

an Plate and below this. You can investigate on the reasons why the Peninsula Mejillones stopped the earthquake.

How would you characterize the specific challenges of a research project in South America?

One of the challenges is that we need very good data. The IPOC project provides us with data. Via the IPOC we have a very good collaboration among Chilean, French and German Institutions. This collaboration supports very much our work here.

For me if we can better understand what happened in the North of Chile, we can raise the awareness of the people, especially with regard to Tsunamis.

Could you tell us some personal highlights during your research stay in Germany?

Here the people have a lot of knowledge and a lot of resources to develop what you want. The professors have a very high level. In Chile we do not have enough money for investigations. Here you have big opportunities. It impressed me most that you can go every week to a different talk on a variety of themes. ■

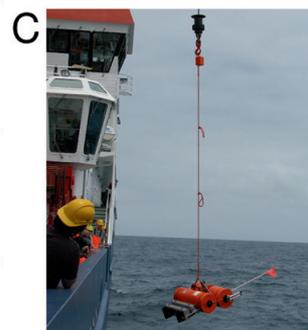
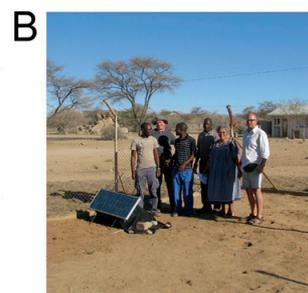
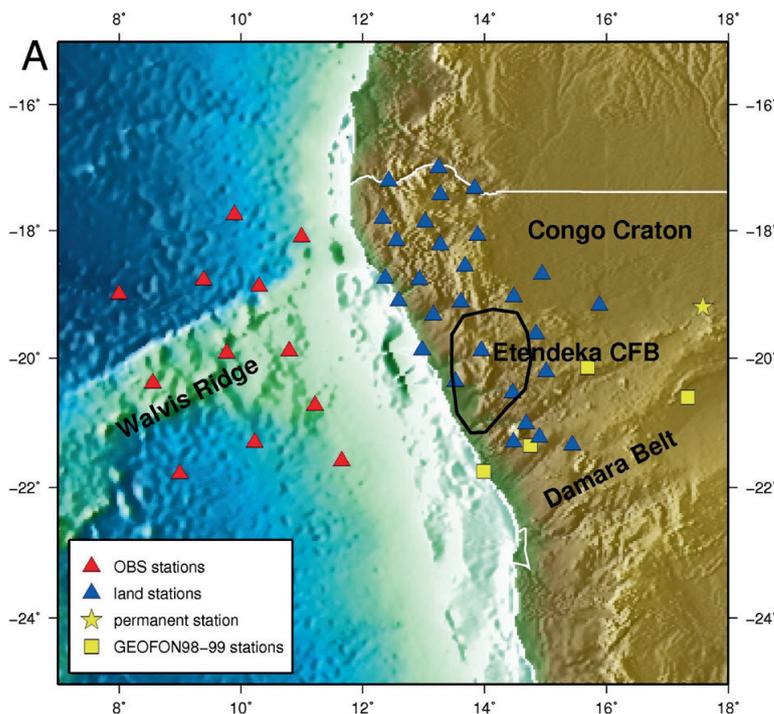
Netzwerk

SPP-SAMPLE nach sechs Jahren erfolgreich beendet

Vom 6. bis 8. Juni 2016 wurde in den Räumen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München der Abschluss des DFG-Schwerpunktprogramms „South Atlantic Margin Processes and Links with onshore Evolution“ (SAMPLE) mit einem internationalen Kolloquium gefeiert. Das Ziel des von der Ludwig-Maximilians-Universität München, dem GFZ und dem GEOMAR koordinierten Programms war es, die zeitlichen Abläufe und die tektonischen Antriebskräfte zu verstehen, die zum Auseinanderbrechen der Kontinente Afrika und Südamerika vor rund 145 Mio. Jahren und später zur Öffnung des südatlantischen Ozeans geführt haben. Dabei lag auch die Entwicklung der angrenzenden Kontinentränder im Fokus der Forschungsarbeiten. Das Programm vereinte unterschiedliche Methoden und Ansätze, wie marine und terrestrische Geophysik, geodynamische Modellierung, Sedimentbeckenanalysen, geologisch-geochemische Gelände- und Laborarbeiten, Thermochronologie sowie Paläokli-

mamodellierung. Siebzig Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus neun Ländern – darunter auch die Gastgeberländer in Südamerika (Brasilien, Argentinien sowie Chile) und in Afrika (Namibia und Südafrika) – diskutierten in München die Kernergebnisse aus SAMPLE. Ein Schlüsselthema war dabei die Wechselwirkung von Plattentektonik, Dynamik des tiefen Erdmantels und Erdoberflächenprozessen (Hebung/Erosion, Senkung/Beckenbildung). Diese Zusammenhänge lassen sich entlang der Küste Südamerikas besonders gut studieren. So haben GFZ-Forscherinnen und -Forscher gemeinsam mit Partnerinstitutionen die Entwicklung des Coloradobeckens vor Argentinien detailliert untersucht (vgl. Artikel von *Dressel et al.* in diesem Heft, S. 10 bis 15). Ein weiteres Team aus Forscherinnen und Forschern des GFZ zeigte, wie der Ablauf der Ozeanöffnung die globalen Meeresströmungen veränderte und welchen Einfluss dies auf die Klimaentwicklung in den letzten 60 Mio. Jahren hatte.

Ein vieldiskutiertes Thema auf dem Abschlusskolloquium waren Ergebnisse der ambitionierten geophysikalischen Experimente entlang des südatlantischen Walfischrückens. Nach der Theorie der Plattentektonik zeichnet der Walfischrücken die Spur des Tristan-Mantelplumes in der ozeanischen Platte nach, als Afrika und Südamerika auseinandertrieben. Diese Region wird als Schlüssellokation für die Bestätigung der Plume-Theorie angesehen, weshalb sie in SAMPLE intensiv untersucht wurde. Die Experimente wiesen eine anomale Zone in der tiefen Kruste mit sehr hohen P-Wellengeschwindigkeiten an der Stelle nach, wo der Walfischrücken mit dem afrikanischen Kontinent zusammentrifft. Die Geschwindigkeitswerte von über 7 km/s deuten auf basaltische Magmaintrusionen hin, die aus dem Erdmantel in die Kruste eingedrungen sind. Soweit werden die Erwartungen aus der Plume-Theorie bestätigt. Überraschend waren dagegen die geringen Ausmaße der Geschwindigkeitsanomalie.



(A) Karte mit Verteilung der seismischen Stationen in NW-Namibia und am Walfischrücken (OBS = Ozeanboden-Seismometer); (B) Aufbau einer Landstation; (C) Einholung einer Ozeanboden-Seismometerstation auf dem Forschungsschiff MS Merian vor der Küste Namibias (Fotos: GFZ)

Die klassischen Modelle besagen, dass ein Mantelplume die Lithosphäre in einem Bereich von etwa 1000 km Durchmesser beeinflusst, doch ist die Zone in Namibia nur etwa 100 km breit. Das wirft Fragen auf: War der Plume viel kleiner als vermutet oder liegt seine Austrittsstelle heute vielleicht in Südamerika statt in Afrika? Wenn ja, wie erklärt sich dann das Entstehen des Walfischrückens? Um Antworten darauf zu finden, hat sich eine Arbeitsgruppe mit GFZ-Beteiligung gebildet, die die Beobachtungen und Ergebnisse aus SAMPLE mit einer neuen Generation von Prozessmodellen weiter untersuchen wird.

In dem von der DFG mit rund 8 Mio. Euro geförderten Programm SAMPLE wurden in 45 Teilprojekten 52 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler weitergebildet. Bisher sind über 120 Publikationen in Fachzeitschriften erschienen oder im Druck, davon vier Beiträge in *Nature* und weitere fünf in *Geology*. SAMPLE veranstaltete zehn Sessions auf internationalen geowissenschaftlichen Tagungen (EGU Wien, AGU San Francisco, IGC Kapstadt). Eindrücke aus Expeditionen, Laborarbeiten und Modellsimulationen von SAMPLE wurden mehrfach in Fernsehsendungen der Öffentlichkeit vermittelt.

Ein Teil der Forschungsthemen wird nun in dem deutsch-argentinischen Graduiertenkolleg „SuRfAce processes, Tectonics and Georeources in the Andean Foreland Basin of Argentina“ (StRATEGY) weiterentwickelt. Das ebenfalls von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Kolleg wird seit 2015 vom GFZ und der Universität Potsdam geleitet. ■

Kontakt:

Prof. Michael Weber
(michael.weber@gfz-potsdam.de)

Projektinfos im Internet:

www.sample-spp.de

Enorme Zeitspanne zwischen Gebirgsbildung und Erosion

Ein einzigartiger Nachweis von Erosionsraten über eine Zeitspanne von 8 Mio. Jahren zeigt, dass zwischen der tektonischen Hebung und der Abtragung von Gebirgen sehr lange Zeiträume liegen können. Das ergab eine Untersuchung in den argentinischen Anden durch ein internationales Wissenschaftlerteam mit Beteiligung des GFZ. Der in der Fachzeitschrift *Earth and Planetary Science Letters* veröffentlichten Studie zufolge lag das Maximum der Hebung durch tektonische Verkürzung und damit der Gebirgsbildung in der Region zwischen 12 Mio. und 9 Mio. Jahren vor heute. Die höchsten Erosionsraten dagegen gab es vor rund 7 Mio. Jahren, also mit einer zeitlichen Verzögerung von 2 Mio. Jahren.

Diese Ergebnisse können in dynamische Modelle der Gebirgsbildung einfließen und damit die „erosive Antwort“ auf die Gebirgsbildung über lange Zeiträume quantifizieren helfen. Dies eröffnet neue Wege, um das Zusammenspiel von Tektonik und Klima zu verstehen – Faktoren, die die Landschaft unseres Planeten formen.

Für die Studie der Erosionsraten untersuchten die Forscherinnen und Forscher Sandsteinaufschlüsse im Vorland der argentinischen Präkordillere um den 30. Breitengrad. Sie nutzten dafür spezielle Formen von Beryllium (^{10}Be) und Aluminium (^{26}Al), so genannte kosmogene Nuklide. Diese entstehen durch kosmische Strahlung in den obersten Metern des Erdbodens in allerdings sehr kleinen Mengen von nur wenigen Atomen pro Gramm Gestein und Jahr. Über Jahrtausende können sie sich ansammeln, solange Felsen freiliegen. Die Messung des Gehalts von ^{10}Be und ^{26}Al erlaubt daher einen Rückschluss auf die Erosionsraten von Gestein: große Mengen von ^{10}Be z. B. bedeuten, dass nur wenig Material abgetragen wurde. Rasch erodierendes Gestein weist dagegen nur wenige Atome von ^{10}Be auf.



*Im trockenen Andenklima erodiert Gestein nur sehr langsam. Die Schichtung lässt tektonische Prozesse sichtbar werden.
(Foto: P. Val, Syracuse University, NY, USA)*

Es existieren zwei Modelle, die erklären, wie Gebirgsbildung und Erosion miteinander zusammenhängen könnten: Auf der einen Seite steht die Überlegung, dass zeitgleich mit der tektonischen Hebung Erosionsprozesse einsetzen, die wiederum aufgrund der Massenabtragung zu weiterer Hebung führen. Ein anderes Modell, das auf die Entwässerung fokussiert, sagt eine zeitliche Verzögerung vorher. Zunächst hebt sich ein Gebirge, dann entstehen durch Regen sowie abfließendes Wasser Täler und Einschnitte mit Schwellen, an denen sich Wasserfälle bilden. Diese Schwellen werden durch rückschreitende Erosion langsam flussaufwärts verlagert.

Die Forscherinnen und Forscher erklären die 2 Mio. Jahre währende Zeitspanne zwischen Gebirgsbildung und Abtragungsmaximum mit dem trockenen Klima in dieser Andenregion. Unter den semiariden Bedingungen dauert es lange, bis der „Erosionspuls“ über das Gewässernetzwerk und die Schwellen aufwärts wandert. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in:

Val, P., Hoke, G. D., Fosdick, J. C., Wittmann, H. (2016): Reconciling tectonic shortening, sedimentation and spatial patterns of erosion from ^{10}Be paleo-erosion rates in the Argentine Precordillera. - *Earth and Planetary Science Letters*, 450, pp. 173–185.

Glaziale Erosionsraten lassen sich schwer festlegen

Wer Informationen über die Erdgeschichte gewinnen will, ist auf geologische „Zeugen“ angewiesen: Baumringe, Eisbohrkerne oder Sedimentschichten in Seen und Ozeanen. Wie viel Sediment nun im Verlauf von Jahrhunderten, Jahrtausenden oder gar Jahrmillionen abgelagert wird, hängt davon ab, wie hoch die Erosionsraten in den Liefergebieten sind. Die möglichst präzise Einschätzung dieser Abtragungsraten ist daher ein Schlüssel für das Verständnis der Erdgeschichte. Ein internationales Team von Wissenschaftlern, an dem auch Prof. Dirk Scherler aus der GFZ-Sektion „Geochemie der Erdoberfläche“ beteiligt war, hat in *Science Advances* eine Analyse vieler Studien publiziert, die Probleme bei der Abschätzung erdgeschichtlicher Erosionsraten darlegt.

Zwei Fehlerquellen stachen bei der Metastudie ins Auge: Zum einen werden die Erosionsraten der jüngeren Vergangenheit im Vergleich zu weiter zurückliegenden Perioden systematisch überschätzt, zum anderen gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen Landschaften, die von Gletschern geprägt wurden (glazial), und Landschaften, die von Flüssen (fluvial) geprägt wurden.

Die Überschätzung jüngerer Abtragungsraten liegt der Studie zufolge daran, dass Erosion nicht gleichmäßig stattfindet, sondern in „Pulsen“ und mit Pausen. Über sehr viele Jahrtausende hinweg ergeben Pulse – verursacht etwa durch Klimaschwankungen, Erdbeben oder Vereisungen – und Pausen eine gute Annäherung an einen Mittelwert, aber

auf kurze Frist dominiert der Eindruck der Erosionspulse. Insbesondere glaziale Landschaften weisen eine hohe Erosionsrate auf. Und da die letzte Eiszeit vor „nur“ 20 000 Jahren, also vor geologisch kurzer Zeit, ihren Höhepunkt hatte, werden die Erosionsraten in den ehemals vergletscherten Gebieten im Vergleich zum langfristigen Mittel vermutlich systematisch zu hoch angesetzt. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Ganti, V., von Hagke, C., Scherler, D., Lamb, M. P., Fischer, W. W., Avouac, J.-P. (2016): Time scale bias in erosion rates of glaciated landscapes. - *Science Advances*, 2, 10, e1600204. DOI: 10.1126/sciadv.1600204

Der perfekte Sonnensturm

Ein geomagnetischer Sturm am 17. Januar 2013 hat sich als Glücksfall für die Wissenschaft erwiesen. Der Sonnensturm ermöglichte einzigartige Beobachtungen, die helfen, eine lang diskutierte Forschungsfrage zu beantworten. Jahrzehnte rätselten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, auf welche Weise hoch energetische Partikel, die auf die Magnetosphäre der Erde treffen, wieder verschwinden. Als aussichtsreiche Erklärung galt ein Prozess, bei dem elektromagnetische Wellen die Teilchen in die Erdatmosphäre ablenkten. Vor zehn Jahren wurde eine weitere Theorie vorgeschlagen, wonach die Partikel in den interplanetaren Raum verschwand. Jetzt hat Prof. Yuri Shprits vom GFZ und der Universität Potsdam gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen aus Instituten weltweit herausgefunden, dass beide Erklärungen gelten – entscheidend für den Verlust an Teilchen ist, wie

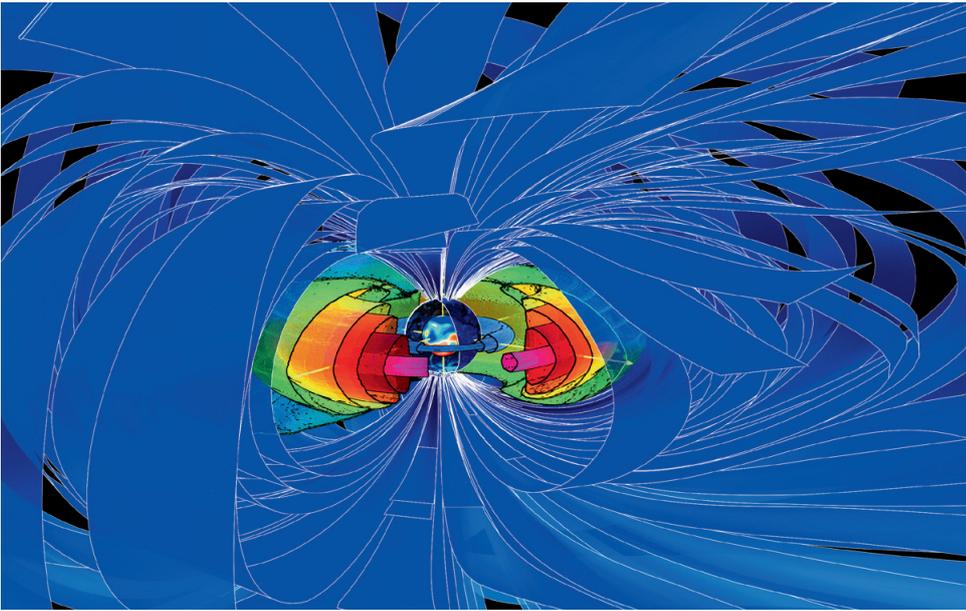
schnell die Partikel sind. Damit werden, so fand das Autorenteam heraus, einige grundlegende wissenschaftliche Fragen zur nächsten Umgebung der Erde im Weltall gelöst. Die Ergebnisse helfen auch, Prozesse auf der Sonne, auf anderen Planeten und sogar in fernen Galaxien zu verstehen und zudem das Weltallwetter besser vorherzusagen und damit wertvolle Satelliten zu schützen. Die Forschungsergebnisse wurden in dem Open-Access-Journal *Nature Communications* veröffentlicht.

Der Physiker James Van Allen wies vor beinahe sechzig Jahren nach, dass das Weltall radioaktiv ist. Er nutzte dazu Messungen eines Geigerzählers, der auf dem ersten US-amerikanischen Satelliten Explorer 1 angebracht war. Heute ist bekannt, dass die Erde von zwei Ringen umgeben ist, die hoch energetische Teilchen aus dem Weltall „einfangen“. Man

spricht auch vom „Van-Allen-Gürtel“. Die Strahlung darin stellt eine extrem harsche Umgebung für Satelliten und Menschen dar, die in Raumfahrzeugen den Gürtel durchfliegen. Die Satelliten, auf denen Navigationssysteme beruhen, z. B. die GPS-Satelliten, befinden sich mitten im Van-Allen-Gürtel.

Ultraschnelle Teilchen gefährden Satelliten

Die gefährlichsten Partikel für die Raumfahrt sind so genannte relativistische und ultrarelativistische Elektronen. Die einen fliegen mit mehr als 90 % der Lichtgeschwindigkeit, die anderen sogar mit mehr als 99 % der Lichtgeschwindigkeit. Treffen sie auf elektronische Bauteile, können sie diese empfindlich beeinträchtigen oder sogar zerstören. Gegen relativistische Teilchen lassen sich Satelliten abschirmen, aber gegen die ultrarelativistischen Teilchen gibt es so



Magnetische Umgebung der Erde mit den magnetischen Feldlinien (Visualisierung: M. Rother, GFZ)

gut wie keinen Schutz. Umso wichtiger ist es, die Dynamik dieser Partikel zu verstehen. Das Problem dabei: Im Gegensatz zu den vergleichsweise trägen Veränderungen der Ozeane und der Atmosphäre auf der Erde kann sich der Strahlungsfluss in der Magnetosphäre innerhalb einer Stunde um den Faktor 1000 verändern. Am dramatischsten sind die „drop-outs“, die während geomagnetischer Stürme oder Sonneneruptionen vorkommen. Schon seit Ende der 1960er Jahre versucht die Forschung zu ergründen, wohin Elektronen aus dem Van-Allen-Gürtel verschwinden. Das Verständnis dieses Prozesses ist zentral, um die radioaktive Umgebung zu charakterisieren und Veränderungen prognostizieren zu können. Fachleute sprechen von Weltraumwettervorhersage.

Eine der Theorien, die „drop-outs“ erklären, beruhte auf bestimmten elektromagnetischen Wellen (EMIC für Electromagnetic Ion Cyclotron Waves). Diese werden durch eindringende Ionen aus dem Magnetosphärenschweif verursacht, die schwerer und energiereicher als Elektronen sind. EMIC-Wellen können Elektronen in die Erdatmosphäre hinein ablenken und so aus dem Van-Allen-Gürtel entfernen. Vor zehn Jahren schlug Yuri Shprits gemeinsam mit Kolleginnen und

Kollegen einen anderen Mechanismus vor, wonach Elektronen nicht nach unten, sondern nach oben abgelenkt werden, also nicht in der Atmosphäre landen, sondern ins Weltall verschwinden. Messungen und Modellierungen schienen diesen Weg zu bestätigen, aber es blieb unklar, was genau bei geomagnetischen Stürmen passiert.

Sonnensturm bot ideale Bedingungen

Jetzt scheint die Frage gelöst zu sein, nachdem ein internationales Team um Shprits Daten aus dem Sonnensturm vom 17. Januar 2013 ausgewertet und darüber hinaus mit Ergebnissen aus seinen Modellrechnungen verglichen hat. Der Sturm bot ideale Bedingungen, weil erstens noch Teilchen aus einem vorhergehenden Sturm nachweisbar waren, zweitens die ultrarelativistischen und die relativistischen Teilchenströme an unterschiedlichen Stellen auftraten und drittens die ultrarelativistischen Teilchen tief in der Magnetosphäre gefangen waren.

Umfangreiche Messungen einer Satellitenmission, die 2012 von der NASA zur Untersuchung der Strahlungsgürtel gestartet wurde (Van Allen Probes), zeigten, dass EMIC-Wellen tatsächlich Teilchen in die Atmosphäre streuten. Aller-

dings betrifft das ausschließlich die superschnellen ultrarelativistischen Teilchen und nicht wie früher gedacht auch die relativistischen. Bei den hohen Energien ist die Streuung durch Wellen besonders effektiv. Der andere von Yuri Shprits vorgeschlagene Mechanismus hat dagegen die etwas langsameren Teilchen, die relativistischen Elektronen, in den interplanetaren Raum abgelenkt. Damit sei nicht nur eine alte Forschungsfrage gelöst, sagt Shprits, sondern es böten sich nun bessere Möglichkeiten, Prozesse in unserem Strahlungsgürtel, aber auch um andere Planeten herum bis hin zu Sternen und fernen Galaxien zu verstehen. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Shprits, Y., Drozdov, A. Y., Spasojevic, M., Kellerman, A. C., Usanova, M. E., Engbreton, M. J., Agapitov, O. V., Orlova, K. G., Zhelavskaya, I. S., Raita, T., Spence, H. E., Baker, D. N., Zhu, H. (2016): Wave-induced loss of ultrarelativistic electrons in the Van Allen radiation belts. - *Nature Communications*, 7. DOI: <http://doi.org/10.1038/ncomms12883>

Turbulenzen in der Ionosphäre können Signale von GPS-Satelliten stören



Das Satellitentrio SWARM empfängt Signale von bis zu acht GPS-Satelliten gleichzeitig. (Illustration: ESA/AOES Medialab)

Das Satellitengespann der SWARM-Mission der Europäischen Weltraumorganisation ESA erforscht seit 2013 das geomagnetische Feld der Erde und die Bedingungen in der Ionosphäre. Zur Überwachung der Position der SWARM-Satelliten und zu ihrer Navigation werden an Bord der Satelliten GPS-Empfänger eingesetzt, die gleichzeitig die Signale von bis zu acht GPS-Satelliten empfangen. In äquatorialen Breiten verloren die SWARM-Satelliten in der Vergangenheit regelmäßig, meist in den frühen Abendstunden, das Signal von einem oder mehreren GPS-Satelliten. Beim Verlust von mehr als vier Signalen ist eine genaue Positionsbestimmung der SWARM-Satelliten nicht mehr möglich. Diese Signalverluste traten im Zeitraum zwischen Dezember 2013 und November 2015 insgesamt 166 Mal auf.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der GFZ-Sektion „Erdmagnetfeld“ bringen diese umfassenden GPS-Signalverluste um den Äquator mit starken Veränderungen im sogenannten ionosphärischen Plasma (equatorial plas-

ma irregularities EPS) in Verbindung. Ein in der Fachzeitschrift *Space Weather* erschienener Artikel zu diesem Thema wurde von der Newsplattform EOS der American Geophysical Union AGU als „Spotlight“ hervorgehoben und somit als „spannende aktuelle Forschung“ geehrt.

Eine Auswertung der SWARM-Daten ergab laut dieser Studie, dass die Signalstörungen der Satelliten immer dann auftraten, wenn es Anomalien in der Ionosphäre gab, die sich bänderförmig um den magnetischen Äquator herum ausbreiteten. Diese Anomalien erreichten ihr Maximum jeweils nach Sonnenuntergang, zwischen 19 und 22 Uhr Ortszeit – dem Zeitraum der GPS-Signalstörungen. Sie stellen eine Abnahme in der Dichte der Ionen und Elektronen in der Ionosphäre dar. Da die Anomalien nach Sonnenuntergang auftreten, nimmt das Autorenteam an, dass die Ursache für die Dichteveränderungen im Äquatorbereich die spezielle Konstellation zwischen dem geomagnetischen Äquator und der Tag-Nacht-Linie ist.

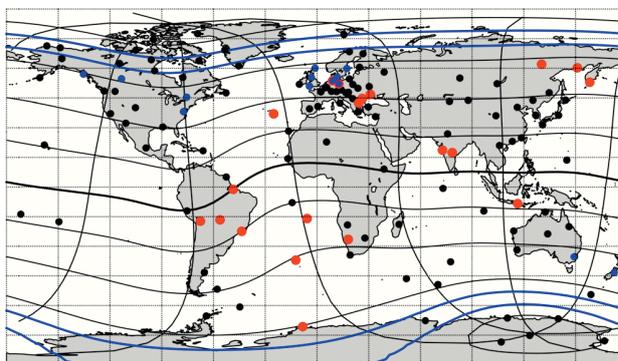
SWARM ist eine Mission der Europäischen Raumfahrtagentur ESA im Rahmen ihres „Living Planet“-Programms. Der Satellitenschwarm – daher der Name – vermisst aus dem All das Erdmagnetfeld mit bisher unerreichter Präzision. Die Funktion des Erdmagnetfelds besser zu erforschen und das Weltraumwetter genauer zu erfassen, ermöglicht Rückschlüsse für das Leben auf unserem Planeten. Das GFZ ist in dieses Projekt über verschiedene gemeinsame wissenschaftliche Studien mit der ESA und dem industriellen Vertragspartner, der EADS, eingebunden. Zudem ist das SWARM-Projektbüro am GFZ angesiedelt (www.swarm-projektbuero.de). ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in:
Xiong, C., Stolle, C., Lühr, H. (2016):
The Swarm satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities. - *Space Weather*, 14, 8, pp. 563–577. DOI: <http://doi.org/10.1002/2016SW001439>

Geomagnetischer Index wird Teil des ESA-Datenangebots

Das geomagnetische Feld der Erde ist ein natürlicher Schutz gegen den Sonnenwind: geladene Teilchen die von der Sonne auf die Erde treffen. Veränderungen in der Intensität des Sonnenwinds bringen das geomagnetische Feld zum Schwanken. Die GFZ-Sektion „Erdmagnetfeld“ gibt mit dem Kp-Index einen Wert heraus, der die Stärke dieser Störungen des Erdmagnetfelds anzeigt. Kp steht dabei für „planetarische Kennziffer“. Seit Mitte Oktober 2016 ist der Kp-Index Teil des *Space Situational Awareness Program* der Europäischen Raumfahrtagentur ESA.

Das Programm der ESA soll die Verwendung von Beobachtungsdaten zum Zustand des die Erde umgebenden Weltraums gewährleisten und den unmittelbaren Zugang dazu in Europa ermöglichen. Das soll vor allem dabei helfen, zu verhindern, dass Schäden an der Infrastruktur im Orbit oder auf der Erde entstehen. Solche Schäden können der Ausfall von Satellitensystemen durch Weltraumwetter sein oder Störungen an Stromübertragungsnetzwerken, die im



Kartendarstellung mit geomagnetischen Observatorien (schwarz), GFZ-Observatorien (rot) und Observatorien, die zur Berechnung des Kp-Indexes beitragen (blau). Blaue Linien markieren den Bereich, in dem unter normalen Bedingungen Polarlichter auftreten. (Abbildung: J. Matzka, GFZ)

Erdboden durch Änderungen des Erdmagnetfelds entstehen. Das ESA-Programm stellt den Kp-Index nun zusammen mit anderen Indikatoren des Weltraumwetters für ein breites Nutzerspektrum online bereit.

An dreizehn ausgewählten geomagnetischen Observatorien, die sich außerhalb der Polarlichtzone befinden, werden Störungen des Magnetfelds gemessen, die zur Berechnung des Kp-Indexes beitragen. An jeder Messstation müssen zur Bestimmung der lokalen Kennziffer ein „Grundrauschen“ an Magnetfeldstörun-

gen sowie jahreszeitliche und tägliche Schwankungen herausgerechnet werden. Der vom GFZ ausgegebene Mittelwert dieser Stationen ist der globale Kp-Index. Im Jahr 1938 wurde die lokale Kennziffer für das Adolf-Schmidt-Observatorium für Erdmagnetismus in Niemegk bei Potsdam, das heute zum GFZ gehört, erstmalig berechnet. Die globale Kennziffer Kp wurde 1949 in die Wissenschaftsgemeinschaft eingeführt und 1951 von der *International Association for Terrestrial Magnetism and Electricity* offiziell anerkannt. ■

Erster Satellit der Satellitenmission GRACE Follow-on fertiggestellt

Zusammen mit der US-Raumfahrtbehörde NASA betreibt das GFZ das Programm GRACE Follow-on (GRACE-FO). Die zugehörige Satellitenmission soll das Schwerkfeld der Erde erforschen. Der Start der Mission ist für Ende 2017 geplant. Nun hat Airbus Defence and Space im Auftrag des NASA-Jet Propulsion Laboratory (JPL) den ersten Erdbeobachtungssatelliten der Zwillingssatellitenmission am Standort Friedrichshafen fertiggestellt, der zweite ist in Vorbereitung. Das primäre wissenschaftliche Ziel der Satellitenmission GRACE-FO – der Nachfolgemission der GRACE-Mission, die sich bereits seit 2002 im Orbit befindet – ist die Vermessung des Schwerkfelds der Erde und seiner zeitlichen Veränderungen.



Der erste der beiden Erdbeobachtungssatelliten der GRACE-FO-Mission ist fertiggestellt (Foto: Airbus DS GmbH, A. Ruttloff)

GRACE steht dabei für „Gravity Recovery and Climate Experiment“. Zwei baugleiche Satelliten sollen die Erde mit einem Abstand von 220 km zueinander auf einem niedrigen polaren Orbit in rund 500 km Höhe umrunden. Dabei wird der Abstand zwischen den beiden Satelliten mithilfe eines Mikrowelleninstruments permanent auf 0,002 mm genau vermessen. Der Abstand verändert sich unter dem Einfluss der Gravitation, wodurch eine präzise Modellierung des Erdschwerefelds möglich ist. Während der gesamten Missionsdauer von mindes-

tens fünf Jahren liefern die Messungen alle 30 Tage ein aktualisiertes Modell des Schwerefelds. So können Veränderungen auf der Erde überwacht werden, die als Indikatoren des Klimawandels gelten, wie beispielsweise das Abschmelzen der polaren Eisschilde, der Meeresspiegelanstieg oder Veränderungen im globalen Wasserkreislauf. Außerdem erstellen die Satelliten täglich bis zu 200 Profile von Temperaturverteilung und Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre.

Innerhalb der NASA trägt das JPL die Verantwortung für die Realisierung des GRACE-FO-Projekts. Die deutschen Beiträge der Mission werden vom GFZ geleitet und gemeinsam finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, die Helmholtz-Gemeinschaft, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und das GFZ. ■

Projektleiter der Mission am GFZ:
 Prof. Frank Flechtner
 (frank.flechtner@gfz-potsdam.de)

Exotische Eigenschaft von Salzlösungen entdeckt

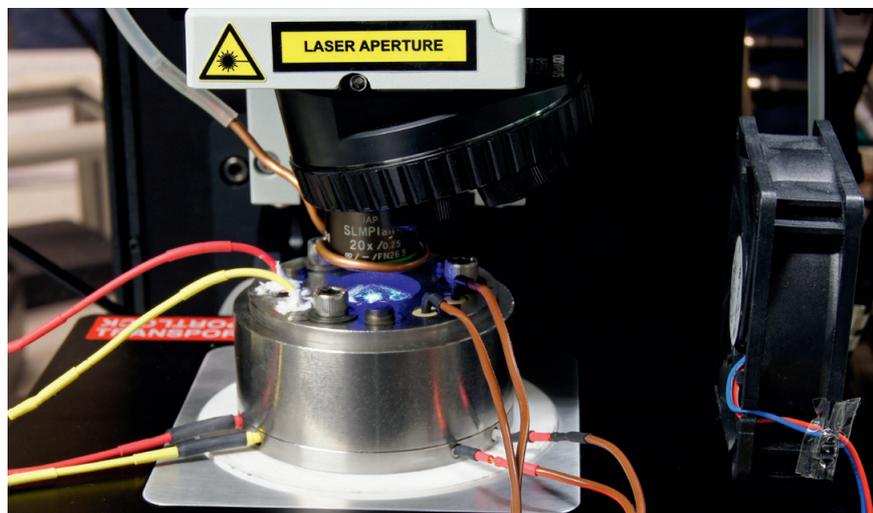
Neue Erkenntnis hilft bei der Untersuchung von Eiswelten im All

Forscher haben in den Laboren des GFZ ein bislang unbekanntes Verhalten von wässrigen Lösungen beobachtet. In einer Diamantstempelpresse setzten sie Magnesiumsulfatlösungen unter hohem Druck. Ab etwa 0,2 Gigapascal, das entspricht ungefähr dem zweitausendfachen Luftdruck auf der Erdoberfläche, stellten sie eine Anomalie fest: Gelöstes Magnesiumsulfat trennte sich weniger als erwartet in Magnesium- und Sulfationen, und ab etwa einem halben Gigapascal stieg sogar der Anteil an Ionenpaaren mit dem Druck. Dieses Verhalten ließ sich nur bei relativ niedrigen Tem-

peraturen nachweisen. Schon bei 50 °C wurde es nicht mehr beobachtet. Deswegen kommt in der Erde dieser Effekt nicht vor, in den Ozeanen ist der Druck nicht hoch genug, und in Erdkruste und -mantel ist die Temperatur zu hoch. Er ist aber relevant für andere Himmelskörper, auf und in denen tiefe Ozeane vorkommen, so die Autoren, deren Studie in der Fachzeitschrift *Geochemical Perspectives Letters* erschienen ist.

Diese Erkenntnis kann beispielsweise bei der Erforschung von Pluto und der Jupiter- und Saturnmonde Ganymed, Callisto und Titan, welche große Mengen an Wassereis und darunter vermut-

lich Ozeane enthalten, von Nutzen sein. Der Grund: Bei der Verwitterung der Magnesiumsilikate der Ozeanböden entsteht vor allem Magnesiumsulfat, das sich im Wasser löst. Wenn sich mehr Ionenpaare bilden, verwittert mehr Magnesiumsilikat als erwartet. Die Autoren nehmen an, dass die Ozeane unter den Eiswelten wahrscheinlich salziger sind, als bisher angenommen. Da die Ionenkonzentration die elektrische Leitfähigkeit von Lösungen bestimmt, trägt die Entdeckung zu einer besseren Interpretation magnetometrischer Daten bei, die bei der Untersuchung solcher Himmelskörper mit Raumsonden eine zentrale Rolle spielen. ■



Weitere Untersuchungsergebnisse in:
 Schmidt, C., Manning, C. E. (2017 online): Pressure-induced ion pairing in MgSO₄ solutions: Implications for the oceans of icy worlds. - *Geochemical Perspectives Letters*, 3, pp. 66–74.
 DOI: <http://doi.org/10.7185/geochemlet.1707>

Diamantstempelkammer am Raman-spektrometer (Foto: GFZ)

Vulkankessel auf Island bricht Rekorde



Die Eruption des Bárðarbunga 2014/2015 war der größte Vulkanausbruch Europas, der jemals geophysikalisch und geochemisch überwacht wurde. Über 2 Mrd. Tonnen Magma wurden bewegt. (Foto: T. Walter, GFZ)

Der Ausbruch des isländischen Vulkans Bárðarbunga hat vor gut zwei Jahren viele Rekorde gebrochen: Es war der stärkste seit mehr als 240 Jahren in Europa. Das Loch, das er hinterließ – die so genannte Caldera –, ist der größte Caldera-Einbruch, der je direkt beobachtet wurde. Und: Forscherinnen und Forscher haben die Eruption so genau untersucht wie keinen anderen Ausbruch je zuvor. Mit dabei waren mehrere Wissenschaftler des GFZ, die gemeinsam mit Magnus T. Gudmundsson (University of Iceland) und Kollegen ihre Ergebnisse in der Fachzeitschrift *Science* vorstellen.

Von August 2014 bis Februar 2015 entstand im Zentrum von Island die Bárðar-

bunga-Caldera als Folge des größten europäischen Vulkanausbruchs seit 1784. Calderen sind kesselförmige vulkanische Strukturen mit einem Durchmesser von 1 km bis zu 100 km. Sie entstehen durch den Einsturz oberflächennaher Magmakammern während einer Vulkaneruption. Da ihre Entstehung selten ist, ist auch das Wissen über sie sehr begrenzt.

Als Teil eines internationalen Teams haben GFZ-Wissenschaftler der Sektion „Erdbeben- und Vulkanphysik“ die Entstehung der Caldera genau dokumentiert. Sie nutzten dafür unter anderem Satellitenbeobachtungen, seismologische und geochemische Daten sowie GPS-Informationen und Modellrechnungen.

Grund für die Absenkung war das unterirdische Ausfließen von Magma aus einem Reservoir in einer Tiefe von 12 km. Die Magmakammer leerte sich über einen langen, unterirdischen Kanal im Gestein und brach als Lavafluss im Nordosten des Vulkans, 45 km entfernt, an die Oberfläche. Begleitet wurde das Absinken von 77 Erdbeben mit Magnituden von mehr als M 5. In ihrer Studie zeigen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, wie die Bodensenkung sich innerhalb von sechs Monaten bis auf eine Größe von 8 x 11 km ausdehnt und dabei 65 m hinuntersinkt. Mit einer Fläche von etwa 110 km² ist dies der größte Caldera-Einbruch, der je instrumentell beobachtet wurde. Die Ergebnisse liefern das bisher deutlichste Bild von Ursprung und Entwicklung dieses geologischen Prozesses. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Gudmundsson, M. T. et al. (2016): Gradual caldera collapse at Bárðarbunga volcano, Iceland, regulated by lateral magma outflow. - *Science*, 353, 6296. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.aaf8988>

Grönland verliert mehr Eis als gedacht

Der Eismassenverlust Grönlands ist größer als bisher angenommen. Das belegt eine Studie eines internationalen Teams von Forscherinnen und Forschern, an der auch Dr. Kevin Fleming (GFZ) und Dr. Ingo Sasgen (AWI, vormals GFZ) beteiligt waren. Die Veröffentlichung in *Science Advances* belegt, dass bei der Bestimmung der Eismassenbilanz Grönlands mit der Satellitenmission GRACE die so genannte viskoelastische Hebung der Erdkruste nicht korrekt modelliert und berücksichtigt wurde. Damit steigt der Wert für die Eisverluste von 253 Mrd. Tonnen (Gt für Gigatonnen) pro Jahr auf

272 Gt pro Jahr im Zeitraum 2004 bis 2015. Das Team hat mit einem neuen Netzwerk aus GPS-Stationen die Hebungen des Untergrunds nun zum ersten Mal präzise vermessen. Die Landhebung resultiert aus der langsamen und verzögerten Ausgleichsbewegung der Lithosphäre nach dem Rückgang der Eismassen seit der letzten Eiszeit.

Solche Landhebungen sind z. B. in Skandinavien zu beobachten, wo vor rund 20 000 Jahren noch kilometerdicke Eismassen lagen, die über die Ostsee bis ins heutige Deutschland reichten. Auch

der grönländische Eisschild war zu Zeiten der stärksten Vereisung weitaus mächtiger als heute, weswegen der Untergrund dort damals einsank und sich heute wieder hebt. Die Hebungsrate hängt von der Mächtigkeit des Eisschildes sowie von der Beschaffenheit der Lithosphäre ab, und hier haben die Modellrechnungen bislang vermutlich eine Besonderheit außer Acht gelassen: Der Untergrund unter Grönland ist vor rund 40 Mio. Jahren im Zuge der großen Plattenbewegungen über einen „Hotspot“ im Erdmantel hinweggeglitten. Heute befindet sich Island mit seinen Vulkanen und



Ilulissat-Eisfjord, Discobucht, an der Westküste Grönlands (Foto: I. Sasgen, GFZ)

heißen Quellen über diesem Hotspot. Aus dieser Jahrtausenden zurückliegenden Erhitzung des grönländischen Untergrunds rührt eine dünnere Lithosphäre als beispielsweise unter Skandinavien.

Möglich wurde die direkte Messung der Landhebung zum ersten Mal durch ein dichtes Netz von GPS-Beobachtungspunkten. Die GPS-Stationen wurden von der Technical University of Denmark im

Rahmen des GNET-Projekts auf Grundgestein in dem oft widrigen Gelände angebracht und regelmäßig besucht. Die Forscherinnen und Forscher haben damit gezeigt, dass die mit GPS gemessene Landhebung deutlich höher ist als in bisherigen Modellrechnungen. Dieses Ergebnis deutet auf einen massiveren Gletscherrückgang seit der letzten Eiszeit hin. Bisher ging die Wissenschaft davon aus, dass das schmelzende Grön-

landeis seit dem glazialen Maximum 3,2 m Meeresspiegelanstieg verursacht hat. Die neue Studie korrigiert diesen Wert auf rund 4,6 m. Besonders starke Abweichungen fanden die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Nordwesten und Südosten Grönlands. Da dort die Gletscher direkt in den Ozean kalben und dort auch heute die größten Eismassenverluste stattfinden, ist die Klimasensitivität dieser Regionen wahrscheinlich höher als gedacht. Vermutlich, so die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, wird das schwindende Grönlandeis noch über Jahrhunderte hinweg zum Meeresspiegelanstieg beitragen. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in:

Khan, S., Sasgen, I., Bevis, M., Van Dam, T., Bamber, J., Wahr, J., Willis, M., Kjaer, K., Wouters, B., Helm, V., Csatho, B., Fleming, K., Björk, A., Aschwanden, A., Knudsen, P., Munneke, P. (2016): Geodetic measurements reveal similarities between post-Last glacial Maximum and present-day mass loss from the Greenland ice sheet. - *Science Advances*, 2, 9. DOI: <http://doi.org/10.1126/sciadv.1600931>

Kosmopolitische Schneeralgen beschleunigen die Gletscherschmelze in der Arktis

Der Beitrag von Schneeralgen zur Gletscherschmelze ist bisher stark unterschätzt worden. Darauf weist eine Studie hin, die in *Nature Communications* erschien. Weiße Schnee- und Eisflächen strahlen das Sonnenlicht zurück; das Maß dafür nennt man Albedo. Schon seit geraumer Zeit ist bekannt, dass Schneeralgen mit ihrer roten Pigmentierung die Schnee- und Eisoberfläche verdunkeln und dass das zu einer höheren Wärmeaufnahme führt. Die neue Studie um Erstautorin Dr. Stefanie Lutz, Postdoc am GFZ und der Universität von Leeds, UK, zeigt, dass großflächige rote Algenblüten – auch als Blutschnee bekannt – die

Albedo insgesamt um rund 13 % über eine ganze Schmelzsaison gerechnet verringern. Der Bio-Albedoeffekt ist also bedeutend und muss nach Meinung der Autorinnen und Autoren in künftige Klimamodelle integriert werden.

Zum Blutschnee kommt es insbesondere in den wärmeren Monaten, im späten Frühling und im Sommer, wenn sich in der Arktis oder im Hochgebirge auf Schnee und Eis Schmelzwasserfilme bilden. Das flüssige Wasser und die Sonne sind lebensnotwendig für die Mikroorganismen. In Wintermonaten verfallen sie in eine Art Schlafzustand. Für die Studie

untersuchte das internationale Team um Stefanie Lutz und Prof. Liane G. Benning die Biodiversität von Bakterien und Schneeralgen mit Hilfe von modernsten molekularbiologischen Methoden (Hochdurchsatz-Sequenzierung von speziellen Genen). Sie nahmen rund 40 Proben von 21 Gletschern in der europäischen Arktis. Ihre Analyse umfasst ein Gebiet, das von Grönland über Island, Spitzbergen und bis in das arktische Schweden reicht.

Dabei stellte sich heraus, dass es bei den Bakterien je nach Lokalität eine hohe Diversität gab, wohingegen die

Schneealgen vergleichsweise wenig divers waren. Anders gesagt: Vermutlich sind in weiten Teilen der Arktis dieselben Schneealgenpezies für den Blutschnee und die dadurch beschleunigte Schmelze verantwortlich. Durch die Rotalgenblüte kommt es zu einem selbstverstärkenden Effekt: Je mehr der Schnee und die Gletscher tauen, desto mehr blühen die Algen. Das führt zu einer Verdunklung der Oberfläche, die wiederum das Tauen beschleunigt. Die Arbeit am GFZ zielt darauf ab, ein universelles Modell von Bio-Albedo-Wechselwirkungen, die momentan in den Klimamodellen fehlen, besser zu definieren. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in:

Lutz, S., Anesio, A. M., Raiswell, R., Edwards, A., Newton, R. J., Gill, F., Benning, L. G. (2016): The biogeography of red snow microbiomes and their role in melting arctic glaciers. - *Nature Communications*, 7. DOI: <http://doi.org/10.1038/ncomms11968>



Schneealgen blühen rot auf Eis und Schnee und verdunkeln so die Oberfläche. Das trägt zum schnelleren Schmelzen bei. (Foto: L. G. Benning, GFZ)

Das Leben an Land ist 300 Mio. Jahre älter als bisher bekannt



Die Gesteine der Baberton-Berge im Nordosten Südafrikas zählen zu den ältesten bekannten der Erde. (Foto: S. Nabhan, FSU Jena)

Das Leben auf der Erde hat den Sprung an Land bereits vor mindestens 3,2 Mrd. Jahren vollzogen, also 300 Mio. Jahre früher als bisher angenommen. Das legt eine Studie von Wissenschaftlern aus Berlin, Potsdam und Jena nahe, die kürzlich im Fachjournal *Geology* erschienen ist. Das Team um Sami Nabhan von der Freien Universität Berlin hat uralte Gesteinsformationen in Südafrika untersucht.

Die Felsen des so genannten Barberton Greenstone Belt zählen zu den ältesten bekannten Gesteinen der Erde. Sie sind bis zu 3,5 Mrd. Jahre alt. In einer Schicht, die auf 3,22 Mrd. Jahre datiert wird, fanden die Forscher winzige Körnchen des Minerals Pyrit, ein Eisensulfid. Die Körnchen weisen klare Anzeichen von Beeinflussung durch Mikroorganismen auf: dabei geht es um die Verteilung von Spurenelementen ebenso wie um das Verhältnis der Schwefelisotope ^{34}S und ^{32}S im Pyrit.

Im SIMS-Labor am GFZ wies Dr. Michael Wiedenbeck nach, dass der ^{34}S -Anteil im Kern der Kristalle in charakteristischer Weise vom ^{34}S -Anteil in deren Randzonen abweicht. Das wiederum deutet darauf hin, dass Mikroorganismen den Schwefel am Rand der Kristalle umgewandelt haben. Der Prozess wird als biogene Fraktionierung bezeichnet. Das

Kürzel SIMS steht für Sekundärionen-Massenspektrometrie. Das hochauflösende Gerät ist seit 2013 am GFZ in Betrieb. Mit ihm wurden für die vorliegende Studie Proben analysiert, die weniger als ein Milliardstel Gramm wiegen.

Die Zusammensetzung des Gesteins, die Schichtung und die Form der Kristalle deuten alle darauf hin, dass die Felsen ihren Ursprung in einem alten Bodenprofil hatten. Dieser „Paläoboden“ entstand vor mehr als 3 Mrd. Jahren in einer Flussebene eines Zopfstroms. Der Fluss transportierte Sedimente, welche die Eisensulfide enthielten, und lagerte sie in der Ebene ab. Dort, so folgern die Forscher aus den Daten, lebten Mikroorganismen in einer Bodenzone, die abwechselnd feucht und trocken war, und verursachten die typischen Ränder an den Pyritkristallen. Damit, so die Forscher, seien Bodenlebewesen nachgewiesen, die vor mindestens 3,2 Mrd. Jahren außerhalb der Ozeane lebten. Das rückt den Sprung an Land durch das Leben um rund 300 Mio. Jahre weiter zurück als bisher bekannt. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in:

Nabhan, S., Wiedenbeck, M., Milke, R., Heubeck, C. (2016): Biogenic overgrowth on detrital pyrite in ca. 3.2 Ga Archean paleosols. - *Geology*, 44, 9, pp. 763–766. DOI: <http://doi.org/10.1130/G38090.1>

Starke Seespiegelschwankungen in Nordostdeutschland rekonstruiert



Forscherinnen und Forscher des GFZ und des virtuellen deutsch-polnischen Instituts ICLEA nehmen Bohrkernproben aus dem Sediment des Fürstenseer Sees. (Foto: A. Brauer, GFZ)

Der Wasserstand in Seen des nordostdeutschen Tieflands ist in den vergangenen Jahrzehnten vielerorts gesunken, oft verursacht durch Eingriffe des Menschen, etwa die Trockenlegung von Böden für die Landwirtschaft oder Siedlungen. Eine in der Fachzeitschrift *Boreas* veröffentlichte Studie von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des GFZ zeigt jetzt, dass es über Jahrtausende betrachtet weitaus drastischere Schwankungen der Seespiegel gegeben hat, vor allem in der Zeit, bevor der Mensch in den Wasserhaushalt eingegriffen hat. Untersuchungen am Großen Fürstenseer See bei Neustrelitz (Müritz Nationalpark) belegen ein Auf und Ab von rund 4 m nach oben und nach unten in den letzten 10 000 Jahren. In wenigen Jahrtausenden verringerte sich die Seefläche um die Hälfte bzw. vergrößerte sich der See um mindestens das Dreifache im Vergleich zur heutigen Ausdehnung.

Forscherinnen und Forscher des virtuellen deutsch-polnischen Instituts ICLEA haben dazu das Sediment des Sees mit

Proben entlang eines Transsektivs und mithilfe eines Echolots untersucht und die Ergebnisse mit aktuellen Beobachtungen verglichen. Ihre Rekonstruktion des Seespiegels ergab einen Höchststand vor rund 5000 Jahren mit einem Pegel, der 4 m über dem heutigen lag. Vor 6400 bis 9700 Jahren dagegen lag der Wasserspiegel 3 bis 4 m tiefer als heute. Als Ursache vermuten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Kombination aus Änderungen des Klimas und der Waldstruktur. Für die Zukunft heißt das, dass größere Wasserspiegelschwankungen möglich sind, als bisher beobachtet wurden. Diese scheinen jedoch nicht nur vom Klimawandel, sondern auch von der Waldzusammensetzung im Müritz Nationalpark abhängig zu sein. ■

Weitere Untersuchungsergebnisse in: Dietze, E., Slowinski, M., Zawiska, I., Veh, G., Brauer, A. (2016): Multiple drivers of Holocene lake level changes at a lowland lake in northeastern Germany. - *Boreas*, 45, 4, pp. 828–845. DOI: <http://doi.org/10.1111/bor.12190>

ICDP: 20 Jahre Kompetenz bei Bohrprojekten



ICDP-Trainingskurs 2014 in Neuseeland (Foto: T. Wiersberg, GFZ)

Vom 20. bis zum 21. Oktober 2016 feierte das internationale kontinentale Bohrprogramm ICDP seinen 20. Geburtstag im Rahmen einer Konferenz am GFZ. Rund 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Vertreter von Förderorganisationen diskutierten – in Anbetracht der steigenden Zahl von ICDP-Projekten – zukünftige Möglichkeiten der Projektförderung und der Unterstützung durch die am GFZ beheimatete Operational Support Group (OSG).

Seit seiner Gründung ist das ICDP eng mit dem GFZ verbunden. Das GFZ fördert die ICDP-Mitgliedschaft Deutschlands und finanziert die OSG. Im „Zentrum für Wissenschaftliches Bohren“ (GFZ-Sektion 6.4) findet durch die OSG die operative Unterstützung nationaler sowie internationaler Bohrprojekte des ICDP und des GFZ statt. Die OSG ist dabei durch Bohrlochmessungen, Datenmanagement und Bohrkernuntersuchungen, aber auch beratend bei der Planung und Durchführung von Bohrprojekten sowie durch Trainingskurse tätig. Mehr als 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ waren oder sind an ICDP-Projekten mit Schwerpunkten in den Bereichen Paläoklima und -umweltforschung, Naturkatastrophen sowie natürliche Ressourcen beteiligt. ■

Weitere Informationen im Internet: <http://www.icdp-online.org>

Internationaler Trainingskurs in Myanmar



Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des UN-Trainingskurses besuchten das nationale Krisenzentrum für Naturkatastrophen in Myanmars Hauptstadt Nay Pyi Taw. (Foto: C. Milkereit, GFZ)

Vom 26. September bis zum 21. Oktober 2016 fand der internationale Trainingskurs „Seismologie, Datenanalyse und Seismische Gefährdungseinschätzung“ in Nay Pyi Taw, Myanmar statt. Neben Methoden zur seismischen Gefährdungseinschätzung lernten die 27 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus neun Ländern, wie sie Erdbeben analysieren und Standorteffekte bestimmen können. Ein weiteres Ziel des Kurses ist es, die Teilnehmerinnen und Teilnehmer zu qualifizieren, Monitoring- und Frühwarnsysteme in ihren Ländern zu installieren und eigenständig zu betreiben. Im Zuge der internationalen Zusammenarbeit wird dabei auch die Vernetzung der weltweiten seismologischen Überwachungssysteme vorangetrieben.

Das GFZ führte den Kurs zusammen mit dem Department for Meteorology and Hydrology DMH, Myanmar, durch, das für die Wetter- und Hochwasservorhersage, aber auch für die seismische Überwachung und die Tsunamiwarnung in Myanmar verantwortlich ist.

Der seit der Gründung des GFZ im Jahr 1992 jährlich durchgeführte Trainingskurs findet abwechselnd in Potsdam und einem Veranstaltungsort im Ausland statt. Finanziell unterstützt wird der Kurs durch das Auswärtige Amt. ■

Kontakt: Dr. Claus Milkereit
(claus.milkereit@gfz-potsdam.de)

Potsdam Summer School 2016 zum Klimawandel



Wie lassen sich unbeherrschbare Klimafolgen vermeiden und unvermeidbare Folgen bewältigen? (Foto: U. Herrmann, GFZ)

Unter dem Titel „Dealing with Climate Change Impacts“ diskutierten vom 5. bis 14. September 2016 mehr als 40 internationale Nachwuchstalente aus 30 Ländern mit Vertreterinnen und Vertretern aus der Klima- und Geoforschung, Ozeanografie, aus den Sozialwissenschaften und mit weiteren Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft auf der Potsdam Summer School. Auf dem Programm standen Vorträge, Workshops und Diskussionsrunden zum Thema Klimawandel und dessen Konsequenzen, etwa für Nahrungsmittelsicherheit oder Migration, planetare Grenzen sowie die Risikoabschätzungen vor dem Hintergrund notwendiger Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen.

Neben dem GFZ sind das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), das AWI, das Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS) und der Forschungsschwerpunkt Erde der Universität Potsdam an dieser seit 2014 jährlich stattfindenden Summer School beteiligt. Ziel der Initiative ist es, herausragende junge Forscherinnen und Forscher sowie Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft, Wirtschaft und dem öffentlichen Sektor aus verschiedenen Teilen der Welt zusammenzubringen, um hochaktuelle und innovative Forschungsfragen rund um nachhaltige Entwicklung zu diskutieren und den internationalen Austausch sowie neue Kooperationen zu fördern. ■

Weitere Informationen im Internet:
<http://potsdam-summer-school.org>

Helmholtz-Schülerlabore zu Gast beim BMBF



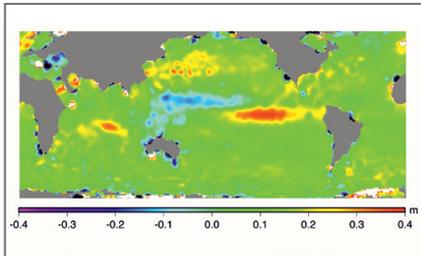
Bundesministerin Prof. Johanna Wanka (rechts) und Alexandra Wille (links) an der Sandbox (Foto: GFZ)

Der „Tag der Offenen Tür“ des BMBF am 27. und 28. August 2016 in Berlin stand ganz im Zeichen des Wissenschaftsjahrs 2016*17 „Meere und Ozeane“. Das GFZ präsentierte auf dem gemeinsamen Stand der Helmholtz-Schülerlabore eine interaktive „Augmented Reality Sandbox“. Mit dem Exponat werden geomorphologische und hydrologische Sachverhalte spielerisch vermittelt. Die Sandlandschaft kann nach Belieben per Hand geformt werden. Das entsprechende Höhenmodell wird in Echtzeit gescannt und mit einer Farbskala sowie Höhenlinien von oben auf den Sand projiziert.

Zusätzlich zu diesen Höheninformationen wird die Realität mit einer Wassersimulation erweitert. So können Seen und Flussverläufe auf dem Relief anschaulich gemacht werden. Bundesministerin Prof. Johanna Wanka war besonders von der Möglichkeit begeistert, mit einer Handgeste Regen zu erzeugen und so die Realität interaktiv zu verändern. Auf diese Weise lassen sich Ereignisse wie Deichdurchbrüche oder Überschwemmungen leicht nachvollziehbar darstellen. ■

GFZ-Schülerlabor: Manuela Lange
(manuela.lange@gfz-potsdam.de)

Wissenstransfer in die Schulen: Herbstschule System Erde



Darstellung der mit El Niño verbundenen Meeresspiegeländerung; gezeigt werden Abweichungen der Meeresspiegelhöhe vom langjährigen Mittel (= 0) im Pazifik für eine zehntägige Periode ab dem 13. November 2015 (Abb.: T. Schöne, GFZ)

Einmal jährlich bietet das GFZ in Zusammenarbeit mit der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG) die Lehrerfortbildung „Herbstschule System Erde“ an – dieses Jahr zu Thema „Meere und Ozeane: Entdecken, nutzen, schützen“. Vom 14. bis zum 15. November 2016 informierten sich mehr als 90 Lehrerinnen und Lehrer sowie Studentinnen und Studenten auf der 15. Herbstschule über neueste Forschungsergebnisse zu diesem Thema.

Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler des GFZ, des AWI, des Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, des Baltic Earth Netzwerks, des DMG und des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg diskutierten mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ihre Forschungsergebnisse. Die Lehrerfortbildung fördert den Wissenstransfer aus der Forschung unmittelbar in die Schulen und soll die Lehrkräfte zudem dazu anregen, den Geographieunterricht anwendungsbezogener zu gestalten. Ein wichtiges Ziel ist auch, den derzeit geringen naturwissenschaftlichen Anteil im Schulfach Geographie weiter zu stärken. ■

Kontakt „Wissenstransfer in die Schulen“: Manuela Lange
(manuela.lange@gfz-potsdam.de)

Kick-off-Meeting: EU-Trainingsnetzwerk System-Risk



Hochwasser in Grimma, Juni 2013
(Foto: A. Krahn, GFZ)

Am 10. und 11. Oktober 2016 trafen sich die Partner des Marie-Sklodowska-Curie European Training Networks (ETN) „A Large-Scale Systems Approach to Flood Risk Assessment and Management“ (System-Risk) zu einem Kick-off-Meeting in Potsdam. Die bisherige Forschung im Bereich des Hochwasserrisikos beschränkt sich auf kleine und mittlere Flusseinzugsgebiete. Die Verfügbarkeit immer größerer Datenmengen und Rechnerleistungen und die Entwicklung neuer numerischer Algorithmen erlaubt jedoch seit einigen Jahren, großskalige Untersuchungen und umfassende Modellierungen. Das will sich System-Risk zunutze machen. Das ETN bildet 15 Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler aus, denen Karriereoptionen in und außerhalb der Wissenschaft eröffnet werden sollen. Sie arbeiten an einem Systemansatz für das Hochwasserrisiko, mit den Schwerpunkten: Risikokette, Interaktionen und zeitliche Dynamik innerhalb des Hochwasserrisikos. Dabei forschen sie nicht nur, sondern absolvieren verschiedene Workshops zu Wissenstransfer und Management. Prof. Bruno Merz, Leiter der GFZ-Sektion „Hydrologie“, ist Koordinator des ETN, Dr. Kai Schröter der Projektmanager. An System-Risk sind insgesamt zehn führende Zentren der europäischen Hochwasserforschung beteiligt, außerdem acht Partner aus den Bereichen Wirtschaft und Administration. ■

Weitere Informationen im Internet:
<https://system-risk.eu>

GEMex: Kick-off-Meeting in Mexiko



Geothermie-Kraftwerk Los Humeros, einer der beiden geplanten GEMex-Untersuchungsstandorte (Foto: E. Huenges, GFZ)

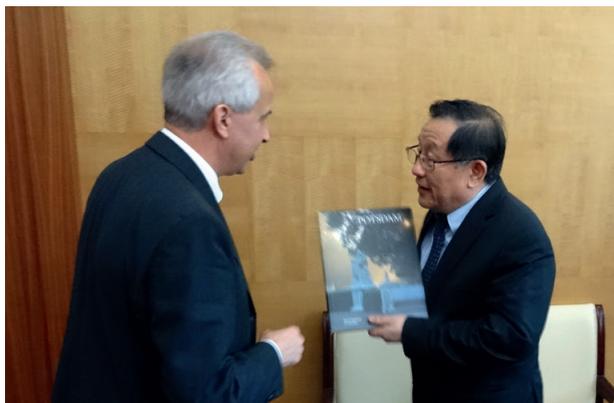
Vom 14. bis zum 19. November 2016 fand in Morelia, Mexiko, das Kick-off-Meeting zum europäisch-mexikanischen Projekt „Cooperation in Geothermal energy research Europe-Mexico for development of Enhanced Geothermal Systems and Superhot Geothermal Systems“ (GEMex) statt. Im Mittelpunkt von GEMex stehen die Erkundung, Charakterisierung und Bewertung von zwei geothermalen Systemen im Transmexikanischen Vulkangürtel. Unter Federführung des GFZ (Prof. David Bruhn) bündeln 24 europäische und neun mexikanische Partner ihre Kompetenzen. Das Projekt wird von der EU und dem mexikanischen Energieministerium gefördert. Für die Untersuchungen wurden zwei Standorte in Mexiko ausgewählt – Acoculco (Hot Enhanced Geothermal System) und Los Humeros (Superhot Geothermal System). Das Geothermalfeld bei Acoculco verfügt bereits über zwei Bohrungen. In diesen treten zwar kaum Fluide auf, dafür aber hohe Temperaturen von 300 °C in 2 km Tiefe. Dieser hohe Temperaturgradient macht den Standort für eine Exploration und Erschließung durch speziell für Enhanced Geothermal Systems (EGS) entwickelte Verfahren interessant. Das Geothermalfeld von Los Humeros wird zur Stromerzeugung genutzt. Im Rahmen von GEMex sollen hier eine weitere Erschließung und Nutzungsmöglichkeiten untersucht werden. ■

Projektkoordinator: Prof. David Bruhn
(david.bruhn@gfz-potsdam.de)

Weitere internationale Aktivitäten des GFZ

Im Rahmen der wissenschaftlichen Kontakte mit dem Iran besuchte am 6. und 7. Juli 2016 eine vierköpfige Delegation des „Forest, Range and Watershed Management (FRW)“, Teheran, das GFZ. Der zweitägige Workshop diente dazu, gemeinsame Forschungsthemen zu definieren, die sich zukünftig u. a. auf die Folgen des globalen Klimawandels, wie meteorologische Extremereignisse, Hangrutschungen, Bodenerosion, Sinkholes und das Management von Wassereinzugsgebieten konzentrieren könnten. Es wurde zudem die Möglichkeit erörtert, bei der Gründung eines internationalen UNESCO-Zentrums für integrierte Wasserforschung und Bioressourcen in semi-ariden Gebieten zusammenzuarbeiten. Zwischen dem 8. und 12. August 2016 reisten BMBF-Vertreter unter Leitung des Abteilungsleiters „Internationales“, Volker Rieke, nach Teheran, um Möglichkeiten der deutsch-iranischen Zusammenarbeit auszuloten. Seitens des GFZ war Dr. Ludwig Stroink eingeladen, die deutsche Delegation zu begleiten.

Zwischen dem 24. Juli und 1. August 2016 besuchte eine Delegation des GFZ unter Leitung des Wissenschaftlichen Vorstands, Prof. Reinhard F. Hüttl, Forschungseinrichtungen und Ministerien in **China, Taiwan und Singapur**. Höhepunkte der Reise waren Treffen mit dem chinesischen Minister für Wissenschaft und Technologie, Prof. Wan Gang, und den Präsidenten der Chinesischen Akademie der Wissenschaften, Prof. Bai Chunli, sowie der taiwanesischen Academia Sinica, Dr. Lou-Chuang Lee. Als Ergebnis der Reise ist neben der gezielten Vertiefung der guten bilateralen Zusammenarbeit mit China ein Ausbau der Kooperation mit der taiwanesischen Academia Sinica und der National Taiwan University (NTU) geplant. Ein gemeinsamer Workshop mit EOS (Earth Observatory Singapore) im ersten Quartal 2017 markiert den Start der bilateralen Zusammenarbeit mit dieser weltweit renommierten Forschungseinrichtung der Nanyang Technological University Singapore.



Treffen zwischen Prof. Reinhard F. Hüttl und Dr. Wan Gang, Chinesischer Minister für Wissenschaft und Technologie (Foto: GFZ)



Treffen zwischen Prof. Reinhard F. Hüttl und Prof. Bertil Andersson, Präsident der NTU, Singapur (Foto: GFZ)

Das 2015 gestartete internationale Graduiertenkolleg „SuRfAce processes, Tectonics and Georesources: The Andean foreland basin of Argentina (StRATEGY)“, ist eines der aktuell herausragenden Vorhaben der deutsch-argentinischen Forschungszusammenarbeit. Dies wurde anlässlich der deutsch-argentinischen Gespräche zur wissenschaftlich-technologischen Zusammenarbeit am 9. März 2016 in Buenos Aires, **Argentinien**, noch einmal unterstrichen. Der argentinischen CONICET, die gemeinsam mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) das von der Universität Potsdam und dem GFZ geleitete Vorhaben finanziert, gilt StRATEGY als gelungenes Beispiel für die Anbahnung zukünftiger internationaler Kooperationen.

Am 22. August 2016 fand die 9. Sitzung des Aufsichtsrats für das Zentralasiatische Institut für Angewandte Geowissenschaften (ZAIAG) in Bischkek, **Kirgisistan** statt. Seitens des GFZ nahmen Dr. Stefan Schwarze, Administrativer Vor-

stand des GFZ, und Frau Katja Radzinski sowie ZAIAG Ko-Direktor Dr. Jörn Lauterjung teil. Das ZAIAG wurde 2004 als eine gemeinsame Institution vom GFZ und der Regierung Kirgisistans in Bischkek gegründet und hat seitdem eine Reihe wissenschaftlich-technologischer Aktivitäten in der Region angestoßen und umgesetzt.

Am 24. Mai 2016 fand in Baku, **Aserbaidschan**, ein weiterer Workshop zur Intensivierung der Zusammenarbeit mit der dortigen Akademie der Wissenschaften statt. Die 2014 auf Initiative des Wirtschafts- und Kulturreferats der Deutschen Botschaft in Baku gestartete Kooperation hat zum Ziel, die für Großstädte Zentralasiens entwickelte seismische Gefährdungs- und Vulnerabilitätsanalyse auf die Hauptstadt Aserbaidschans auszudehnen. Im Rahmen eines gemeinsamen Projekts zur Einrichtung eines seismischen Frühwarn- und Schadensvorhersagesystems sollen in 2017 dazu erste Tests in Baku durchgeführt werden.



Teilnehmerinnen und Teilnehmer der ersten bilateralen Sommerschule mit der russischen Vernadsky-Stiftung vom 15. bis 22. Oktober 2016 in Sochi (Foto: GFZ)

In **Russland** wurde die Zusammenarbeit mit der Vernadsky-Stiftung, eine in der UNESCO organisierte Nichtregierungsorganisation (NGO), vertieft. Dazu fand vom 15. bis 22. Oktober 2016 in Sochi eine von GFZ und der Vernadsky-Stiftung organisierte deutsch-russische Sommerschule statt. Sie fokussierte auf neue wissenschaftlich-technologische Erkenntnisse und Methoden aus der Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung sowie deren praktische Anwendung in

Wirtschaft und Gesellschaft. Je zehn deutsche und russische Studentinnen und Studenten aus Universitäten und Forschungseinrichtungen nahmen an der Sommerschule teil, sowie jeweils fünf Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler als Tutoren. Durch die erfolgreiche Entwicklung dieser institutionell breit angelegten Kooperation soll die terrestrische Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung stärker in den Fokus der wissenschaftlich-technologischen Zu-

sammenarbeit zwischen Deutschland und Russland gerückt werden.

Anlässlich des 35. Internationalen Geologenkongresses (IGC) in Kapstadt (28. August bis 3. September 2016) stimmte das IUGS-IGC-Council über die Ausrichtung des 37. IGC 2024 ab. Neben Südkorea, der Türkei und Russland hatte sich Deutschland mit dem Standort Berlin für diesen Kongress beworben. Das GFZ leitete das nationale Bewerbungskonsortium und war für das gesamte Bewerbungsverfahren verantwortlich. Trotz eines national wie international hochgelobten deutschen Konzepts (klarer Fokus auf Wissenschaft, Europäische Integration und Nachwuchsförderung) erhielt Südkorea den Zuschlag der Delegierten, vor Deutschland. Geplant ist jetzt, gemeinsam mit dem Young Earth Scientists Netzwerk (YES) den 5. YES-Weltkongress 2019 in Berlin zu organisieren. Die Planungen resultieren aus einer konkreten Anfrage von YES an das GFZ. ■

Kontakt: Internationales Büro am GFZ
Dr. Ludwig Stroink
(stroink@gfz-potsdam.de)

Hochrangige Besuche



Dr. Harsh Vardhan, Indischer Minister für Wissenschaft und Technologie und Prof. Reinhard F. Hüttel anlässlich des Besuchs einer indischen Delegation am GFZ (Foto: GFZ)

Am 12. September 2016 besuchte Dr. Harsh Vardhan, Indischer Minister für Wissenschaft und Technologie das GFZ. Der Minister ließ sich ausgiebig über die Forschungsarbeiten am GFZ und die Kooperationen mit indischen Forschungseinrichtungen und Universitäten informieren. Das GFZ kooperiert u. a. in den

Bereichen Gashydratforschung, Erforschung des Erdmagnetfelds und im Rahmen des internationalen kontinentalen Bohrprogramms ICDP mit indischen Institutionen. In Abstimmung mit dem Präsidenten der Helmholtz-Gemeinschaft, Prof. Otmar D. Wiestler, den der Minister am gleichen Tage traf, wurde für 2017 ein wissenschaftlicher Workshop verabredet, der die Zusammenarbeit mit Indien weiter befördern soll.

Am 4. November 2016 empfing der Wissenschaftliche Vorstand des GFZ, Prof. Reinhard F. Hüttel, den neuen französischen Botschafter in Berlin, S. E. Philippe Etienne, in der historischen Bibliothek des Telegrafenberges. Prof. Hüttel und leitende Wissenschaftler des GFZ informierten den hohen Besuch über aktuelle Forschungsarbeiten des GFZ, unter besonderer Berücksichtigung der Zusammenarbeit mit unserem Nachbarland. Aktuell bestehen 45 offizielle Kooperati-

onsabkommen mit französischen Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Frankreich ist damit das wichtigste Partnerland des GFZ. Für 2017 ist eine gemeinsame Informationsveranstaltung in der Französischen Botschaft geplant. ■



Besuch des Französischen Botschafters, S. E. Philippe Etienne am 4. November 2016 am GFZ; v.l.n.r. Prof. Yuri Shprits (GFZ), Prof. Fabrice Cotton (GFZ), Dr. Karen Wagner (acatech), Prof. Reinhard F. Hüttel (GFZ), Botschafter Philippe Etienne, Dr. Ludwig Stroink (GFZ), Botschaftsrat Dr. Jean-Jaques Pierrat (Foto: GFZ)

Ausgezeichnet

Jean Braun ist Leiter der neuen GFZ-Sektion „Erdoberflächenprozess-Modellierung“



Zum 1. September 2016 hat Prof. Jean **Braun** die Leitung der neuen GFZ-Sektion „Erdoberflächenprozess-Modellierung“ übernommen. Jean

Braun konnte im Rahmen der Helmholtz-Rekrutierungsinitiative für das GFZ gewonnen werden. Er beschäftigt sich mit verschiedenen Bereichen der Geowissenschaften, von den Erdoberflächenprozessen bis hin zur Geodynamik anhand verschiedener numerischer und mathematischer Methoden. Seine aktuellen Forschungsinteressen liegen in der mathematischen Abbildung der Frage, wie Klima, Tektonik und Materialflüsse im Erdmantel interagieren und die Oberfläche der Erde formen. Ein Schwerpunkt seiner Arbeit am GFZ ist die Entwicklung eines „Predictive Earth Surface Simulator“. Dieser Simulator soll geologische, physikalische und geochemische Prozesse abbilden, die für die Entwicklung der Erdoberfläche verantwortlich sind.

Zeitgleich mit der Übernahme der Sektionsleitung trat Jean Braun die Professur „Modellierung von Erdoberflächenprozessen“ in gemeinsamer Berufung mit der Universität Potsdam an. ■

Sarah A. Gleeson übernimmt Sektionsleitung



Seit 1. Oktober 2016 ist Prof. Sarah A. **Gleeson** mit der Leitung der GFZ-Sektion „Anorganische und Isotopengeochemie“ betraut. Sie folgt in

diesem Amt Prof. Jörg **Erzinger**, der seine erfolgreiche Dienstzeit am GFZ offiziell beendet. Sarah A. Gleeson ist bereits seit Juli 2015 am GFZ tätig und baut eine

Forschungsgruppe zur Genese mineralischer Lagerstätten auf. Ihre wissenschaftlichen Interessen liegen in den Bereichen hydrothermale Fluidgeochemie und Wechselwirkungen zwischen Wasser und Gestein. Auch Prof. Gleeson konnte im Rahmen der Helmholtz-Rekrutierungsinitiative für das GFZ gewonnen werden.

Zeitgleich mit der Übernahme der Sektionsleitung trat Sarah A. Gleeson die Professur „Mineral Resources“ in gemeinsamer Berufung mit der FU Berlin an. ■

Yuri Shprits folgt Ruf an die Universität Potsdam



Am 24. Oktober 2016 ist Prof. Yuri **Shprits**, Leiter der Arbeitsgruppe „Magnetosphärenphysik“ in der GFZ-Sektion „Erdmagnetfeld“, zum

Professor an die Universität Potsdam berufen worden.

Yuri Shprits, der im März 2016 im Rahmen der Helmholtz-Rekrutierungsinitiative von der University of California, Los Angeles (UCLA), USA, ans GFZ kam, erforscht den Einfluss der Sonnenaktivität auf die Erdatmosphäre und den erdnahen Weltraum sowie auf die Gefährdung für Satelliten und Menschen im All. Hierfür verwendet er Satellitenmessdaten und Beobachtungen von Bodenstationen zum erdnahen Weltraum und zur Magnetosphäre sowie physikalische Modellierungen und Datenassimilationstechniken.

Yuri Shprits erhielt seine Doktorwürde im Jahr 2005 an der University of California, Los Angeles, USA, und arbeitete dort sowie auch am Massachusetts Institute of Technology, USA, und am Skoltech in Russland. Im Jahr 2012 wurde er von US-Präsident Barack Obama mit dem Presidential Early Career Award for

Scientists and Engineers (PECASE) ausgezeichnet, der höchsten Auszeichnung, die die US-Regierung einem Wissenschaftler am Beginn seiner Karriere verleihen kann. ■

Außerplanmäßige Professur für Arno Zang



PD Dr. Arno **Zang**, GFZ-Sektion „Erdbebengefährdung und Spannungsfeld“, hat am 28. Oktober 2016 die Würde eines außerplanmäßigen Pro-

fessors für das Fachgebiet „Geophysik und Felsmechanik“ von der Universität Potsdam erhalten. Sein Forschungsprofil umfasst die Analyse von Bruchprozessen im Untergrund und induzierten seismischen Ereignissen – verursacht durch menschliche Aktivität – im Zusammenhang mit verschiedenen Energietechnologien. Zang untersucht insbesondere geothermische Energiesysteme und das Verfahren des Hydraulic Fracturing. Ziel ist es, die induzierte Seismizität beim Energiegewinnungsprozess zu minimieren und dabei die Durchlässigkeit von Gesteinen zu maximieren. Hierzu führt er Laborversuche und hydraulische Großexperimente in Untertagelaboren durch.

Nach seiner Promotion an der Goethe-Universität in Frankfurt am Main im Jahr 1991 ging Arno Zang als Postdoktorand mit einem Stipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) an die State University of New York, Stony Brook, USA. Seit 1993 ist er am GFZ und hat sich 1998 an der Universität Potsdam habilitiert, wo er seit 2006 als Privatdozent tätig war. ■

Zwei hochrangige Auszeichnungen für Liane G. Benning



Professorin Liane G. **Benning**, Leiterin der GFZ-Sektion Grenzflächen-Geochemie, wurde am 8. Juni 2016 die *Bigsby Medaille* der Londoner Geological Society verliehen. Mit der Medaille werden alle zwei Jahre Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler „für besondere Dienste in jeglichem Bereich der Geowissenschaften“ ausgezeichnet. Der Preis wurde durch den englischen Arzt, Paläontologen und Geologen John Jeremiah Bigsby (1792 bis 1881) begründet und wird an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verliehen, die weniger als 25 Jahre in der Forschung aktiv sind.

Zudem wurde Liane G. Benning am 14. September 2016 von der Mineralogical Society of Great Britain and Ireland mit dem *Schlumberger Award 2016* ausgezeichnet. Der Schlumberger Award wird seit 1990 jährlich verliehen, um wissenschaftliche Exzellenz in der Mineralogie und deren Anwendungen zu würdigen. Liane G. Benning ist, in gemeinsamer Berufung mit dem GFZ, Professorin für das Fachgebiet „Interface Geochemie“ an der FU Berlin und hat eine Professur für „Experimentelle Biogeochemie“ an der University of Leeds, UK, inne. Ihre Forschungsarbeit befasst sich mit biogeochemischen Reaktionsmechanismen unter niedrigen bis hydrothermalen Temperaturen in anorganischen und biologischen Systemen. ■

Friedhelm von Blanckenburg ist Geochemical Fellow



Professor Friedhelm **von Blanckenburg**, Leiter der GFZ-Sektion „Geochemie der Erdoberfläche“, ist am 29. Juni 2016 auf der internationalen Goldschmidt-Konferenz in Yokohama, Japan, zum *Geochemical Fellow* der US Geochemical Society und der European Association of Geochemistry ernannt worden.

Die Geochemical Fellows werden seit 1996 benannt, um damit die „herausragende Leistung dieser Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf dem Feld der Geochemie“ auszuzeichnen. Jedes Jahr werden etwa zehn Geochemikerinnen und Geochemiker aus der ganzen Welt mit diesem Ehrentitel ausgezeichnet. ■

Die weltweit vertretene Verband mit einem Hauptstandort in Tulsa, USA, hat sich nach eigenen Angaben zum Ziel gesetzt, wissenschaftliche Forschung und technologische Entwicklungen zu fördern und geologische Informationen für die Öffentlichkeit verfügbar zu machen.

Brian Horsfield in die AAPG-Generversammlung gewählt



Professor Brian **Horsfield**, Leiter der GFZ-Sektion „Organische Geochemie“, ist am 28. September 2016 in die Generalversammlung des Amerikanischen Verbands der Petroleum-Geologen (AAPG) gewählt worden. Als Vertreter für Europa wird er dieses Amt von 2017 bis 2019 innehaben.

Der weltweit vertretene Verband mit einem Hauptstandort in Tulsa, USA, hat sich nach eigenen Angaben zum Ziel gesetzt, wissenschaftliche Forschung und technologische Entwicklungen zu fördern und geologische Informationen für die Öffentlichkeit verfügbar zu machen.

Brian Horsfield ist, neben seiner Funktion als Sektionsleiter am GFZ, Professor

anschießend als Vizepräsident international vertreten. Reinhard F. Hüttl war einer der Wegbereiter der Akademie und gilt als eine ihrer prägenden Persönlichkeiten. Sein Themenschwerpunkt, den er weiterführen wird, liegt in den Bereichen Energie, Nachhaltigkeit und Technikommunikation.

Präsidentenwechsel bei acatech

Professor Reinhard F. **Hüttl**, Wissenschaftlicher Vorstand des GFZ und Sprecher des Vorstands, übergibt turnusgemäß zum 8. Februar 2017 sein Amt als Präsident der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften an Prof. Dieter Spath. Spath ist acatech-Mitglied der ersten Stunde und hatte als Vizepräsident entscheidenden Anteil am inhaltlichen und strukturellen Aufbau der Akademie. Reinhard Hüttl wurde 2008 zum Präsidenten gewählt und nahm das Amt für zwei Wahlperioden wahr. Die Satzung von acatech schreibt vor, dass nur eine Wiederwahl möglich ist. Bis zum 8. Februar 2017 bleibt Reinhard Hüttl Präsident von acatech und wird die Akademie



acatech wird traditionell durch eine Doppelspitze geführt. Professor Henning Kagermann bleibt als Präsident im Amt. ■

für „Organische Geochemie und Kohlenwasserstoffsysteme“ an der TU Berlin. Er beschäftigt sich u. a. mit der Erforschung von organischem Material in Sedimentbecken und dabei insbesondere mit der tiefen Biosphäre und den Interaktionen zwischen Festgestein und Fluiden. ■

Stefano Parolai erneut zum ESC-Generalsekretär gewählt



Apl. Professor Stefano **Parolai**, Leiter des Zentrums für Frühwarnsysteme am GFZ, ist im September 2016 in Triest, Italien, in seiner Funktion als Generalsekretär der Europäischen Seismologischen Kommission (ESC) bestätigt worden. Stefano Parolai wurde erstmalig während der 34. Generalversammlung der ESC im Jahr 2014 in Istanbul, Türkei, zum Generalsekretär gewählt.

Die ESC fördert die Wissenschaft der Seismologie in Europa und den Mittelmeerstaaten. Sie unterstützt Forschungsarbeiten, erweitert und verstärkt die wissenschaftliche Zusammenarbeit und bildet junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus.

Neben seiner Arbeit am GFZ lehrt Stefano Parolai Ingenieurseismologie, Oberflächenwellenanalyse und Inversionsmethoden an der TU Berlin. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Erdbeben-Frühwarnsystemen und neuer Methoden zur Bestimmung der Variabilität von Bodenbewegungen auf kurzen Distanzen, die durch Erdbeben ausgelöst werden. Er beschäftigt sich zudem mit zahlreichen Aspekten der Erdbebenrisikobewertung und Schadensregulierung sowie der Interaktion zwischen verschiedenen Georisiken und deren Folgen. ■

Charlotte Krawczyk wird Mitglied bei acatech

Professorin Charlotte **Krawczyk** ist jüngst in die acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften gewählt worden. Die Geophysikerin leitet am GFZ die Sektion „Oberflächennahe Geophysik“ und lehrt über eine gemeinsame Berufung an der TU Berlin. Außerdem ist Charlotte Krawczyk Direktorin des Departments 2 „Geophysik“ am GFZ.

Charlotte Krawczyk beschäftigt sich seit über 20 Jahren mit der Geophysik, insbesondere mit unterschiedlichen Verfahren der Seismik und deren Interpretation. Nach einem Studium der Physik und Geophysik und einer Dissertation an der Universität Kiel war Frau Krawczyk von 1995 bis 2007 am GFZ tätig. Im Jahr 2007 wechselte sie ans Leibniz-Institut für



Angewandte Geophysik (LIAG) nach Hannover und folgte einem Ruf auf eine Professur an der TU Berlin im Fachgebiet Angewandte Geophysik, womit sie als erste deutsche Frau eine Professur im Fachgebiet der Geophysik bekleidete. Ihre fachlichen Interessen beinhalten insbesondere die geophysikalische Abbildung von Deformationen und Massentransport im Untergrund für Themen wie beispielsweise Erdfälle oder Charakterisierung des (urbanen) Untergrunds. ■

Paul-Ramdohr-Preis für Martin Kutzschbach



Der Doktorand Martin **Kutzschbach**, GFZ-Sektion „Chemie und Physik der Geomaterialien“, wurde am 28. September 2016 auf der European Mineralogical Conference (EMC) in Rimini, Italien, mit dem Paul-Ramdohr-Preis der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (DMG) ausgezeichnet. Die DMG verleiht den Preis an Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler für „besonders gute Beiträge“.

Martin Kutzschbach erhielt den Preis für seinen Vortrag mit dem Titel „The effect of tetrahedral B on B isotope fractionation between olenitic tourmaline and fluid“. Damit geht der Paul-Ramdohr-Preis im dritten Jahr in Folge an Doktorandinnen und Doktoranden des GFZ.

Im Rahmen seiner von Prof. Wilhelm Heinrich (GFZ) und Prof. Gerhard Franz (TU Berlin) betreuten Doktorarbeit beschäftigt sich Martin Kutzschbach mit der Bor-Isotopenverteilung zwischen Fluid und dem Mineral Turmalin, in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Bor-Konzentration. Die von ihm erhobenen Daten haben zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten. So dient die Bor-Isotopie von Turmalin beispielsweise als Geothermometer, als geochemischer Indikator von Massentransporten und zum besseren Verständnis der Genese von Erzlagerstätten. ■

Drei Marie-Curie-Individualstipendien bewilligt

Die Nachwuchswissenschaftlerin Dr. Ina **Neugebauer** und die Nachwuchswissenschaftler Dr. Sven **Fuchs** und Dr. Tomasz **Stawski** werden für 24 Monate mit einem *Marie-Skłodowska-Curie Individualstipendium* gefördert.

Ina Neugebauer wechselte zum 1. Juni 2016 mit ihrem Projekt „Establishing stable IRON isotopes of laminated LAKE sediments as novel palaeoclimate proxy – IRONLAKE“ vom GFZ an die Universität Genf, Schweiz. Sven Fuchs begann am 1. Oktober 2016 sein Forschungsprojekt „In-situ thermal rock properties lab – IThERLAB“ in der GFZ-Sektion „Geothermische Energiesysteme“. Er war von 2013 bis 2015 an der Aarhus Universität, Dänemark. Tomasz Stawski, bisher Universität Leeds, UK, startet am 1. Mai 2017 mit seinem Projekt „Silica and alumina nanophases – the building blocks for the ground under our feet – NanoSi-Al“ in der GFZ-Sektion „Grenzflächen-Geochemie“.

Mit einem Individualstipendium werden Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler gefördert, die über eine abgeschlossene Promotion oder mindestens vier Jahre Forschungserfahrung verfügen. Die Stipendien werden durch das EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation Horizon 2020 vergeben. Eine Voraussetzung des Stipendiums ist ein Standortwechsel an eine Forschungseinrichtung in einem anderen Land. ■

Outstanding Paper of the Year Award für Ingo Heidebüchel

Doktor Ingo **Heidebüchel**, GFZ-Sektion „Hydrologie“, ist Zweitautor der Studie „Consequences of mixing assumptions for time-variable travel time distributions“, die mit dem *MG Anderson Outstanding Paper of the Year Award 2016* ausgezeichnet wurde. Der *MG Anderson Award* der Fachzeitschrift *Hydrological Processes* würdigt „herausragende Veröffentlichungen zu hydrologischen Prozessen“.

Das internationale Autorenteam aus Deutschland, den Niederlanden, Schweden und den USA beschäftigt sich in der ausgezeichneten Studie mit neuen Methoden zur Bestimmung von Transportprozessen von Wasser in Flusseinzugsgebieten. ■

Best Paper Award für Kevin Fleming

Doktor Kevin **Fleming**, „Zentrum für Frühwarnsysteme“ am GFZ, ist Ko-Autor der Studie „A three-level framework for multi-risk assessment“, die mit dem *Georisk Best Paper Award 2015* ausgezeichnet wurde. Mit der Auszeichnung würdigen die Herausgeber der Open-Access-Fachzeitschrift *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* die Veröffentlichung des vergangenen Jahres mit der „besten fachlichen Leistung“.

Kevin Fleming ist Teil des internationalen Autorenteams um die norwegische Erstautorin Zhongqiang Liu. In der ausgezeichneten Veröffentlichung entwickeln die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein Bewertungsschema, anhand dessen Zivilschutzbehörden das potenzielle Risiko einer Katastrophe beurteilen können. ■

Bruno Merz im Editorial Board von „Klimawandel in Deutschland“

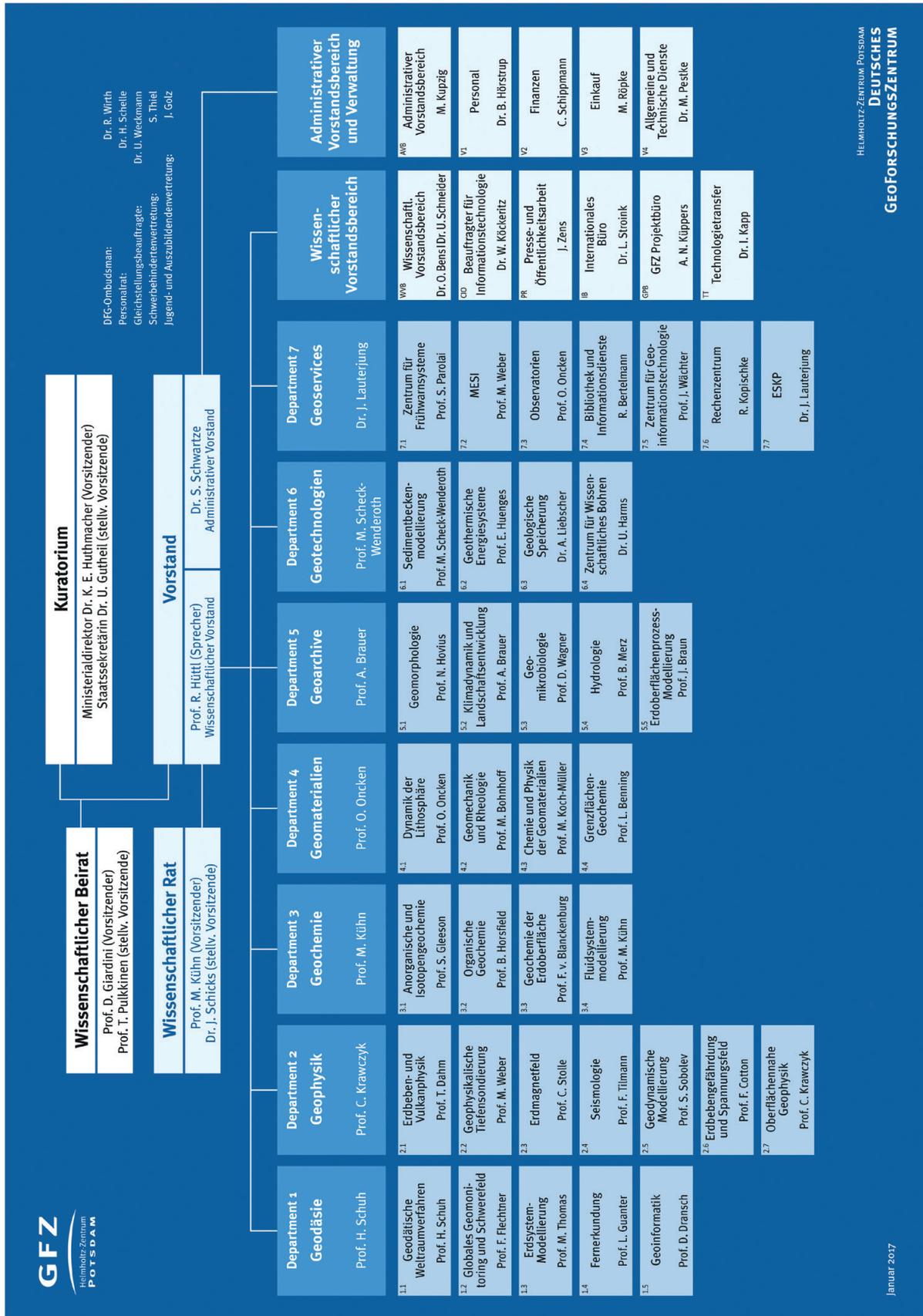


Professor Bruno **Merz**, Leiter der GFZ-Sektion „Hydrologie“, ist Mitglied im Editorial Board der Open-Access-Publikation *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Das im Springer-Verlag erschienene Buch erhebt den Anspruch, den Forschungsstand zum Klimawandel für alle Themenbereiche und gesellschaftlichen Sektoren erstmals umfassend national darzustellen. Bruno Merz hat den zweiten Teil des Buchs zu den regionalen Besonderheiten und Extremen des Klimawandels in Deutschland editiert.

In dem Buch werden bereits veröffentlichte wissenschaftliche Erkenntnisse analysiert und allgemeinverständlich dargestellt. Bruno Merz ist als Experte zu den Themenfeldern hydrologische Extreme, Hochwasserrisiken sowie Monitoring und Modellierung hydrologischer und hydraulischer Prozesse Teil des Editorial Boards. Insgesamt sind 126 Autorinnen und Autoren aus Deutschland an der Publikation beteiligt. ■



Guy P. Brasseur, Daniela Jacob, Susanne Schuck-Zöller (Hrsg.): „Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven 2017“
DOI: 10.1007/978-3-662-50397-3



Organigramm des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ

System Erde. GFZ-Journal (2016) Jahrgang 6, Heft 2
systemerde.gfz-potsdam.de

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

*Sascha Brune, Simon E. Williams, R. Dietmar Müller,
Stephan Sobolev* 4-9

**Rekonstruktion der Absenkungsgeschichte des
Argentinischen Kontinentalrands**

Ingo Dressel, Magdalena Scheck-Wenderoth, Judith Sippel 10-15

**Das Rätsel der Anden-Orogenese: Ist der Erdmantel für
den Start der Gebirgsbildung verantwortlich?**

Onno Oncken 16-21

**Das Knacken, Knistern und Knirschen beim Verschlucken
einer kalten Platte**

**Das IPOC-Observatorium überwacht seit zehn Jahren die
Subduktionszone in Nordchile**

*Bernd Schurr, Heidrun Kopp, Günter Asch, Frederik Tilmann,
Onno Oncken* 22-29

**Unterschätzte Unbekannte – Aktive Störungen in der
Oberplatte großer Subduktionssysteme**

*Pia Victor, Matthias Kemter, Oktawian Ewiak,
Thomas Ziegenhagen, Onno Oncken, Gabriel Gonzalez* 30-35

**Satellitengeodäsie und Erdbebendeformation in der
nordchilenischen seismischen Lücke**

*Marcos Moreno, Sabrina Metzger, Jonathan Bedford,
Felix Hoffmann, Shaoyang Li, Zhiguo Deng, Jürgen Klotz,
Onno Oncken* 36-41

