

System Erde

GFZ-Journal

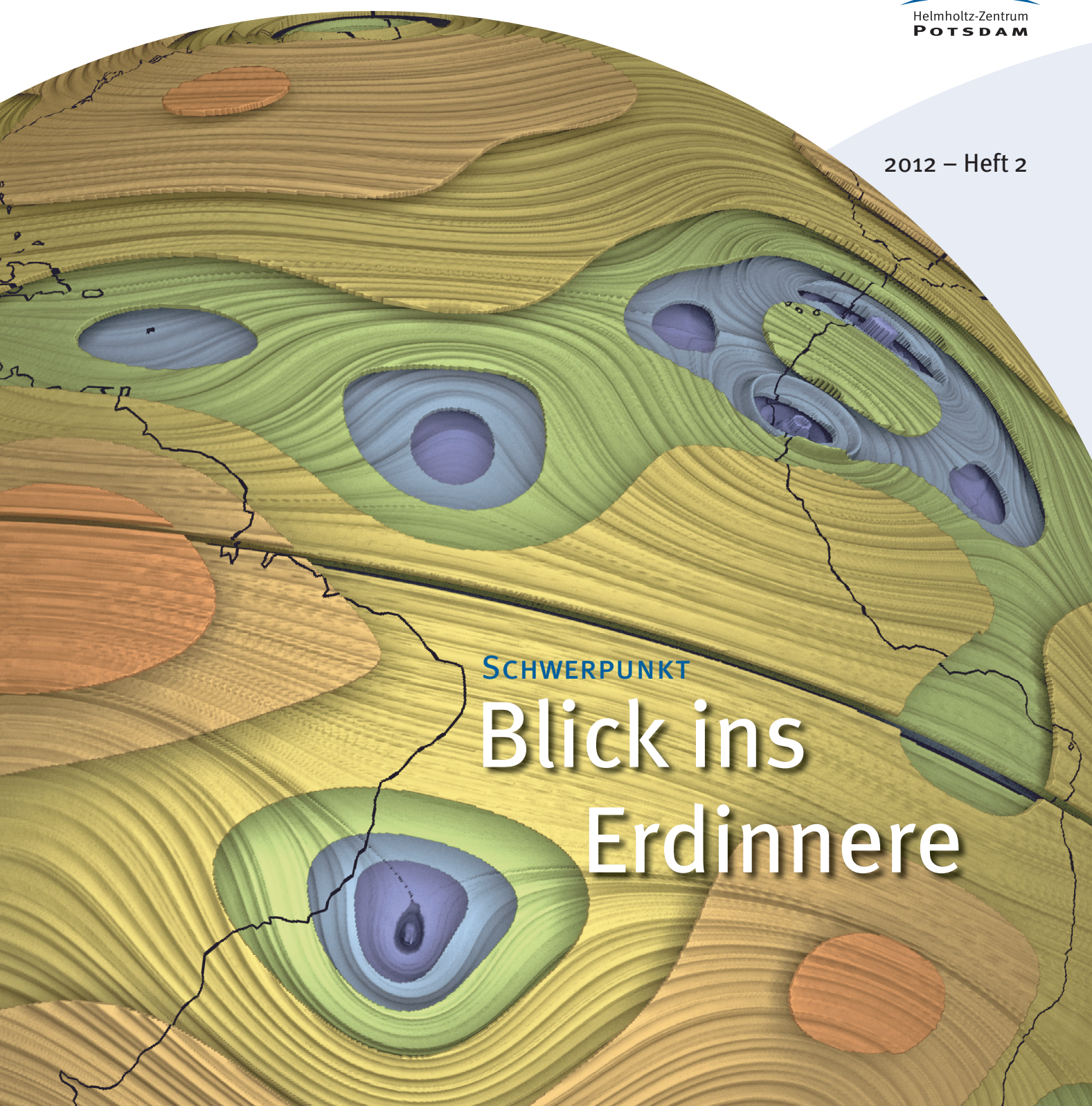
GFZ

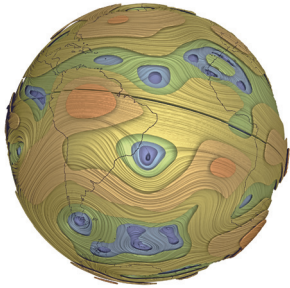
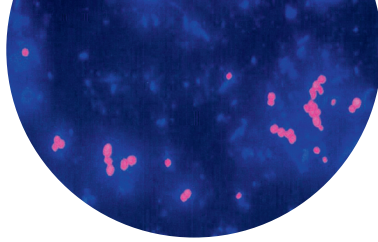
Helmholtz-Zentrum
POTSDAM

2012 – Heft 2

SCHWERPUNKT

Blick ins Erddinnere





Strömungsmuster an der Oberfläche des flüssigen Erdkerns

Das Erdmagnetfeld ist eines der wenigen Signale, mit dessen Messung wir Rückschlüsse auf die Prozesse im Erdinneren führen können. Die Abbildung zeigt aus Magnetfeldmessungen berechnete Stromlinien der Fluidbewegung an der Kern-Mantel-Grenze für das Jahr 2003. Am Äquator unter Afrika und Südamerika herrscht eine von Ost nach West weisende Strömung vor. Die Geschwindigkeit ist als Höhen- und Farbinformation aufgeprägt. Kalte, blaue Farben signalisieren Orte geringerer Geschwindigkeit, warme, rote Farben höhere Geschwindigkeit mit bis zu einigen Zehnern Kilometern pro Jahr. Die Kontinentkonturen sind zur Orientierung eingezeichnet.

Abbildung: GFZ-Sektion Magnetfeld der Erde

Impressum

Herausgeber:

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

Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Redaktion:

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

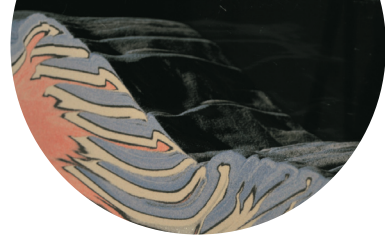
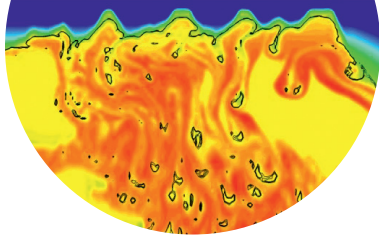
Layout:

UNICOM Werbeagentur GmbH

Grit Schwalbe, GFZ

Druck:

Druckerei Arnold, Großbeeren



Inhalt

- 6** **TIEFE BIOSPHÄRE:
LEBEN IM UNTERGRUND**
Dirk Wagner, Janine Görsch, Jens Kallmeyer
- 12** **ERDE ANALOG: EXPERIMENTELLE EINBLICKE
IN DIE GEODYNAMIK**
*Matthias Rosenau, David Boutelier, Karen Leever,
Onno Oncken*
- 18** **MANTELDYNAMIK, MAGMATISCHE PROZESSE
UND DAS AUFBRECHEN DER KONTINENTE**
*Robert B. Trumbull, Jakob K. Keiding, Ilya Veksler,
Rolf L. Romer*
- 24** **TIBET – DIE GRÖSSTE KOLLISION AUF DER
ERDE**
*Rainer Kind, Frederik Tilmann, James Mechie,
Shantanu Pandey, Prakash Kumar*
- 32** **SEISMISCHE DATENGEWINNUNG – MODERNE
MESSSYSTEME VERBESSERN DIE ABBILDUNG
DES TIEFEN UNTERGRUNDS**
Christian Haberland und Trond Ryberg
- 38** **DIE ELEKTRISCH LEITFÄHIGE ERDE**
Oliver Ritter, Ute Weckmann, Gerard Muñoz
- 44** **DAS ERDMAGNETFELD – FENSTER ZUM ERDKERN**
*Ingo Wardinski, Vincent Lesur, Seiki Asari,
Martin Rother, Monika Korte*
- 50** **DIE TIEFE ERDE IM LABOR**
*Sergio Speziale, Hans J. Reichmann,
Hauke Marquardt*
- 56** **GEODYNAMISCHE MODELLIERUNG:
ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN STRUKTUR
DER TIEFEN ERDE, VULKANISMUS UND
UMWELTKATASTROPHEN**
Stephan Sobolev und Bernhard Steinberger
- 62** **Netzwerk**
- 62 Tsunami-Frühwarnung
- 64 Grönlands aktueller Eismassenverlust
- 65 Klimabohrung am nördlichen Polarkreis
- 66 EMEC-Katalog – Das Erdbebenrisiko in
Deutschland und Europa
- 67 Methanmessungen im Tiefflug
- 68 Der Wasserfluss des Amazonas im
natürlichen Klimaarchiv
- 69 Chancen der Nutzung von Geothermie
in städtischen Ballungsräumen
- 70 GEO-FUTURE: Symposium zur
Erdsystemforschung in Südafrika
- 70 Internationale Besuche am GFZ
- 72 Aktuelle internationale Trainingskurse des GFZ
- 73 Helmholtz und GFZ
- 76** **Ausgezeichnet**
- 78** **Bücher und Medien**

Editorial

Blick ins Erdinnere



Unser Lebensraum auf der Oberfläche der Erde, der durch endogene und exogene Prozesse im Laufe von Milliarden von Jahren seine heutige Ausformung erhielt, ist Teil eines gewaltigen Wirkungsmechanismus. Der maßgebliche Antrieb für diese Prozesse sind die Energie- und Stoffumsätze im Inneren unseres Planeten. Der „Blick ins Erdinnere“ ist also keine abstrakte Fragestellung, sondern eröffnet die Sicht auf die Entwicklung des Planeten, in der die Evolution des Lebens und damit auch des Menschen ein wichtiges Teilkapitel darstellt.

Wissenschaftliches Bohren erreicht heute Tiefen von etwa zehn Kilometern. Bei

einem Äquatordurchmesser von 13 000 Kilometern entspricht das weniger als einem Tausendstel des Erdkörpers. Diese stets als „Nadelstich“ apostrophierten Forschungsbohrungen sind jedoch ein unerlässliches Werkzeug der Geowissenschaften: die Erkenntnisse aus Forschungsbohrungen waren die Grundlage für die Entwicklung der Theorie der Plattentektonik.

Und sie verwiesen bereits auf Prozesse im tiefen Erdinneren: die entdeckten magnetischen Streifenmuster und das datierbare Alter in den Bohrkernen aus Ozeanböden offenbaren Konvektionsprozesse im Erdmantel und im äußeren Erdkern. Heute wissen wir, dass mächtige Aufströmungen im Erdmantel (Plumes) von der Kern-Mantel-Grenze erfolgen, dass sie mehrmals in der Erdgeschichte die großen Urkontinente aufspalteten und auch die Ursache für große Massensterbensereignisse waren. Anders formuliert: die Evolution wurde und wird maßgeblich durch Prozesse gesteuert, die am Erdkern ihren Ursprung haben.

Äußerer Erdkern und Erdmantel stehen ganz offensichtlich in enger stofflicher wie energetischer Wechselwirkung. Die vertikalen Flüsse im Erdmantel reichen nach neueren Erkenntnissen von der Kern-Mantel-Grenze bis zur Oberfläche. Umgekehrt ist davon auszugehen, dass die Subduktion der Erdkruste bis in den unteren Mantel reicht. Damit verbunden ist ein erhöhter Wärmefluss aus dem äußeren Erdkern in dieses kühlere Mantelmaterial, woraus sich wiederum Rückwirkungen auf den Konvektionsprozess im äußeren Erdkern ergeben. Die Plattentektonik als generalisierende Theorie umfasst also den gesamten Erdkörper.

Auch die Bedingungen für das Entstehen von Leben sind seit einigen Jahren erneut im Fokus wissenschaftlichen Interesses. Die ersten Spuren von Leben lassen sich bereits vor rund drei Milliarden Jahren datieren. Aber erst mit dem Kambrium entwickelte sich explosionsartig eine unglaubliche Vielfalt an Lebensformen. Auch hier gilt, dass die Betrachtung der oberflächennahen Vorgänge offenbar durch den Blick in die Tiefe ergänzt werden muss: Bis in mehrere Kilometer Tiefe findet sich im Gestein mikrobielles

Leben, das einen ganz anderen Metabolismus besitzt als das Leben an der Oberfläche. Nicht Wasser, Licht und Sauerstoff sind hier die wesentlichen Bestimmungsgrößen: Die tiefe Biosphäre nutzt sedimentiertes organisches Material oder Geofluide, wie z. B. Kohlendioxid, Wasserstoff und Stickstoff für ihren Stoffwechsel, existiert unter hohen Drücken und Temperaturen und weist z.T. extrem langsame Regenerationsraten auf. Es ist bis heute eine ungeklärte Frage, wo und wie das Leben auf der Erde seinen Anfang nahm, in abgeschnürten flachen Randmeertümpeln, in der Tiefsee an Schwarzen Rauchern oder aber im tiefen Untergrund.

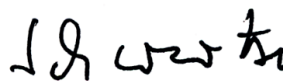
Die Vorgänge in den Tiefen des Systems Erde entziehen sich zum größten Teil direkter Beobachtung. Die geophysikalische Erfassung dieser Prozesse bietet ein Fenster in das Erdinnere. Die Kenntnisse vom inneren Aufbau unseres Planeten verdanken wir geophysikalischen Methoden wie der seismischen Tomographie und der magnetotellurischen Durchleuchtung des Erdkörpers. Die Gewinnung der dazu nötigen Daten ist im Regelfall mit einem hohen logistischen Aufwand verbunden, der meistens nur durch Verbundforschung gewährleistet werden kann.

Ihren wahren Stellenwert erweisen diese riesigen Datenmengen im Verbund mit geodynamischer Modellierung. Die Fortschritte in den (Geo)Wissenschaften beruhen wohl zu etwa gleichen Teilen auf einer verfeinerten Gewinnung hochauflösender Daten sowie auf verbesserten Möglichkeiten der – insbesondere numerischen – Modellbildung. Aber auch der technische Fortschritt im Labor ist Teil dieser Erfolgsgeschichte. Viele Überlegungen bei der Dateninterpretation oder der numerischen Modellierung beruhen auf Annahmen über die Gesteinseigenschaften in Kruste, Mantel und Kern. Die Verifizierung dieser Annahmen geschieht im Labor, wo Drücke und Temperaturen nachgestellt werden können, denen das Gestein in der Tiefe ausgesetzt ist. Die Untersuchung dieser physikochemischen Vorgänge bis hin zur atomaren Ebene erfolgt im Labor mit einer Vielzahl von Verfahren. Die Ergebnisse dieser Forschung fließen wieder zurück in die Makroebene der Konvektions- und Tektonikprozesse: so lässt sich beispielsweise die Anisotropie der Ausbreitung von Erdbebenwellen im Erdmantel mit der Ausrichtung des Minerals Ferroperiklas erklären.

System Erde: Vom Erdkern bis zum All erweist sich unser Planet als fein abgestimmter Prozesskontext. Der menschliche Lebensraum – das „human habitat“ – ist letztlich das Resultat komplexer Vorgänge, die tief unter unseren Füßen stattfinden.



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

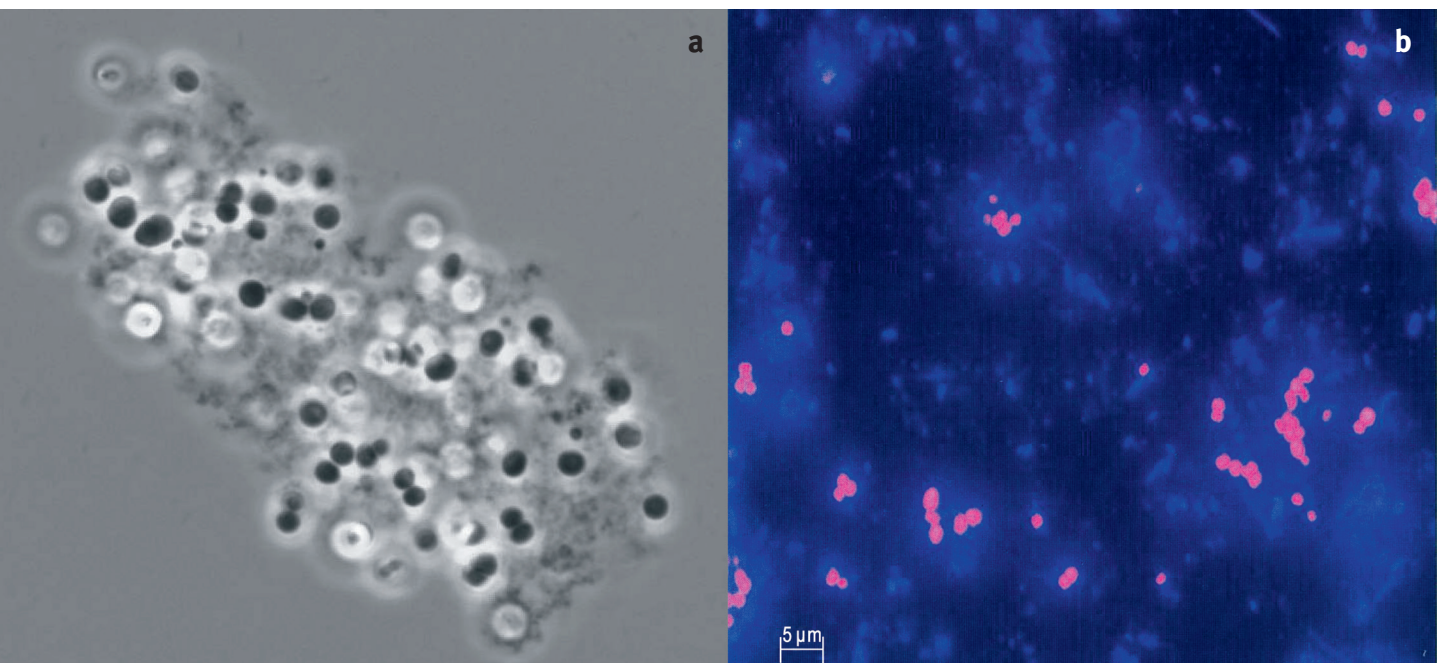


Dr. Stefan Schwartze
Administrativer Vorstand

Tiefe Biosphäre: Leben im Untergrund

Dirk Wagner, Janine Görsch, Jens Kallmeyer
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Over the past two decades, our concept about the distribution of life on Earth has fundamentally changed. Microorganisms (bacteria and archaea) colonize not only the upper soil layers, but the underlying sediments and rocks as well. Previous estimates assumed that up to 94 % of all microorganisms live in deep subsurface sediments, but recent findings show that microbial abundance in the marine subsurface is much lower than previously estimated. However, these deeply buried communities are as important as the surface biosphere for driving carbon and nutrient cycling and catalyzing a multitude of reactions between rocks, sediments, and fluids. Due to their low abundance and low metabolic rates, studies of deep biosphere microorganisms require special analytical procedures. Therefore we developed an integrated research strategy, which connects geochemical measurements of sediment properties with microbiological/molecular biological analyses of microbial communities and modeling of microbial pathways/networks. Our ongoing studies in sediments of the El'gygytgyn Crater Lake and of the South Pacific Gyre show the importance of microorganisms for the element cycles in these extreme environments. The composition of microbial communities, their role in major biogeochemical cycles and their response to changing environmental conditions, however, are still largely unknown. The future research of the German Centre for Geosciences GFZ will extend our knowledge on the role of microorganisms mainly in continental deposits, especially their impact on biogeochemical cycles, mineral weathering as well as on the quality and stability of reservoirs in the broadest sense.



Im Lauf der letzten zwei Jahrzehnte hat sich unsere Sicht der Verbreitung des Lebens auf der Erde grundlegend gewandelt. Mikrobiologische Studien der letzten Jahre zeigen, dass nicht nur die Böden als oberste dünne Schicht der Erde besiedelt sind, sondern dass auch die darunter liegenden Sedimente und Gesteine bis tief in die Erdkruste hinein von gewaltigen Mengen an Mikroorganismen (Bakterien und Archaeen) belebt werden. Bisherige Schätzungen gingen davon aus, dass bis zu 94% aller Mikroorganismen in tiefen Sedimenten unter der Erdoberfläche leben (Whitman et al., 1998). Auch wenn neuere Befunde die Werte für tiefe Meeressedimente nun deutlich nach unten korrigieren, wie unsere Ausführungen zum Südpazifischen Wirbel zeigen, kann davon ausgegangen werden, dass die unterirdische Biomasse eine ebenso wichtige Rolle für die globalen Stoffkreisläufe spielt wie die oberirdische Biomasse.

Das Ökosystem im tiefen Untergrund, die sogenannte tiefe Biosphäre, spielt eine bedeutende Rolle für die globalen Stoffflüsse sowohl über kurze als auch über lange geologische Zeitskalen. In den letzten Jahren ist das Interesse an der tiefen Biosphäre hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Nutzbarmachung von Ressourcen und anderer Anwendungsaspekte, die durch Mikroorganismen beeinflusst werden, deutlich gestiegen. Hier sind vor allem fossile Energieträger, Erdwärmennutzung, seltene Minerale und Metalle sowie die Lagerung von Gasen (z.B. Kohlendioxid oder Wasserstoff) hervorzuheben. Das Leben im Untergrund ist in weiten Teilen durch einen Mangel an Nährstoffen gekennzeichnet. Es gibt keinen Sauerstoff für Atmungsprozesse und kein Sonnenlicht für die photosynthetische Primärproduktion. Mit zunehmender Tiefe steigen außerdem die Temperatur und der Druck. Das Leben der tiefen Biosphäre ist also durch extremophile Mikroorganismen bestimmt, die sich an die jeweiligen Verhältnisse in ihrem Lebensraum angepasst haben. Viele Organismen sind

zu einer anaeroben Lebensweise ohne Sauerstoff befähigt und können einfache Verbindungen wie Wasserstoff und Kohlendioxid als Energie- und Kohlenstoffquelle nutzen (Chemolithoautotrophie). Obwohl die Existenz einer lebenden und aktiven mikrobiellen Gemeinschaft sowohl in marinen als auch in kontinentalen Ablagerungen gezeigt werden konnte (Parkes et al., 1994), ist die Struktur und Funktion dieser Populationen bisher weitgehend unbekannt.

Für ein Gesamtverständnis der biogeochemischen Stoffkreisläufe in tiefen sedimentären Ablagerungen ist neben der Kenntnis der beteiligten Mikroorganismen entscheidend, welche Prozesse ablaufen und wie hoch die jeweiligen Umsatzraten sind (Wagner et al., 2007). Die mikrobiellen Prozesse werden dabei wesentlich von den Ökosystembedingungen wie Temperatur, Druck, Substratverfügbarkeit sowie Porosität und Mineralzusammensetzung der Sedimente, aber auch den Interaktionen zwischen Mikroorganismen und dem geologischen Umfeld, bestimmt.

Mit dem Aufbau der neuen Sektion *Geomikrobiologie* am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ, in der die Expertise verschiedener Disziplinen wie der Geochemie, der Mikrobiologie und der Molekularbiologie zusammengeführt werden, wird ein wichtiger Beitrag zur Tiefen-Biosphären-Forschung geleistet. Modernste Analyseverfahren sollen Licht in die Geheimnisse des Lebens im Untergrund bringen, um Beiträge zu Fragen, wie beispielsweise der Entwicklung des Lebens unter sich ändernden Umweltbedingungen oder zur Frage der zukünftigen Energieversorgung, liefern zu können.

Methoden

Die Untersuchung der tiefen Biosphäre erfordert aufgrund der geringen Häufigkeit der Mikroorganismen und der geringen Stoffwechselraten spezielle Analyseverfahren (Abb. 1). Am GFZ wird deshalb eine integrierte Forschungsstrategie zur Aufklärung mikrobiologisch gesteuerter Prozesse in tiefen sedimentären Ablagerungen unter Berücksichtigung mikrobiologischer, molekularökologischer, (bio)geochemischer, sedimentologischer und physikalischer Methoden angewendet. Die Struktur und Funktion der mikrobiellen Gemeinschaften werden anhand von geno- (DNA, RNA) und phänotypischen Analyseverfahren aufgeklärt, die GFZ-Sektion *Organische Geochemie* analysiert dabei u.a. die mikrobiellen Biomarker. Geochemische Studien geben Aufschluss über die vorhandenen Substrate und Elektronenakzeptoren. In weiterführenden Analysen werden Umsatzraten mittels hochsensitiver Radioisotopentechniken bestimmt. Die Kombination verschiedener Techniken, wie der Durchflusszytometrie mit spezifischen Markierungsmethoden (z.B. Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung, Stabile-Isotopenmarkierung), erlaubt es, gezielt bestimmte Gruppen von Mikroorganismen anzureichern und zu

Links: Mikroskopische Aufnahmen von Mikroorganismen aus terrestrischen Ablagerungen. a) Phasenkontrastaufnahme eines Aggregats von methanbildenden Mikroorganismen; b) fluoreszenzmikroskopische Aufnahme aller Mikroorganismen (blaue Zellen) in einer Sedimentprobe sowie der zuvor markierten methanbildenden Mikroorganismen (rote Zellen) (Fotos: O. Burckhardt, GFZ)

Left: Microscopic images of microorganisms in terrestrial deposits. a) Phase contrast image of a cell aggregate of methane producing microorganisms; b) fluorescence micrograph of all microorganisms in a sediment sample (blue cells) and labeled cells of methane producing microorganisms (red cells)



Kontakt: D. Wagner
(dirk.wagner@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Methodischer Einblick in die Arbeit der Geomikrobiologen: a) Arbeiten in der Handschuhbox (Glovebox) – ein gasdicht abgeschlossener Behälter für das Arbeiten unter einer definierten z. B. sauerstofffreien Atmosphäre und zwei Anaerobieröpfe rechts vor der Glovebox dienen der Kultivierung von Mikroorganismen unter sauerstofffreien Bedingungen (Foto: J. Görsch, GFZ), b) Öffnen und Beprobieren eines Sedimentkerns nach definiertem Beprobungsschema (Foto: J. Görsch, GFZ), c) und d) wissenschaftliches Arbeiten auf einem Forschungsschiff (Fotos: J. Kallmeyer und C. Glombitza, GFZ), e) das mobile Geomikrobiologie-Labor „BugLab“ beim Abladen von einem Forschungsschiff (Foto: K. Mangelsdorf, GFZ) und f) Arbeiten im „BugLab“ während einer Expedition (Foto: C. Glombitza, GFZ)

Fig. 1: Methodological aspects of the work of a geomicrobiologists: a) Working under the glove box – a sealed container that is designed to work under defined conditions, for example oxygen-free atmosphere and two smaller incubation chambers for cultivation of microorganisms under anoxic conditions on the right in front of the glove box, b) opening and sampling a sediment core according to a defined sample scheme, c, d) scientific work on a research vessel, e) unloading of the mobile geomicrobiology lab “BugLab” from a research vessel and f) equipment of the “BugLab” during an expedition

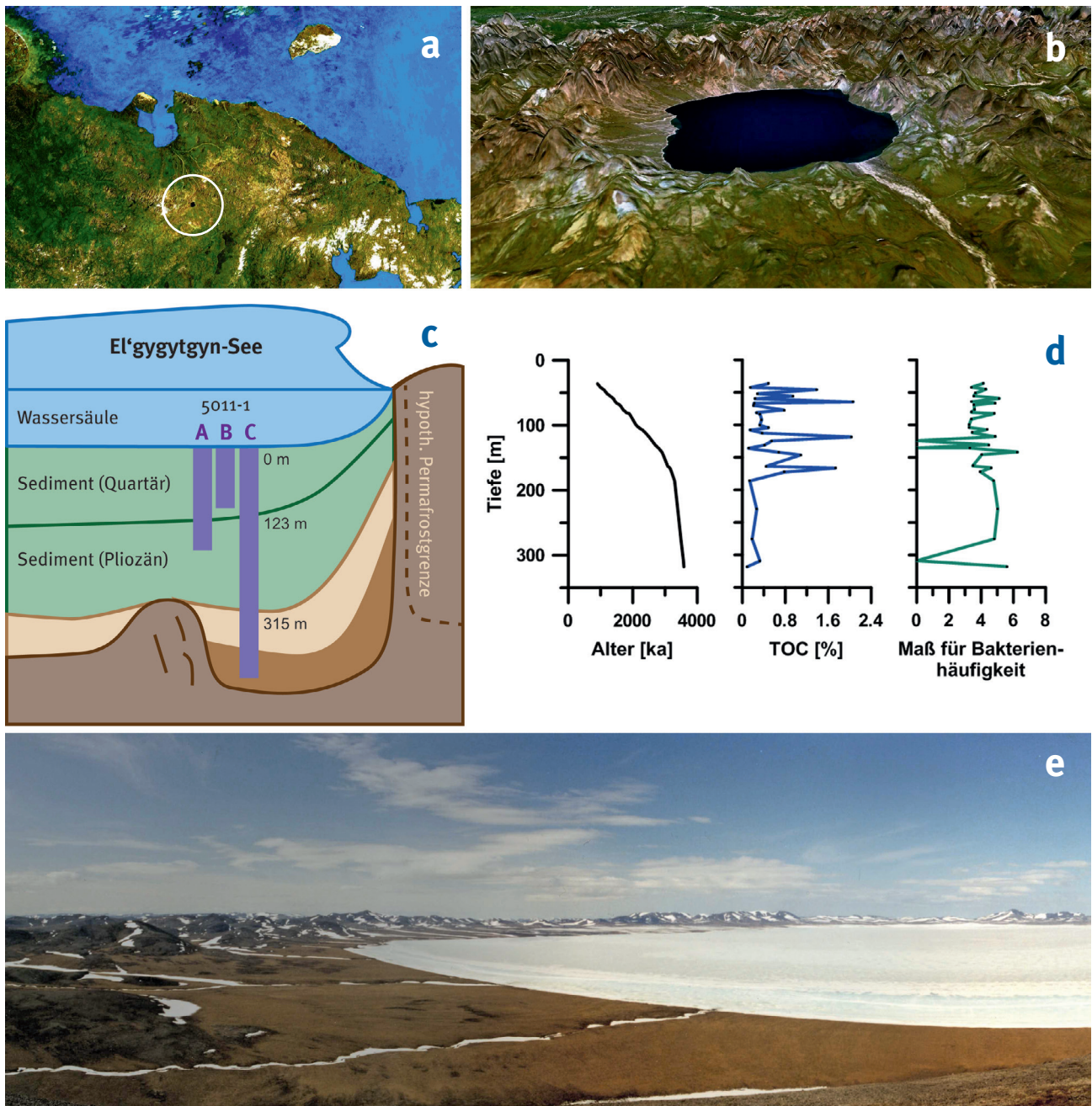


Abb. 2: Der El'gygytgyn-Kratersee als ein Beispiel für Forschung in der tiefen Biosphäre: a, b) Lokalität des Kratersees in der Russischen Arktis (Bilder: NASA World Wind), c) schematische Darstellung des Sees mit eingezeichneten Bohrungsstandorten, d) Alter und Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) sowie Bakterienhäufigkeit in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe, e) Teilansicht des Kratersees (Foto: S. Quart)

Fig. 2: The El'gygytgyn crater lake as an example for research in the deep biosphere: a, b) location of the crater lake in the Russian Arctic, c) schematic image of the lake with marked drilling locations, d) age and content of organic carbon (TOC) as well as rate of bacteria depending on the sediment depth, e) a partial view of the crater lake

untersuchen. Diese Techniken können neben klassisch-mikrobiologischen Methoden auch dazu benutzt werden, einzelne Arten zu isolieren, deren Physiologie und Phylogenie dann in weiterführenden Untersuchungen studiert werden können. Die gewonnenen Daten fließen anschließend in Modellierungen ein, die unter anderem zur Identifizierung von Kenntnislücken möglicher Stoffwechselwege und Stoffwechselnetzwerke genutzt werden.

Für zukünftige Expeditionen steht das mobile geomikrobiologische Labor „BugLab“ zur Verfügung. Es bietet den großen Vorteil, unterschiedliche Parameter an Proben direkt vor Ort messen zu können, die sonst kaum konserviert werden könnten. Zudem kann das Labor für die jeweiligen Einsätze spezifisch ausgestattet werden.

Mikroorganismen in bis zu 3,6 Mio. Jahre alten Seesedimenten

Mit dem aufgezeigten methodischen Ansatz konnten bereits erste Ergebnisse für den El'gygytgyn-Kratersee erzielt werden (Abb. 2). Dieser See stellt eine der am besten erhaltenen Meteoriteneinschlagstrukturen auf der Erde dar. Er war seit seiner Entstehung vor 3,6 Mio. Jahren (Layer, 2000) nicht vergletschert und konnte somit kontinuierlich Sedimentmaterial ansammeln. Heute finden wir eine mehr als 300 m mächtige Sedimentschicht am Grund des Sees, die sich im Lauf der Zeit in Abhängigkeit von den damals bestehenden Umweltbedingungen durch Eintragung von außen bzw. durch das Absinken von Biomasse innerhalb des Sees ausgebildet hat. Diese Seesedimente beinhalten einzigartige Informationen über das damalige Klimageschehen, die Vegetationsbedeckung im Einzugsbereich des Sees und die Geschichte des Lebens seit dem Meteoriten-Einschlag.

Im Jahre 2009 wurde im Rahmen einer internationalen Bohrkampagne (Melles et al., 2012, vgl. auch Beitrag „Klimabohrung am nördlichen Polarkreis“ in der Rubrik Netzwerk in diesem Heft) ein 317 m langer Sedimentkern erbohrt, welcher mehrere Kalt- und Warmphasen umfasst. Anhand dieses Sedimentmaterials ist es möglich, durch eine Kombination verschiedener Methoden die mikrobielle Gemeinschaft der Vergangenheit – bis hin zur Entstehung des Kraters vor 3,6 Mio. Jahren – zu rekonstruieren. Von besonderem Interesse sind neben der Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft und deren Anpassung an sich ändernde Umweltbedingungen, Aussagen über die Häufigkeit einzelner Mikroorganismen und darüber, ob in den alten Sedimentschichten lebende und somit stoffwechselaktive Mikroorganismen existieren.

Erste Ergebnisse zeigen, dass eine erfolgreiche Extraktion von DNA (Trägermolekül der Erbinformationen) aus allen Sedimentproben möglich war und dass sowohl DNA von Bakterien als auch von den sogenannten Archaeen – einzellige, ursprüngliche Mikroorganismen – für die weiteren Analysen vervielfältigt werden konnte. Zudem wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen der mikrobiellen Diversität und dem Gehalt organischen Kohlenstoffs, aus dem sich mögliche Nährstoffe speisen, nachgewiesen. In diesem Zusammenhang

konnte gezeigt werden, dass die mikrobiellen Gemeinschaften indirekt durch Klimaveränderungen beeinflusst werden. Aufgrund des Wasserkörpers sind die Seesedimente zwar vor dem direkten Einfluss wechselnder Temperaturverhältnisse geschützt, dennoch ändern sich beispielsweise während einer Warmphase die Umweltbedingungen innerhalb des Sees: schwedische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler konnten in Warmphasen anhand der biologischen Silikatbildung eine Algenblüte nachweisen, wodurch große Mengen an leichtabbaubarer organischer Substanz in die Sedimente gelangen. Aufgrund der dadurch bedingten guten Nährstoffversorgung steigt schließlich auch die Häufigkeit und Diversität der Mikroorganismen in den Ablagerungen an.

Die bisher erzielten Ergebnisse belegen, dass auch in sehr alten Sedimenten aktives mikrobiologisches Leben zu finden ist. Des Weiteren geben die Resultate aus dem El'gygytgyn-Kratersee Aufschluss über Veränderungen des Klimas in der Vergangenheit und wie die mikrobiellen Gemeinschaften darauf reagiert haben. Diese Informationen tragen zum Verständnis der Klimaentwicklung auf der Erde bei anhaltend steigenden Temperaturen, wie wir sie im Moment im Zug der globalen Erwärmung beobachten, bei.

Ein Drittel weniger Leben auf der Erde als bisher bekannt

Ein weiteres Beispiel zur Biomasse in der tiefen Biosphäre dokumentiert, wie groß der Forschungsbedarf zu dieser Thematik ist. Bisherige Abschätzungen der globalen Biomasse gingen davon aus, dass etwa die Hälfte der lebenden Biomasse in Mikroorganismen der tiefen terrestrischen und marinen Biosphäre lokalisiert ist. Diese Abschätzungen beruhten jedoch nur auf wenigen Bohrkernen aus den Auftriebsgebieten des Ostpazifiks (Parkes et al., 1994). Schon seit etwa zehn Jahren wurden diese Zahlen als zu hoch angesehen, aber aufgrund fehlender Daten konnte diese Vermutung nicht überprüft werden.

In den letzten sechs Jahren unternahm Jens Kallmeyer mehrere Expeditionen in das nährstoffärmste Gebiet der Weltmeere, den Südpazifischen Wirbel. Zusammen mit weiteren Proben aus anderen Gebieten entstand so eine neue und wesentlich größere Datenbasis über die Verteilung der Mikroorganismen in tiefen marinen Sedimenten, wie sie zuvor nicht zur Verfügung stand (Kallmeyer et al., 2012).

Insgesamt wurden Zellzählungen aus 34 Bohrkernen für die Studie genutzt (Abb. 3). Die Zellverteilung über die Sedimenttiefe wurde mit verschiedenen ozeanographischen Parametern wie beispielsweise der Sedimentationsrate, Entfernung vom Land, Wassertiefe und -temperatur korreliert. Eine besonders gute Korrelation ergab sich mit der Sedimentationsrate und Entfernung vom Land. Mit diesen beiden Parametern können etwa 80% der Variabilität der Zellverteilung im Sediment erklärt werden. Aufgrund dieser Datenbasis konnte eine neue Abschätzung vorgenommen werden, die die Zellzahlen für die tiefe marine Biosphäre um etwa 90% gegenüber den in der

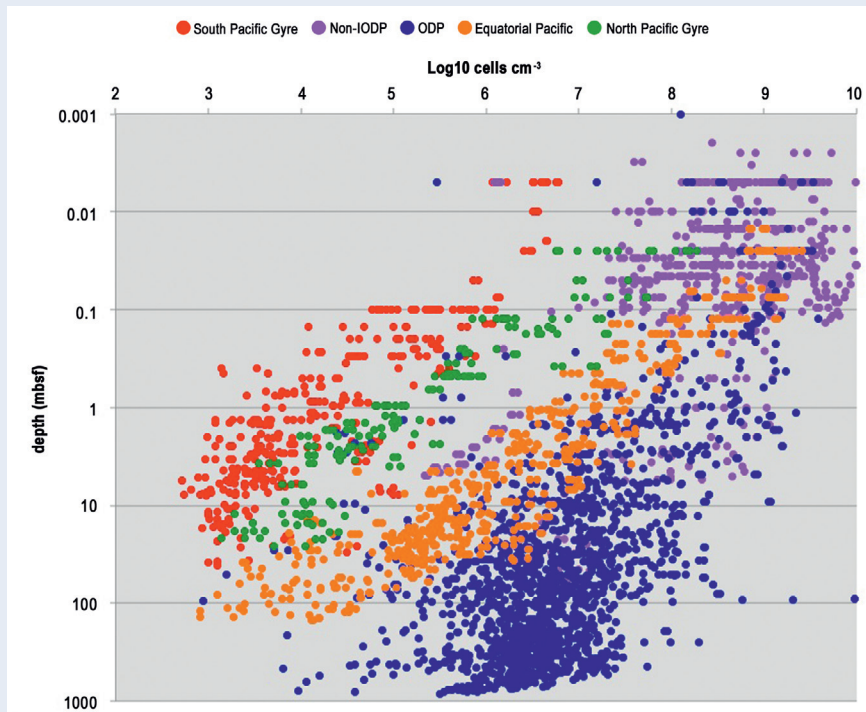


Abb. 3: Tiefenprofile der Gesamtzellzahlen für Mikroorganismen im Meeresboden verschiedener Meeresgebiete (ODP = ocean drilling program; IODP = international ocean drilling program)

Fig. 3: Vertical profile of microbial cell counts in marine sediments of different study sites (ODP = ocean drilling program; IODP = international ocean drilling program)

Vergangenheit kalkulierten Zahlen reduzierte. Außerdem wurde zum ersten Mal die Größenverteilung der Zellen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die Zellen wesentlich kleiner sind als bisher angenommen und, dass ihr Kohlenstoffgehalt ebenfalls deutlich geringer ist. Aufgrund der nun vorliegenden detaillierten Kenntnisse zur Verteilung von Mikroorganismen im Meeresboden und ihrer metabolischen Aktivität, können die bisher vorliegenden Modelle über biogeochemische Prozesse im Meeresboden verbessert werden.

Ausblick

Bisherige Untersuchungen zur tiefen Biosphäre, die vor allem an marinen Sedimenten durchgeführt wurden, zeigen die Bedeutung von Mikroorganismen in diesem extremen Lebensraum auf. Die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften, ihre Funktion in den wichtigen Stoffkreisläufen und ihre Reaktion auf sich ändernde Umweltbedingungen sind jedoch noch weitgehend unbekannt. Hier wird die zukünftige Forschung am GFZ ansetzen. Mit Hilfe kombinierter hochauflösender Methoden werden die wichtigsten Mikroorganismengruppen und ihre Schlüsselorganismen insbesondere in kontinentalen Ablagerungen identifiziert und ihre Bedeutung für die Stoffflüsse, die Mineralverwitterung sowie die Stabilität und Qualität von Lagerstätten im weitesten Sinn untersucht. Zu diesem Zweck werden mittelfristig kontinentale Tiefbohrungen mit einer geomikrobiologischen Komponente im Rahmen des „International Continental Scientific Drilling Program (ICDP)“ initiiert. Darüber hinaus wird der Aufbau einer fachübergreifenden Plattform für biogeowissenschaftliche Fragestellungen im Bereich der Tiefen-Biosphären-Forschung am GFZ geplant.

Dieses sogenannte BioGeoLab soll die räumlichen Voraussetzungen für eine interdisziplinäre Teamarbeit schaffen sowie spezielle Labore, beispielsweise für Langzeitexperimente oder Untersuchungen unter In-situ-Bedingungen wie hohe Drücke und hohe Temperaturen, zur Verfügung stellen.

Literatur

- Kallmeyer, J., Pockalny, R., Adhikari, R. R., Smith, D. C., D'Hondt, S. (2012): Global distribution of microbial abundance and biomass in subsurface sediment. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 109, 40, 16213-16216, 10.1073/pnas.1203849109.
- Layer, P. W. (2000): Argon-40/argon-39 age of the El'gygytgyn impact event, Chukotka, Russia. - *Meteoritics & Planetary Science*, 35, 3, 591-599, 10.1111/j.1945-5100.2000.tb01439.x.
- Melles, M., Brigham, Grette, J., Minyuk, P. S., Nowaczyk, N. R., Wennrich, V., DeConto, R. M., Anderson, P. M., Andreev, A. A., Coletti, A., Cook, T. L., Haltia, Hovi, E., Kukkonen, M., Lozhkin, A. V., Rosén, P., Tarasov, P., Vogel, H., Wagner, B. (2012): 2.8 Million Years of Arctic Climate Change from Lake El'gygytgyn, NE Russia. - *Science*, 337, 6092, 315-320, 10.1126/science.1222135.
- Parkes, R. J., Cragg, B., Bale, S. J., Getliff, J. M., Goodman, K., Rochelle, P. A., Fry, J. C., Weightman A. J., Harvey, S. M. (1994): Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments. - *Nature*, 371, 6496, 410-413, 10.1038/371410a0.
- Wagner, D., Gattinger, A., Embacher, A., Pfeiffer, E.-M., Schloter, M., Lipski, A. (2007): Methanogenic activity and biomass in Holocene permafrost deposits of the Lena Delta, Siberian Arctic and its implication for the global methane budget. - *Global Change Biology*, 13, 5, 1089-1099, 10.1111/j.1365-2486.2007.01331.x.
- Whitman, B., Coleman, D. C., Wiebe, W. J. (1998): Prokaryotes: the unseen majority. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 95, 12, 6578-6583.

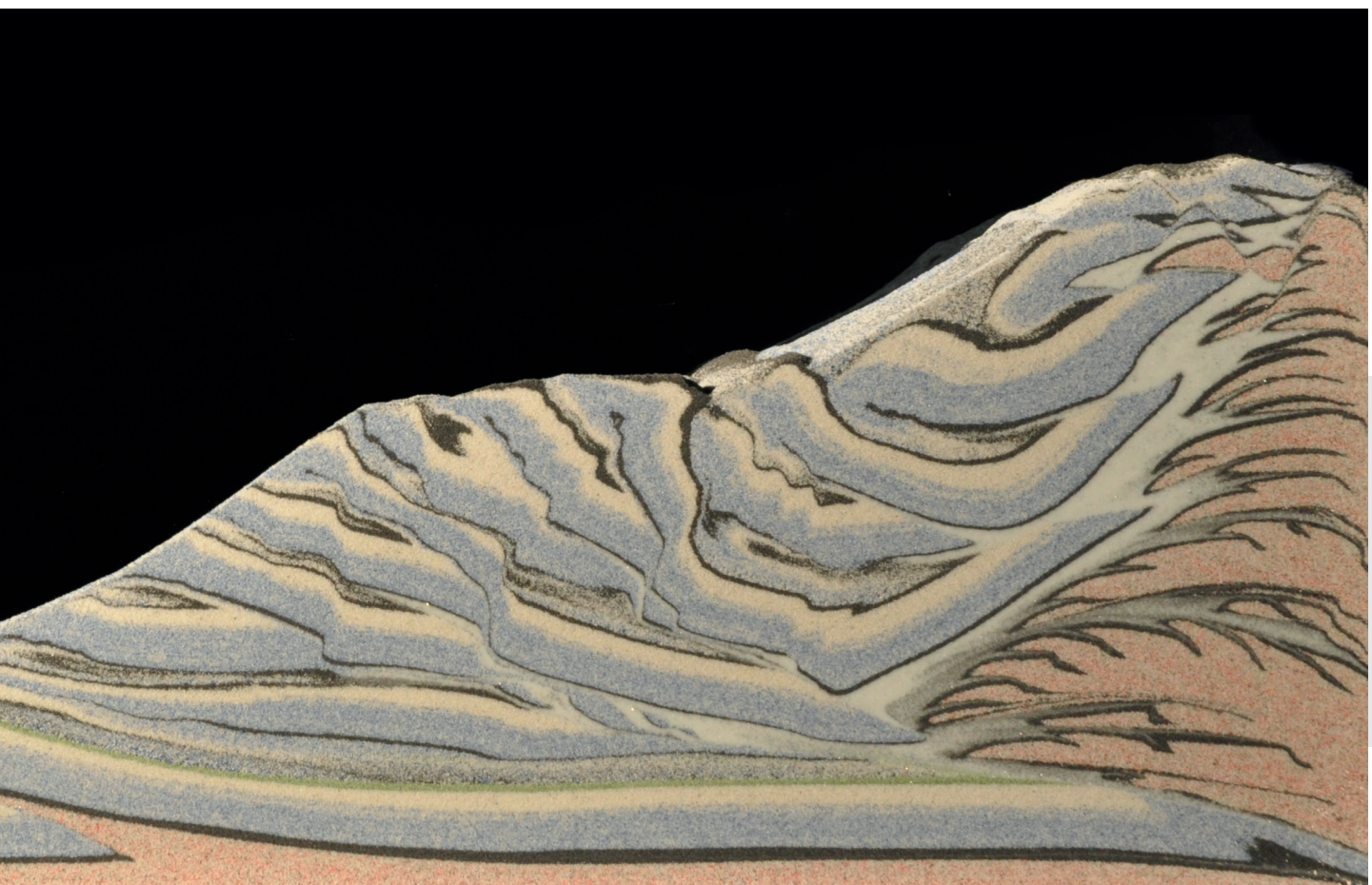
Erde analog: Experimentelle Einblicke in die Geodynamik

Matthias Rosenau¹, David Boutelier², Karen Leever¹, Onno Oncken¹

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² GFZ, jetzt: School of Geosciences, Monash University, Clayton, Australien

Geodynamic processes inside planet earth drive crustal scale tectonics and surface processes some of which are associated with geohazards. Because the driver is slow, hazardous events occur infrequent enough to escape society's generally short-term awareness. However, its ultimate impact on society can be significant as evidenced by recent geo-catastrophes like the Sumatra and Japan subduction earthquakes and tsunami. Physical modelling of geohazards therefore becomes an increasingly important tool to understand our longterm exposure. At GFZ we combine analogue and numerical models in order to better understand the interplay between geodynamic processes at depth and geohazards like earthquakes, landslides and tsunamis. By simulating long time series of continuous and episodic processes, we provide archives of potentially hazardous events that allow statistical analysis beyond the instrumental record and, together with physics-based modeling a deeper knowledge of the underlying processes with the aim to provide probabilistic and, where reasonable, deterministic predictions of spatio-temporal pattern of tectonic hazards.



Die großen Gebirgszüge wie die Anden, der Himalaya und die Alpen sind imposante Zeugen der Dynamik unseres Planeten. Gleichzeitig sind sie aber auch eine Quelle tektonischer Naturgefahren wie Erdbeben und Bergstürze. Die Entstehung von Gebirgen im Lauf vieler Millionen Jahre entzieht sich jedoch unserer direkten Beobachtung. Bohrungen geben einen eindimensional-linearen Einblick in die Beschaffenheit des Untergrunds bis wenige Kilometer Tiefe. Geophysikalische Methoden ermöglichen ein dreidimensionales Bild des Untergrunds, das aber nicht sehr hoch aufgelöst ist und mit zunehmender Tiefe an Schärfe verliert. Ein hoch auflösender und um die Zeitachse erweiterter, vierdimensionaler Blick in die Tiefe kann nur durch Simulation der beteiligten Prozesse gelingen. Mithilfe von Experimenten anhand labormaßstäblicher Analogmodelle können einige der Aspekte der Gebirgsbildung als geodynamischer Prozess modelliert und damit einhergehende Naturgefahren im Zeitraffer simuliert und unter kontrollierten Bedingungen in Raum und Zeit untersucht und verstanden werden.

Die Analogmodellierung

Die so genannte „Analogmodellierung“ basiert auf der Ähnlichkeitstheorie, laut derer zwei Systeme unterschiedlichen Maßstabs physikalisch ähnlich sind, sofern bestimmte dimensionslose Kennzahlen zwischen Modell und Original gleich bleiben (Buckingham, 1914; Hubbert, 1937). Ist dies gewährleistet, können Modellbeobachtungen auf das Original übertragen werden. Eine für die Gebirgsbildung wichtige Kennzahl ist der Reibungskoeffizient, der die Festigkeit von Gesteinen in bestimmten Tiefen der spröden Erdkruste charakterisiert. Wenn Trägheitskräfte eine Rolle spielen, z. B. bei schnell ablaufenden Prozessen wie Erdbeben oder Bergstürzen, spiegelt

sich die Modellähnlichkeit in der Konstanz der Froudezahl wider, die das Verhältnis von Trägheit und Schwerkraft definiert. Aus der Konstanz der Kennzahlen ergeben sich Skalierungsgesetze für Raum, Zeit und Masse. Räumlich lassen sich geologische Deformationsprozesse auf diese Weise soweit „schrumpfen“, dass 1 cm im Labor 0,1 bis 10 km in der Natur entspricht. Die Zeit lässt sich flexibel raffen, so dass eine Sekunde zehn Minuten oder auch 1000 Jahre und mehr repräsentieren kann, je nachdem ob hochdynamische oder geodynamische Prozesse zeitlich aufgelöst betrachtet werden sollen.

Materialeigenschaften wie beispielsweise Festigkeit und Dichte kontrollieren die Deformationsprozesse – in der Natur wie auch im Analogmodell. Aufgrund der aus den Kennzahlen abgeleiteten Skalierungsgesetze lassen sich die auf dem gewünschten und den durch die Grundgrößen Masse, Länge, Zeit charakterisierten Maßstab Materialeigenschaften des Analogmodells ableiten. So ergibt sich beispielsweise, dass bei einem Material wie Sand, das eine ähnliche Dichte wie Krustengestein aufweist, die Festigkeit im Labormaßstab um etwa fünf Größenordnungen geringer sein muss, als die von Fels. Dies wird in aller Regel bereits durch die Reibungskräfte zwischen den einzelnen Körnern in einer wenige Zentimeter mächtigen Sandschicht erreicht, so dass Analogmodelle von Gebirgen typischerweise aus losem Sand bestehen und nur wenige Dezimeter Höhe erreichen (Lohrmann et al., 2003, Abb. 1).

Die tektonische Entwicklung (Deformation) der Analogmodelle unter verschiedenen kinematischen Randbedingungen, wie z. B. bei horizontaler Verkürzung, wird mit optischen Verfahren analysiert. Hierzu zählt die Particle Image Velocimetry (PIV), ein pixel-basiertes Bildkorrelationsverfahren mit dem Verschiebungen im Modell räumlich hoch auflösend und akkurat quantifiziert werden können (Adam et al., 2005). Die Präzision der PIV-Methode erlaubt dabei die Erfassung von Versätzen im Sub-pixel-Bereich. Dies entspricht nach derzeitigem Stand der Technik digitaler Aufnahmeverfahren wenigen Mikrometern im Modell. Auf natürliche Maßstäbe skaliert, entspricht dies Verschiebungen im Bereich von Dezimetern und liegt somit in Dimensionen der auf menschlichen Zeitskalen stattfindenden Deformationen, wie sie heute z. B. durch weltraum-geodätische Messmethoden erfasst werden. Erst diese moderne, präzise optische Messung erlaubt die Anwendung von Analogverfahren auf Naturgefahren, die in aller Regel nur kleinste, hochdynamische Inkremente der zugrunde liegenden geodynamischen Prozesse sind. Erdbeben entlang konvergierender Plattenränder in Subduktionszonen sind ein spektakuläres Beispiel hierfür. Trotz der gewaltigen Zerstörungen, die einzelne Beben, wie z. B. vor Sumatra 2004 oder Japan 2011 bewirken können, sind koseismische Versätze von wenigen Zehnermetern alle paar hundert Jahre nur ein

Links: Gebirge aus Sand: Die Entwicklung tiefer Strukturen während geodynamischer Prozesse kann mit „Sandbox“-Experimenten im Zeitraffer und im Miniaturmaßstab simuliert werden (untere Bildkante ca. 40 cm). (Foto: M. Rosenau, GFZ)

Left: Mountains of sand: the evolution of deep structures during geodynamic processes can be simulated at time lapse miniature scale using sandbox experiments.



Kontakt: M. Rosenau
(rosen@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Links: Abbildung eines labormaßstäblichen Gebirges, entstanden durch Verkürzung ursprünglich horizontaler Sandschichten (von unten nach oben: rot-weiss-blau); rechts: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Quarzsand, wie er in der Analogmodellierung von Gebirgen Verwendung findet (Fotos: M. Rosenau, H. Kennitz, GFZ)

Fig. 1: Left: Image of a lab-scale Mountain as a result of shortening an initially horizontal sand layer (bottom to top: red-white-blue); right: Scanning electron microscopic image of quartz sand used for analogue modeling of mountains

kleiner Ausdruck der erdgeschichtlich wirkenden Kräfte. Vor diesem Hintergrund erscheint es umso wichtiger, geodynamische Prozesse auf Zeit- und Raumskalen zu betrachten, die menschlichen Maßstäben entsprechen. Ziel der Forschung im Analoglabor des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ ist es daher, Deformationsprozesse auf globaler, regionaler und lokaler Skala in analogen Experimenten zu simulieren, Zusammenhänge auf geologischer und auch menschlicher Zeitskala zu erkennen und so das Verständnis dieser Prozesse und deren Vorhersagbarkeit zu verbessern.

Globalskalige Analogmodelle: Experimentelle Simulation von Subduktion und Plattenkonvergenz

Die Simulation globalskaliger geodynamischer Prozesse, die der regionalen Tektonik zu Grunde liegen, stellt im Labormaßstab mittels Analogmodellen aufgrund der thermomechanischen Prinzipien und der ablaufenden chemisch-mineralogischen Prozesse sowie Phasenumwandlungen eine große Herausforderung dar. In einem vom GFZ verfolgten Ansatz wird wachsartiges Material, dessen Festigkeit temperaturabhängig ist, unter kontrollierten thermischen und kinematischen Randbedingungen deformiert (Boutelier et al., 2012). Typischerweise werden hiermit konvergierende Lithosphärenplatten simuliert, die auf der flüssigen Asthenosphäre „schwimmen“, deren labormaßstäbliches Analogon Wasser darstellt (Abb. 2). Heizspiralen und -strahler erlauben das Einstellen eines kontrollierten thermischen Vertikalgradienten im Modelltank, der dem geothermischen Gradienten entspricht. Der Ansatz erlaubt in Verbindung mit numerischen Modellen das Zusammenspiel zwischen plattentektonischen Kräften, Reibung zwi-

schen den Platten sowie Auftrieb und Deformationslokalisierung innerhalb der Platten in dreidimensionalen, geometrisch komplexen Konfigurationen systematisch zu untersuchen.

Von global zu regional: Experimentelle Simulation von Kollision und Gebirgsbildung

Kollidieren zwei kontinentale Lithosphärenplatten infolge fortschreitender Konvergenz, führt dies zu regional verteilter Verkürzung von Kruste und Anteilen des oberen Mantels. Nahezu alle großen Gebirge der Erde sind morphologischer Ausdruck dieses Prozesses. Im Gegensatz zu lokalisierten Plattengrenzen wie Subduktions- oder Transformzonen ist die Deformation in kontinentalen Kollisionszonen häufig auf mehrere Bruch- und Störungszonen (eine sogenannte „diffuse“ Plattengrenze) verteilt. Die Entstehung von Brüchen kann zwar aus einfachen mechanischen Prinzipien abgeleitet werden, eine Störungsreaktivierung infolge mechanischer Interaktion folgt jedoch oft komplexen raumzeitlichen Aktivitätsmustern mit unterschiedlichen, sich teilweise überlagernden Wellenlängen und Perioden. Daher ist die intrakontinentale Deformation auf kurzen Zeiträumen äußerst schwer vorhersehbar. Die Bevölkerung, die entlang reaktiver Störungen wohnt, kann daher von großen Erdbeben unvorbereitet getroffen werden. Ein Beispiel hierfür ist das verheerende Wenchuan-Beben von 2008 (China). Dieses Beben trat „unerwartet“ entlang einer Bruchzone auf, die aufgrund ihrer großen Entfernung zur tektonisch aktiven Himalaya-Front vermutlich nur alle paar tausend Jahre episodische Aktivität zeigt und nicht als seismisch aktiv bekannt war. Hier setzt Analogmodellierung an: Sie liefert Einblicke in raumzeitliche Muster der Störungsaktivität in kontinentalen

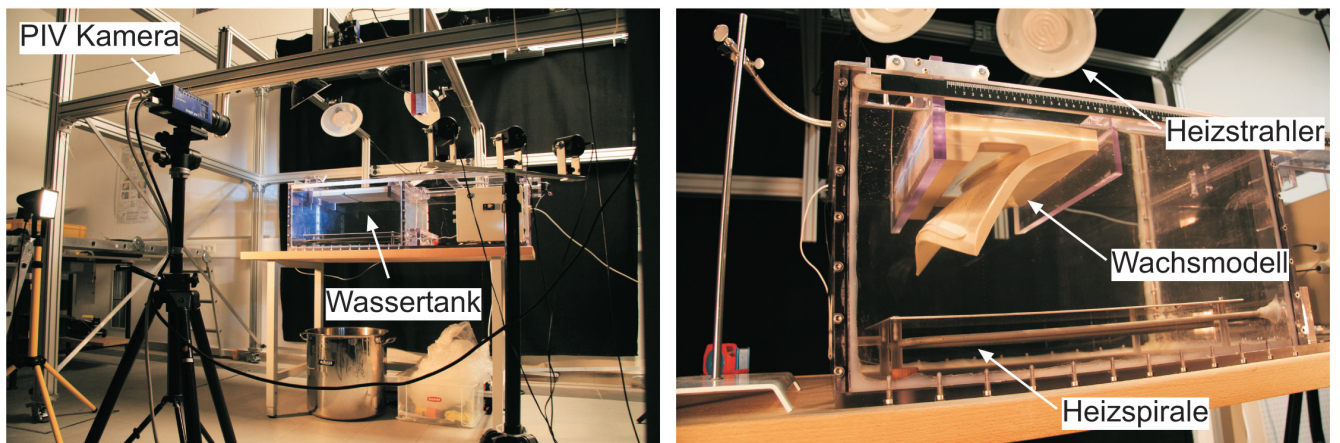


Abb. 2: Typischer Experimentaufbau zur Simulation globalskaliger geodynamischer Prozesse wie Subduktion und Plattenkonvergenz (Fotos: D. Boutelier, GFZ)

Fig. 2: Typical experimental setup for simulating globalscale geodynamic processes like subduction and plate convergence

Kollisionszonen auf nahezu allen relevanten Zeitskalen. In sogenannten Partitionierungsexperimenten (Abb. 3) werden beispielsweise die Bildung und Reaktivierung von Störungen unter schräger Konvergenz simuliert und mithilfe der PIV-Methode räumlich und zeitlich hochauflösend quantifiziert und mittels Zeitreihenanalyse untersucht. Eine Hauptbeobachtung ist hier das zyklische Verhalten der Deformationsfront, in der quasiperiodisch und quasi-äquidistant neue Aufschiebungen entstehen, deren Kinematik sich im Lauf eines Zyklus aber systematisch ändert und mit der Reaktivierung von intramontanen Störungen als Blatt- und Aufschiebungen einhergeht. Dabei scheinen Reaktivierungen von intramontanen Störungen als Aufschiebungen für die Aufrechterhaltung eines kritischen Hangwinkels verantwortlich zu sein und gegen Ende eines Akkretionszyklus an Frequenz und Magnitude zuzunehmen. Abgesehen von diesem Langzeittrend sind einzelne Reaktivierungsereignisse derzeit nicht vorhersagbar, da der Erdbebenprozess selbst noch nicht ausreichend verstanden ist.

Von regional zu lokal: Experimentelle Simulation tektonischer Naturgefahren

Trotz der niedrig erscheinenden tektonischen Raten mit nur einigen Millimetern Plattenkonvergenz und Heraushebung der Gebirge pro Jahr, gehen von geodynamischen Prozessen häufig direkte Gefahren für den Menschen aus. Dem liegt zugrunde, dass geodynamische Prozesse meist kritische Systemzustände erzeugen. So liegen zum Beispiel die Spannungen in der Erdkruste oder Hangneigungen in Gebirgen oft nahe der Versagensgrenze des Materials und fluktuieren nur wenig über längere, geologische Zeiträume. Selbst große Erdbeben und Hangrutschungen (mit Momenten-Magnituden 8 oder größer), die lokal katastrophale Folgen haben können, ändern diesen Zustand nur minimal. Eine Folge dieser „selbstorganisierten

Kritikalität“ ist, dass einzelne Ereignisse, die zur Aufrechterhaltung des kritischen Zustands dienen, prinzipiell nicht vorhersagbar sind und auch äußerst sensitiv auf kleinste Änderungen in den Randbedingungen oder Materialeigenschaften reagieren.

Ein solches kritisches Systemverhalten ist durch Ereigniskaskaden, dem sogenannten „Schmetterlingseffekt“, und eine starke Kopplung einzelner Komponenten geprägt. Bezogen auf tektonische Naturgefahren bedeutet dies, dass deterministische Vorhersagen von potentiell katastrophalen Ereignissen (Vorhersage von Ort, Zeit und Magnitude eines Ereignisses) generell nicht möglich sind und Gefährdungseinschätzungen lediglich auf wahrscheinlichkeitstheoretischer (statistisch-stochastischer) Grundlage erfolgen können (probabilistische Vorhersagen). Die Unsicherheit in der Vorhersage geodynamisch getriebener, tektonischer Naturgefahren ist umso größer, da weder die lokalen Zustände im Erdinneren noch deren Randbedingungen und lokalen Materialeigenschaften ausreichend bestimmt werden können. Auch hier setzt die experimentelle Simulation mittels Analogmodellen an, die selbstorganisiert-kritische Zustände unter kontrollierten Randbedingungen und definierten Materialeigenschaften schafft und das resultierende Systemverhalten studiert. Durch Systemvereinfachung bzw. Reduktion der beteiligten Prozesse können Kopplungseffekte identifiziert, deren Mechanismen verstanden und Parameterinflüsse systematisch untersucht werden.

Anhand experimenteller Erdbebensimulationen (Abb. 4), die sich die speziellen (geschwindigkeitsabhängigen) Reibungseigenschaften von Reiskörnern und Zucker zunutze machen, konnte beispielsweise gezeigt werden, dass es einen systematischen Zusammenhang zwischen räumlichen und zeitlichen Eigenschaften in Subduktionszonen gibt (Rosenau und Oncken, 2009). So scheinen die statistischen Eigenschaften

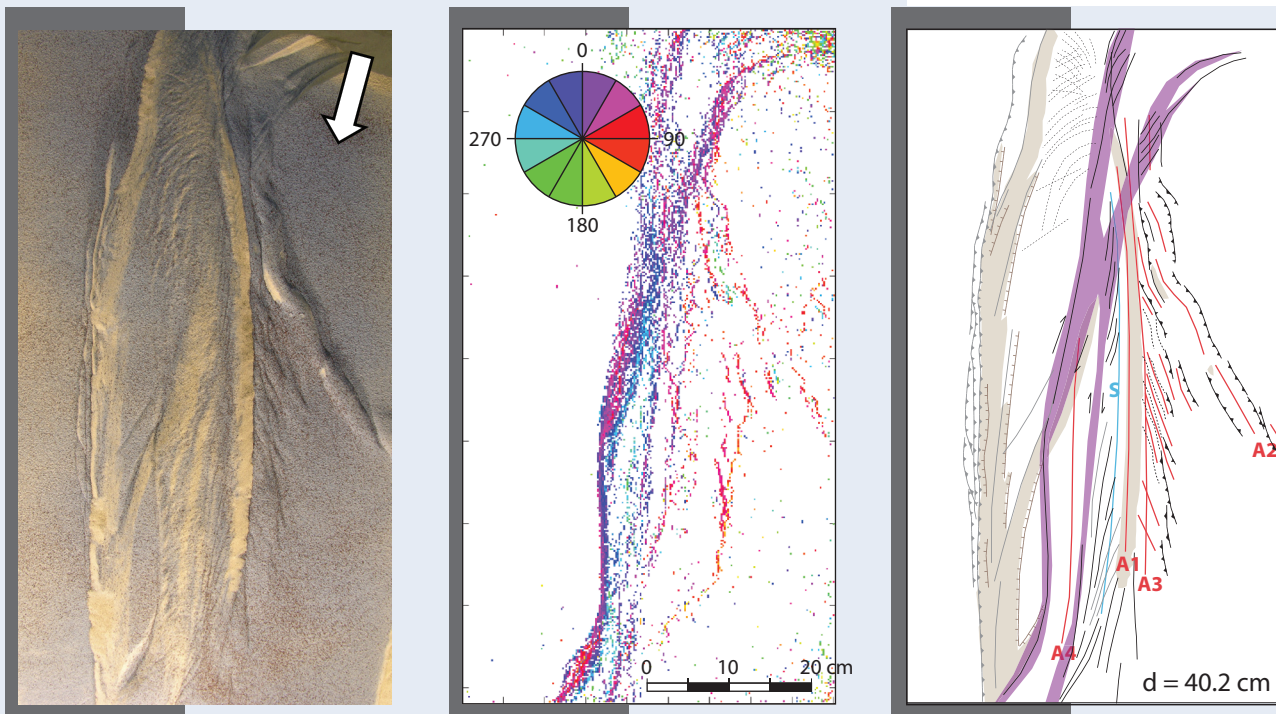


Abb. 3: Partitionierungsexperiment mit 15° Konvergenzwinkel (Pfeil = Bewegungsrichtung der rechten Platten gegenüber der linken (grau unterlegt)); links: Aufsicht auf das entstehende „Gebirge“; Mitte: Aus PIV-Daten abgeleitete Kinematik von aktiven Störungen (Rot = Aufschiebung, Lila = Blattverschiebung); rechts: Interpretierte Störungsgeometrie und Altersabfolge. (Abb. K. Leever, GFZ)

Fig. 3: Partitioning experiment with 15° convergence angle (arrow = motion of righthand side plate with respect to lefthand side (grey background)); left: Top view of evolving „Mountain range“; centre: Active fault kinematics derived by the PIV method (red = thrusting, purple = strike slip); right: Interpreted fault geometry and succession.

ten der Wiederkehrzeiten großer Subduktionsbeben an die strukturelle Ausprägung von Forearc-Becken gekoppelt zu sein. Demnach reflektieren stark ausgeprägte Becken, wie sie z. B. am Chilenischen Kontinentalrand vorkommen, zum einen durch inkrementelle tektonische Hebung an den Rändern großer Subduktionsbeben die Bebenfläche räumlich. Gleichzeitig wird aufgrund der tektonischen Stabilisierung der die seismogene Zone überlagernden Gesteinsschichten ein zeitlich periodisches Verhalten gefördert. Dies ist insofern interessant, als dass die Untersuchungen darauf hindeuten, dass räumlich wie zeitlich begrenzte Beobachtungen der Morphologie eines Plattenrands Hinweise auf das seismogene Verhalten jenseits des menschlichen Beobachtungshorizonts geben.

Große Subduktionsbeben erzeugen nicht nur Erschütterungen, sondern können auch den Meeresboden deformieren und so verheerende Tsunami auslösen, wie während der Beben in Sumatra (2004), Chile (2010) und Japan (2011) mit zum Teil katastrophalen Folgen für die Bevölkerung und die Infrastruktur geschehen. In Verbindung mit Computermodellen zur Ausbreitung von Wellen kann die experimentelle Simulation von Subduktionsbeben helfen, die Unsicherheiten in den Auflauhöhen zu erwartender Tsunami zu reduzieren. Simulationen

deuten darauf hin, dass koseismische Meeresbodenhebungen bzw. -senkungen systematisch in Raum und Zeit auftreten und über relativ einfache Gesetzmäßigkeiten mit primären Bebenparametern und Auflauhöhen in Zusammenhang stehen (Rosenau et al., 2010). Hieraus lassen sich Skalierungsgesetze ableiten, mit denen aus kurz (wenige Minuten) nach dem Beben bereits vorhandenen Informationen über die Bebenstärke und Tiefe die zu erwartenden Tsunami im Rahmen der Unsicherheiten vorhergesagt werden können.

Neben Tsunami gelten auch Hangrutschungen und als Bergstürze bezeichnete gravitative Massenbewegungen als durch Erdbeben ausgelöste, sekundäre Naturgefahren. Sie werden mithilfe der experimentellen Simulation am GFZ untersucht. Aufgrund des relativ großen Maßstabs der verwendeten Analogmodelle werden hier Materialien hoher Dichte (z.B. Granatsand) und hoher Kohäsion (z.B. Stärkemehl) verwendet. Ähnlich wie Erdbeben, die die Spannungen in der Erdkruste im kritischen Zustand halten, sind episodisch auftretende Massenbewegungen neben diffusiven Erosionsprozessen Mechanismen, um Gebirgshänge nahe dem kritischen Zustand zu halten. Auch ihre Größenverteilung folgt ähnlich dem Gutenberg-Richter-Gesetz für Erdbeben einem Potenzgesetz,

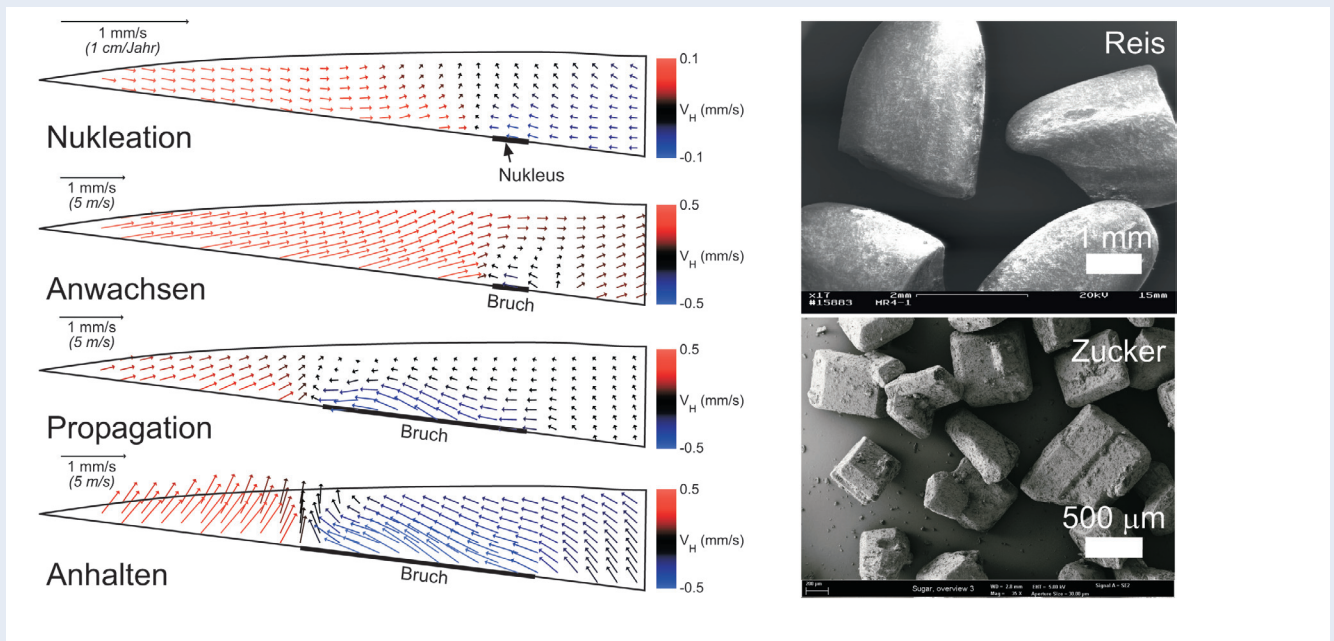


Abb. 4: Erdbebensimulation mittels Analogmodell. Links: Mittels der PIV-Methode zeitlich und räumlich hochaufgelöstes Bild der elastischen Oberplattendeformation während eines großen Subduktionsbebens (Simulation); von oben nach unten sind die Partikelpfade während der Nukleationsphase, des Anwachsens, der Propagation bis zum Stoppen des Bruchereignisses dargestellt (überhöht); rechts: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Reis und Zucker, wie sie in der Erdbebensimulation Anwendung finden (Fotos: H. Kemnitz, GFZ)

Fig. 4: Earthquake simulation using an analogue model. Left: Temporally and spatially highly resolved image of the simulated elastic hanging wall deformation during a great subduction earthquake (simulation); right: Scanning electron microscope image of rice and sugar used to simulate earthquakes

d.h. sie sind über mehrere Größenordnungen selbstähnlich und folgen weitgehend unabhängig von ihrer Größe den gleichen physikalischen Prinzipien im Großen wie im Kleinen. Dies ist im Hinblick auf die experimentelle Simulation solcher Prozesse mittels labormaßstablicher Analogmodelle von besonderer Bedeutung, da die zu berücksichtigenden Parameter so auf ein Minimum beschränkt werden können.

Die experimentelle Simulation von Naturgefahren und deren geodynamische Steuerfaktoren stellt eine faszinierende Herausforderung dar und ermöglicht gleichzeitig ein prozessorientiertes Verständnis von Georisiken ergänzend zu stochastischen Verfahren.

Literatur

- Adam, J., Urai, J. L., Wieneke, B., Oncken, O., Pfeiffer, K., Kukowski, N., Lohrmann, J., Hoth, S., van der Zee, W., Schmatz, J. (2005): Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting - new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques. - *Journal of Structural Geology*, 27, 2, 283-301, 10.1016/j.jsg.2004.08.008.
- Boutelier, D., Oncken, O., Cruden, A. (2012): Fore-arc deformation at the transition between collision and subduction: insights from 3D thermo-mechanical laboratory experiments. - *Tectonics*, 31, TC2015, 10.1029/2011TC003060.
- Buckingham, E. (1914): On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. - *Physical Review*, 4, 4, 345-376, 10.1103/PhysRev.4.345.
- Hubbert, M. K. (1937): Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. - *Geological Society of America Bulletin*, 48, 10, 1459-1520.
- Leever, K. A., Gabrielsen, R. H., Faleide, J. I., Braathen, A. (2011): A transpressional origin for the West Spitsbergen fold-and-thrust belt: Insight from analog modeling. - *Tectonics*, 30, TC2014, 10.1029/2010TC002753.
- Lohrmann, J., Kukowski, N., Adam, J., Oncken, O. (2003): The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges. - *Journal of Structural Geology*, 25, 10, 1691-1711, 10.1016/S0191-8141(03)00005-1.
- Rosenau, M., Nerlich, R., Brune, S., Oncken, O. (2010): Experimental insights into the scaling and variability of local tsunamis triggered by giant subduction megathrust earthquakes. - *Journal of Geophysical Research*, 115, B09314, 10.1029/2009JB007100.
- Rosenau, M., Oncken, O. (2009): Fore-arc deformation controls frequency-size distribution of megathrust earthquakes in subduction zones. - *Journal of Geophysical Research*, 114, B10311, 10.1029/2009JB006359.

Manteldynamik, magmatische Prozesse und das Aufbrechen der Kontinente

Robert B. Trumbull, Jakob K. Keiding, Ilya Veksler, Rolf L. Romer
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The separation of Africa and South America about 130 million years ago was accompanied by huge volumes of magma derived from the mantle. Erosion has removed many of the surficial lavas but dolerite dyke swarms beneath them are preserved. These dykes are under study to determine the composition of magmas, the age of magmatism, and the direction of extensional stress in the crust. Here, we compare two dolerite dyke swarms from the southern African margin that are separated by about 2000 km. The northern area is the Etendeka Province of NW Namibia with the Henties Bay-Outjo dyke swarm (HOD). The southern area, at the tip of Africa, hosts the False Bay dyke swarm. The dolerites from these two areas differ in compositional diversity and magmatic temperatures, both being higher in the north. Three magma types are distinguished in the northern area and only one in the south. Temperatures calculated from olivine-melt equilibrium show a north-south decrease by about 150 °C. Converted to mantle potential temperature and compared with global averages, the data indicate “normal” upper mantle temperatures in southern region like in the mid-ocean ridge systems (1380 °C), and mantle temperatures in the northern area (1520 °C) similar to hotspot islands like Hawaii and Iceland. We conclude that breakup-related magmatism in the south was related to extension and passive decompression of an upper mantle with normal temperature and composition. The Tristan mantle plume greatly enhanced magma production in the Etendeka Province but was not the cause of continental breakup.



Die Dynamik des Erdmantels, das Aufbrechen von Superkontinenten wie Gondwana und die Entwicklung „neuer“ Kontinentalränder im Südatlantik stehen im Fokus des vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ gemeinsam mit Partnern koordinierten DFG-Schwerpunktprogramms „SAMPLE“ (South Atlantic Margin Processes and Links with onshore Evolution). Die multidisziplinären Teilprojekte liefern Beiträge zu den Themen Lithosphärenstruktur, Deformation, Magmatismus und Breakup-Prozesse, sowie zur Sedimentationsentwicklung, Reifung organischen Materials und thermogene Methan-Migration in marinen Sedimentbecken. Die letztgenannten Themen liefern Beiträge sowohl für die Exploration und Erschließung von Kohlenwasserstoffressourcen (KW) als auch für die Bilanzierung natürlicher Beiträge zum Treibhauseffekt.

Forschungsschwerpunkt Südatlantik: Stofftransport von der Kern-Mantel-Grenze zur Erdoberfläche

Zu den aktuellen, ungelösten Problemen der Geodynamik zählt die stoffliche und physikalische Beschaffenheit der tiefsten Schichten des Erdmantels. Die Untersuchung dieser Fragestellung ist wichtig, weil angenommen wird, dass sogenannte Mantelplumes im Grenzbereich zwischen Erdmantel und Erdkern entstehen. Ein Mantelplume ist ein örtlich begrenzter Bereich im Mantel, der aufsteigt, weil er wegen seiner thermischen und gegebenenfalls auch stofflichen Eigenschaften leichter ist als der umgebende Mantel. Ein aus dem tiefsten Mantel aufsteigender Mantelplume hat auf Grund der enormen Auftriebskraft und Wärmeenergie eine große Wirkung auf die Lithosphäre. Neben mechanischen Prozessen wie Hebung, Ausdünnung und Bruchbildung in der starren Lithosphäre, wird der obere Mantel auch partiell aufgeschmolzen. Es ent-

stehen magmatische Provinzen von gewaltigen Ausmaßen, die sogenannten „Large Igneous Provinces“, die globale Wirkungen auf Umwelt und Leben haben können (Sobolev et al., 2011; vgl. auch Beitrag von Sobolev und Steinberger in diesem Heft). Trifft ein Plume auf dünne, ozeanische Lithosphäre, entsteht ein ozeanisches Plateau, wie z. B. Ontong-Java, Kerguelen oder Hawaii. Unter kontinentaler Lithosphäre führt der Plume zur Bildung mächtiger Basaltdecken, sogenannten Flutbasalten. Das Aufbrechen des Superkontinents Gondwana und die Entstehung des Südatlantiks vor rund 130 Mio. Jahren sind für die Befürworter der „Plumetheorie“ eine Folge des Aufstiegs des Tristan-Plumes (benannt nach der Insel Tristan da Cunha). Andere Forscherinnen und Forscher beschränken die Rolle des Tristan-Plumes auf eine thermisch bedingte, erhöhte Schmelzbildung im oberen Mantel. Manche stellen die Existenz von Mantelplumes insgesamt in Frage und meinen, die Dehnung und das Aufbrechen der Lithosphäre sowie auch die erhöhte Schmelzbildung können durch Prozesse im oberen Mantel erklärt werden, wie in der klassischen Theorie der Plattentektonik beschrieben. Die Beantwortung dieser Frage ist nicht nur wichtig, um die Ursachen für die wechselnde Bewegung der Lithosphärenplatten zu klären, sondern hat auch eine fundamentale Bedeutung für die globalen Stoffkreisläufe von z. B. Kohlenstoff oder Wertmetallen wie Kupfer und Platin. Für den Stoffkreislauf ist die Tiefe, aus welcher das Plume-Material stammt, entscheidend bzw. auch ob der gesamte Mantel oder nur die oberen Mantelschichten am Materialaustausch teilnehmen.

Um diese Fragen zu lösen, beleuchten Geophysikerinnen und Geophysiker, Petrologinnen und Petrologen sowie Geodynamik-Modelliererinnen und -Modellierer unterschiedliche Aspekte der Entstehung des Südatlantiks. Die Geophysik bildet Strukturen in und unter der Lithosphäre ab und trifft Aussagen über die Mächtigkeit und die physikalischen Eigenschaften der Erdschichten (elastische Parameter, elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Dichte). Allerdings gelten diese Informationen nur für den heutigen Zustand. Dagegen können geologische und petrologisch-geochemische Untersuchungen an den alten Gesteinen der Region den Zusammenhang zwischen Tektonik und Magmenbildung in der Vergangenheit rekonstruieren. Geochemische und mineralogische Daten geben Auskunft über die Magmenquellen im Mantel sowie über wichtige physikalische Eigenschaften der Magmen selbst (Druck, Temperatur, Dichte, Viskosität). Die zeitliche Einordnung der Prozesse (z. B. Magmenbildung, Krustendehnung, Vulkanismus) wird durch radiometrische Datierungen von Gesteinsproben ermittelt.

Links: Die Tafelberge der Etendeka-Provinz in NW-Namibia bestehen aus zahlreichen Basaltdecken, die vor rund 130 Mio. Jahren während des Aufbrechens des Superkontinents Gondwana entstanden sind. (Foto: I. Veksler, GFZ)

Left: Table mountains in the Etendeka Province of NW Namibia are stacks of lava flows that formed about 130 million years ago during the breakup of the supercontinent Gondwana.

Mantelmagmatismus von der Skelettküste zum Kap der Guten Hoffnung

Eine SAMPLE-Projektgruppe unter GFZ-Leitung beschäftigt sich mit der Magmenbildung im Erdmantel und mit dem Mag-



Kontakt: R. Trumbull
(bobby@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Feldaufnahme eines Doleritgangs in der Namibwüste, NW-Namibia. Der schwarze Gang, eine mit Basalt gefüllte Spalte, zieht als langgestreckter Bergrücken durch die Steinwüste. Die Gangorientierung spiegelt die Extensionsrichtung an dieser Stelle vor 130 Mio. Jahren wieder. (Foto: I. Veksler, GFZ)

Fig. 1: Field photo of a dolerite dyke in the Namib desert, NW Namibia. The black dyke is a fracture filled with basalt, which resists erosion and forms a sharp linear ridge in the desert. The dyke orientation reflects the stress directions in this locality 130 million years ago.

menaufstieg durch die Lithosphäre. Der Fokus liegt auf dem afrikanischen Kontinentalrand des Südatlantiks. Dort treten basaltische Intrusivgänge auf, welche die Förderspalten für die inzwischen meist erodierten Flutbasaltdecken an der Oberfläche darstellen (Abb. 1). Solche Basalt- oder Doleritgänge sind besonders wertvolle Untersuchungsobjekte. Sie geben Auskunft über die Dehnungsrichtung (Spannungsfeld), über das Alter der Magmenintrusion (Spaltenfüllung) und über Stoffbestand, Herkunft und Bildungsbedingungen der Magmen.

Unser Projekt nutzt die Tatsache, dass Doleritgänge, welche mit der Öffnung des Südatlantiks in Verbindung stehen, entlang des gesamten rund 2000 km langen Verlaufs des Kontinentalrands auftreten, von Angola im Norden bis zum Kap der Guten Hoffnung im Süden. Vergleichsstudien werden an vier ausgewählten Segmenten entlang des Kontinentalrands durchgeführt (Abb. 2 und 3). In jedem der vier Gebiete werden geochemische Untersuchungen und Altersbestimmungen durchgeführt, sowie strukturelle Vermessungen im Gelände und mittels Fernerkundung, um so ein Gesamtbild der tektonischen und magmatischen Entwicklung zu erhalten. Die umfangreichen Feldarbeiten und Probenahmen werden gemeinsam mit den Universitäten von Kapstadt und Windhoek, sowie mit den geologischen Diensten Südafrikas und Namibias durchgeführt.

Magmenbildung am Kontinentalrand

In diesem Beitrag zeigen wir Forschungsergebnisse aus dem nördlichsten und südlichsten Untersuchungsgebiet. Sie sind

etwa 2000 km voneinander entfernt, weisen aber Doleritgänge gleichen Alters auf.

Norden: Die Etendeka-Provinz in NW-Namibia untersuchen wir als Stellvertreterin für magmatische Tätigkeit unter dem Einfluss eines Mantelplumes. Hier trifft der Walvis-Rücken auf den Kontinentalrand und man findet Reste der einst weitläufigen und mächtigen Flutbasaltdecken sowie etwa 20 Intrusivkomplexe mit bis zu 40 km Durchmesser. Zudem treten Tausende von Doleritgängen auf, die als „Henties Bay-Outjo Dykeswarm“ (HOD) bezeichnet werden. Das Alter der Doleritgänge liegt zwischen 128 und 135 Mio. Jahren (Erlank et al., 1984; Renne et al., 1996).

Süden: Die Kapprovinz Südafrikas zeigt nur wenige Hinweise auf Magmatismus während der Ozeanöffnung. Reste von Flutbasalten sind nicht bekannt und es gibt nur einen einzigen Intrusivkomplex. Doleritgänge sind nicht selten, obgleich weit weniger zahlreich als im Norden. Stellvertretend für das Gebiet im Süden wird der „False Bay Dykeswarm“ bei Kapstadt untersucht. Das Alter der False-Bay-Dolerite liegt im Bereich von 126 bis 138 Mio. Jahren (Reid et al., 1991).

Im Folgenden werden zwei Aspekte vertieft: einerseits die Magmendiversität und andererseits die Temperaturverteilung im Erdmantel. In beiden Aspekten stellen wir starke Kontraste zwischen den Untersuchungsgebieten im Norden und Süden fest, die für das Gesamtbild der Magmenbildung am Kontinentalrand und für die Rolle des Mantelplumes von großer Bedeutung sind.

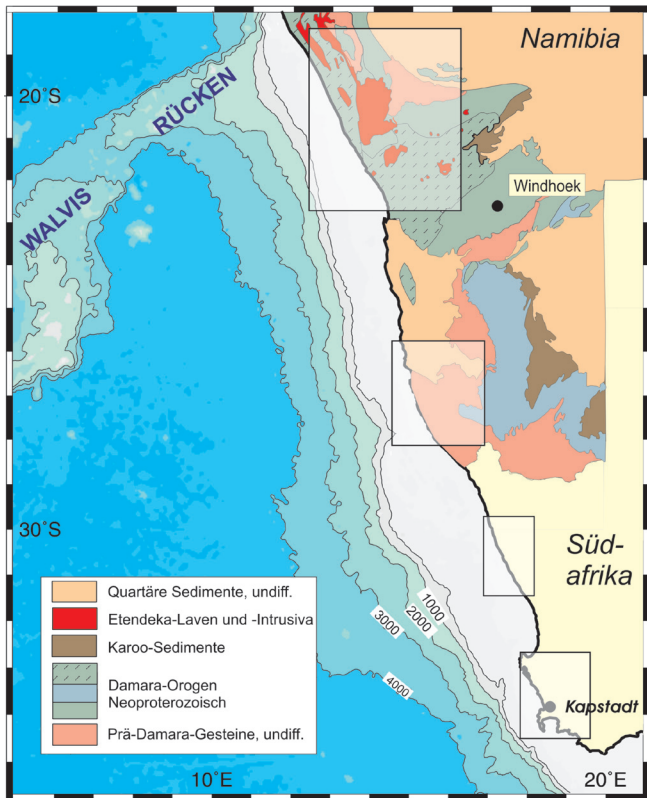


Abb. 2. Karte des südwestlichen Kontinentalrands von Afrika mit der Position der vier Untersuchungsgebiete (Rechtecke). Der Walvis-Rücken ist in der Bathymetrie des Südatlantiks (blaue Farben) deutlich zu sehen.

Fig. 2. This map of the southwestern continental margin of Africa shows the location of the four study areas (boxes). The prominent bathymetric feature of the South Atlantic is the Walvis Ridge.

Abb. 3: Ein Kontrollposten an der Grenze zum Diamantsperrgebiet südlich von Lüderitz, Namibia, in einem der Untersuchungsgebiete (Foto: R. Trumbull, GFZ)

Fig. 3: An entrance gate to the Diamond Restricted Area south of Lüderitz, Namibia, in one of the four study areas.



Magmendiversität

Die False-Bay-Dolerite im Süden zeigen nur wenig Magmendiversität. Sie haben ähnliche geochemische „Signaturen“ in Bezug auf Spurenelemente und radiogene Isotopenverhältnisse. Die Dolerite stammen daher wahrscheinlich aus einem einzigen Magmentyp. Die geringe Variation innerhalb der Gruppe ist durch Prozesse des Magmenaufstiegs in der Kruste (Kristallisation, Assimilation) entstanden. Im Norden hingegen ist nicht nur die Anzahl der Doleritgänge größer als im Süden, auch ihre chemische Zusammensetzung variiert viel stärker. Im Norden der HOD sind mindestens drei eigenständige Magmentypen vertreten. Diese weisen charakteristische Signaturen auf, vor allem in der Spurenelementverteilung und in den radiogenen Isotopenverhältnissen (Abb. 4), die auf unterschiedliche Magmenquellen deuten (Trumbull et al., 2007). Der weitaus häufigste der drei Magmentypen, der „Tafelberg“-Typ, bildet auch den Hauptanteil der Flutbasalte in der Etendeka-Provinz. Daher gelten die vielen Doleritgänge vom Tafelberg-Typ als Förderkanäle für die Basaltdecken. Die zwei anderen Magmentypen in dem HOD, „Alkalin“-Typ und „Horingbaai“-Typ, sind weitaus seltener, aber für das Gesamtbild wichtiger, denn sie enthalten Hinweise auf Materialeinträge aus dem unteren Mantel. Die radiogenen Nd- und Sr-Isotopenverhältnisse deuten auf nur geringen Krusteneinfluss und auf eine ähnliche Quelle wie die Alkalibasalte von Tristan da Cunha (Abb. 4) hin. Auch weisen manche Dolerite dieser beiden Typen hohe Gehalte an Elementen wie Mg, Cr und Ni auf, die auf hohe Temperaturen in der Mantelquelle hindeuten. Auf eine Abschätzung der Schmelztemperaturen wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Temperaturverteilung im Mantel

Die Basis für eine Berechnung der Schmelzbedingungen in magmatischen Gesteinen sind temperatur- und druckabhängige Phasengleichgewichte, in diesem Fall zwischen Mineralphasen wie Olivin, Pyroxen oder Plagioklas und der basaltischen Schmelze, aus der sie kristallisieren (Abb. 5). Die thermodynamischen Basisdaten sind gut bekannt, so dass man aus chemischen Analysen der Dolerite und deren Kristalle die Kristallisationstemperatur mit einer Genauigkeit von etwa 50 °C ableiten kann (Putirka, 2008). Bedingt durch die Kristallisationsabfolge markieren Gleichgewichtszustände zwischen Olivin und Schmelze die höchsten Temperaturen und sind für eine Abschätzung der primären Schmelzbedingungen am besten geeignet. Die aus dieser Methode abgeleiteten Temperaturen zeigen ein markantes Nord-Süd-Gefälle von etwa 150 °C. Für eine Interpretation der Temperaturunterschiede in Bezug auf den Erdmantel ist eine Umberechnung in die Potentialtemperatur hilfreich. Die Mantel-Potentialtemperatur (TP) ist eine vom Aufschmelzungsgrad und Druck unabhängige Größe und somit für überregionale Vergleiche besser geeignet. Als Referenz gilt die Mantel-Potentialtemperatur für das globale mittelozeanische Spreizungssystem (MORB), mit rund 1300 ± 50 °C. Dieser Wert gilt als „normal“ für den oberen Mantel weltweit. Weitaus höhere TP-Werte wurden für die Hotspot-Inseln wie Hawaii oder Island ermittelt (1450 bis 1600 °C).

In Potentialtemperatur umgerechnet liegen die Maximalwerte im Süden der False-Bay-Dolerite mit 1380 °C nur leicht über den Bereich des „normalen“ Mantels. Dagegen zeigen TP-Werte bis 1520 °C für den Norden (HOD) deutlich erhöhte Manteltemperaturen an (Keiding et al., 2011).

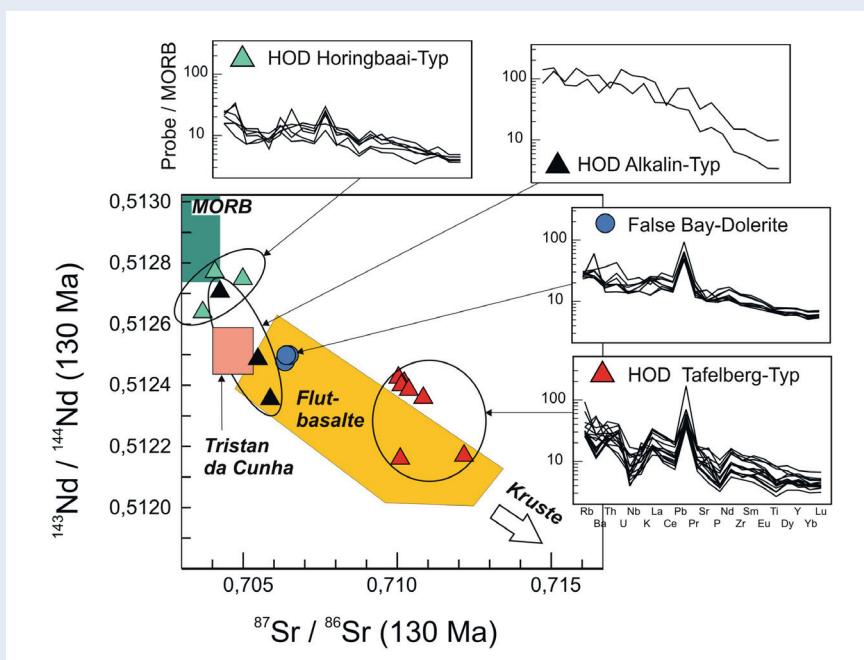


Abb. 4. Der Mittelteil dieser Grafik zeigt die Nd- und Sr-Isotopenverhältnisse der Doleritgänge in den Untersuchungsgebieten; die vier kleineren Felder zeigen die Spurenelementmuster (Elementgehalt normiert durch die Zusammensetzung von MORB=Mid Ocean Ridge Basalt). Die unterschiedlichen Elementmuster und Isotopenverhältnisse sind Merkmale der drei unterschiedlichen Magmentypen im Norden (HOD) und der False Bay-Dolerite im Süden.

Fig. 4. The central plot shows the Nd- and Sr isotope composition of dolerite dykes in the study areas, and the four plots grouped around show the distinctive trace element patterns (sample composition relative to MORB). The trace element patterns and isotope ratios are characteristic features of the three magma types in the northern area (HOD) and the False-Bay dolerites in the southern area.

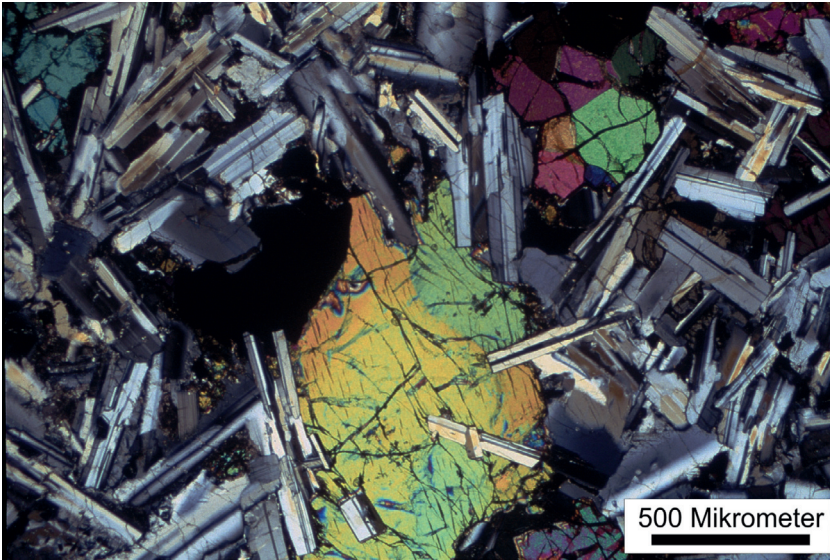


Abb. 5: Kleine Objekte mit großem Informationsgehalt: Gesteinsdünnschliffe, wie dieser von einem Doleritgang in Namibia, sind die Grundlage für Bestimmungen der magmatischen Temperatur- und Druckbedingungen. Die farbigen Kristalle sind Klinopyroxene und Olivine, die graugestreiften Kristalle sind Plagioklase. (Foto: R. Trumbull, GFZ)

Fig. 5: Small objects hold big secrets: Thin sections like this one of a dolerite dyke from Namibia are the basis for determining magmatic temperature and pressure. The coloured crystals are clinopyroxene and olivine, the grey striped crystals are plagioclase.

Ausblick

Die hier gezeigten Untersuchungsergebnisse tragen wesentlich zur Beantwortung der Frage nach der Bedeutung eines Mantelplumes für die Öffnung des Südatlantiks bei. Wir konnten einen deutlichen thermischen und stofflichen Einfluss eines Mantelplumes im Norden des Gebiets zeigen, aber genauso deutlich ist das Fehlen dieses Einflusses im Süden. Alles deutet darauf hin, dass der Kontinentaufbruch im Süden ohne Einfluss eines Mantelplumes erfolgte und dass die magmatische Tätigkeit dort als Folge der Dehnung der Lithosphäre und Druckentlastung des oberen Mantels entstand. Die petrologische Untersuchung von Doleritgängen hat sich als erfolgreiches Mittel für eine Kartierung der Temperaturverteilung vor 130 Mio. Jahren im Erdmantel erwiesen. Gerade die Verteilung von Wärme und Masse aus dem Erdmantel während des Aufbrechens ist für den integrierten Forschungsansatz im Südatlantik von allgemeiner Bedeutung. So hat die Verteilung starker magmatischer Tätigkeit entlang des Kontinentalrands beispielsweise entscheidende Konsequenzen für die Subsidenz- und Temperaturentwicklung der Sedimentbecken und somit auch für deren Kohlenwasserstoffpotential. Informationen über die Verteilung magmatischer Aktivität am Kontinentalrand können daher in besonderer Weise bei der Planung von Kohlenwasserstoff-Explorationsvorhaben helfen.

Das GFZ wird gemeinsam mit seinen Forschungspartnern im Schwerpunktprogramm weiteren Fragen nachgehen: Zum einen soll die Höhe des Gesamteintrags von S, Cl, F und CO₂ in die Atmosphäre durch die magmatische Tätigkeit im Südatlantik untersucht werden, um die globale Wirkung dieses Ereignisses zu verstehen. Weiterhin ist geplant, eine Datenbasis zur Ermittlung des Rohstoffpotentials dieser magmatischen Provinz zu erarbeiten. Ähnliche Flutbasaltprovinzen in Sibirien und SO-China enthalten bedeutende Ressourcen an Cr, Ni, Cu und Platinmetallen, das könnte auch auf den Südatlantik zutreffen.

Mehr Informationen zum Projekt SAMPLE unter:

www.sample-spp.de

Literatur

- Erlank, A. J., Marsh, J. S., Duncan, A. R., Miller, R. M., Hawkesworth, C. J., Betton, P. J., Rex, D. C. (1984): Geochemistry and petrogenesis of the Etendeka volcanic rocks from SWA/ Namibia. – In: Erlank, A. J. (Eds.), Petrogenesis of the volcanic rocks of the Karoo province : national geodynamics programme, (Special publication / Geological Society of South Africa ; 13), 195-245.
- Keiding, J. K., Trumbull, R. B., Veksler, I. V., Jerram, D. A. (2011): On the significance of ultra-magnesian olivines in basaltic rocks. - *Geology*, 39, 12, 1095-1098, 10.1130/G32214.1.
- Putirka, K. D. (2008): Thermometers and barometers for volcanic systems. - In: Putirka, K. D., Tepley, F. J. (Eds.), Minerals, Inclusions and Volcanic Processes, (Reviews in mineralogy and geochemistry ; 69), Mineralogical Society of America, 61-120.
- Reid, D. L., Erlank, A. J., Rex, D. C. (1991): Age and correlation of the False Bay dolerite dyke swarm, south-western Cape, Cape Province. - *South African Journal of Geology*, 94, 2-3, 155-158.
- Renne, P. R., Glen, J. M., Milner, S. C., Duncan, A. R. (1996): Age of Etendeka flood volcanism and associated intrusions in southwestern Africa. - *Geology*, 24, 7, 659-662, 10.1130/0091-7613(1996)024<0659:AOEFVA>2.3.CO;2.
- Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutsкая, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., Vasiliev, Y. R. (2011): Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. - *Nature*, 477, 7364, 312-316, 10.1038/nature10385.
- Trumbull, R. B., Reid, D. L., De Beer, C. H., Romer, R. L. (2007): Magmatism and continental breakup at the west margin of southern Africa: A geochemical comparison of dolerite dikes from NW Namibia and the Western Cape. - *South African Journal of Geology*, 110, 2-3, 477-502, 10.2113/gssaig.110.2-3.477

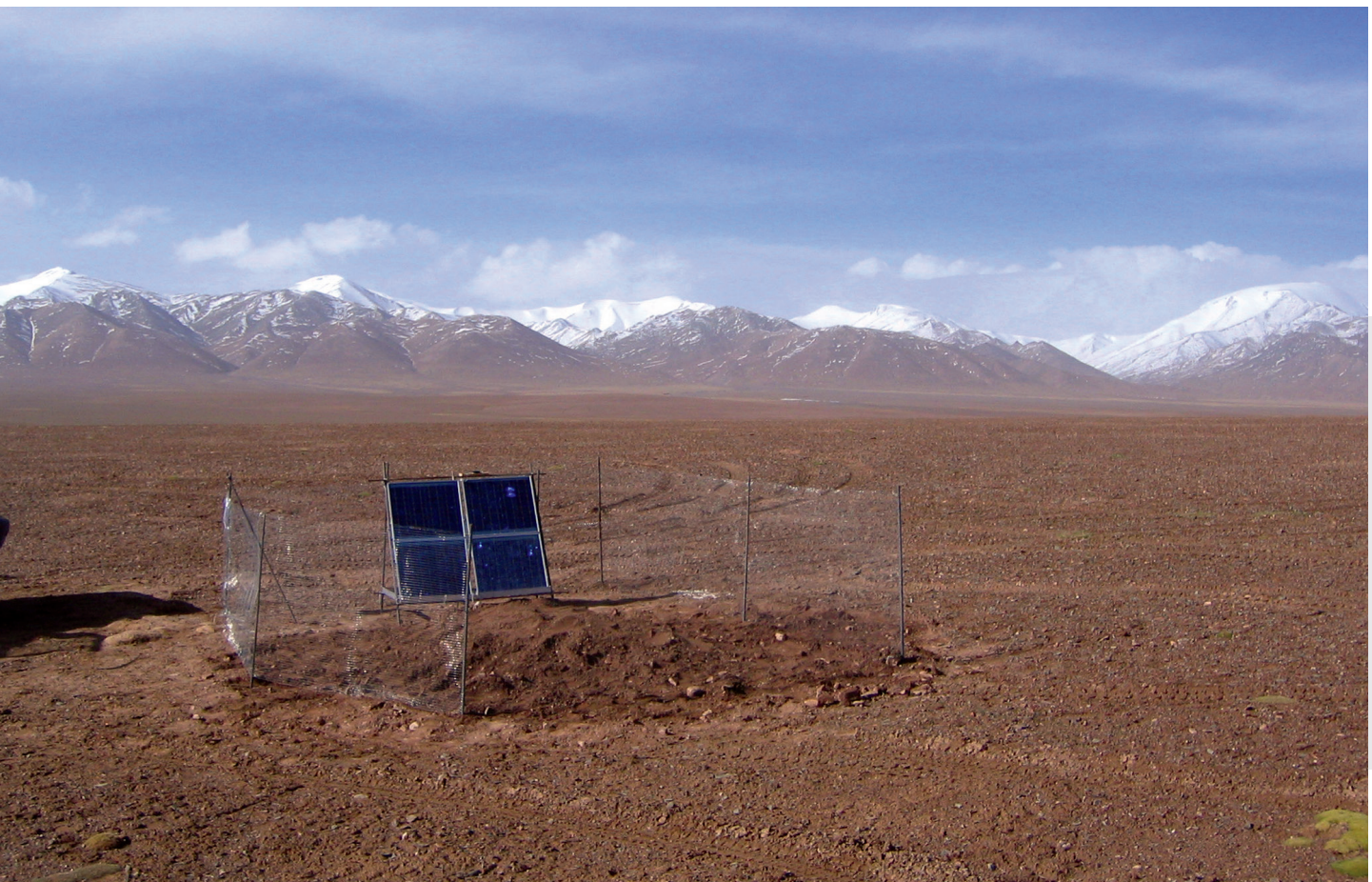
Tibet – die größte Kollision auf der Erde

Rainer Kind¹, Frederik Tilmann¹, James Mechie¹, Shantanu Pandey¹, Prakash Kumar²

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² GFZ, jetzt: National Geophysical Research Institute, Hyderabad, Indien

As Alfred Wegener already recognized 100 years ago, the giant southern continent, Gondwanaland, broke about 200 million years ago into several pieces which drifted apart. One part, India, drifted northward until it collided 50 million years ago with Eurasia. This collision created the Himalayan mountain chain and the Tibetan plateau, which are not only very significant geological structures, but are also important parts of the Earth System. The influence of Tibet on the atmospheric circulation and world climate and the ongoing threat of giant collisional earthquakes to the megacities in the Ganges plain must be emphasized. In international cooperation, the GFZ conducted a number of seismic experiments in Tibet, known as INDEPTH experiments, to study details of the deformation of the tectonic plates as a consequence of the collision. As a result the presence of the Indian lithosphere was for the first time seismologically demonstrated to exist several hundred kilometers northwards below Tibet. During the collision the Indian crust was peeled off and contributes to the thickening of the Tibetan crust. The latest phase of the INDEPTH experiments was focused on the northern margin. Using active and passive seismic techniques (wide-angle profiling, receiver functions, surface wave tomography), we have imaged the deep structure below Tibet, showing the configuration of the Tibetan lithosphere between the Indian and Eurasian plates. We also found evidence for unusual properties of the lower crust, which are likely to be responsible for the prevalence of crustal flow in northern Tibet.



Wie Alfred Wegener schon vor 100 Jahren erkannte, zerbrach der große Südkontinent Gondwanaland vor rund 200 Millionen Jahren in mehrere Teile, die nachfolgend auseinander drifteten. Ein Teil, Indien, bewegte sich mit einer für geologische Verhältnisse sehr hohen Geschwindigkeit von etwa 20 m pro Jahrhundert über tausende von Kilometern nach Norden. Indien war damals hunderte von Kilometern größer als heute. Vor etwa 50 Mio. Jahren stieß Indien mit dem eurasischen Kontinent zusammen und schob sich, wie wir heute wissen, mehrere hundert Kilometer unter Eurasien.

Durch diesen Zusammenstoß entstanden die Gebirgskette des Himalayas, die die höchsten Berge dieser Erde beherbergt, und das Hochplateau von Tibet, das mit 2 Mio. km² ausgedehnteste und mit 5000 m durchschnittlicher Höhe höchste Hochplateau. Diese kontinentale Kollision hat nicht nur große geologische Bedeutung, sondern beeinflusst das Gesamtsystem Erde. So wird vermutet, dass die enorme topographische Barriere, die mit dem Himalaya entstanden ist, den indischen Monsun erheblich verstärkt hat – mit weltweit spürbaren klimatischen Auswirkungen. Die erhöhte Topographie in Verbindung mit dem Monsun sorgte für einen dramatischen Anstieg der Erosionsraten und damit ein erhöhtes Sedimentaufkommen, aus dem letztendlich die Gangesebene entstand. Heute finden sich Millionenstädte in der Gangesebene, die von sehr starken durch die Kollisionszone verursachten Erdbeben unter dem Himalaya bedroht werden.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ hat in internationaler Kooperation eine Reihe seismischer Experimente in Tibet durchgeführt, um die Details der Deformation der tektonischen Platten bei der Kollision zu untersuchen. Drei verschiedene

seismische Methoden, die zur Untersuchung der Struktur der Lithosphäre unter Tibet benutzt wurden, werden hier vorgestellt: die Weitwinkel-Reflexions- bzw. Refraktionsseismik, die Oberflächenwellentomographie und die S-Receiver-Funktions-Methode. Bei der Weitwinkelseismik werden mit Hilfe von Sprengungen seismische Wellen erzeugt, die in das Erdinnere eindringen und von unterschiedlichen Gesteinsschichten, vorwiegend in der Erdkruste, wieder an die Erdoberfläche reflektiert bzw. refraktiert werden. Dort werden sie von mobilen seismischen Stationen digital registriert. Die Oberflächenwellentomographie benutzt in unserem Fall seismische Registrierungen von permanenten und temporären Erdbebenstationen im gesamten asiatischen Raum. Diese Methode liefert aus der Analyse von Dispersionsdaten Modelle von relativ sanften zweidimensionalen Geschwindigkeitsänderungen bis zu rund 400 km Tiefe. Die Receiver-Funktions-Methode benutzt Daten seismischer Registrierungen weit entfernter Beben auf in Tibet temporär aufgestellten Stationen (siehe Foto links). Seismische Wellen solcher Beben erzeugen unterhalb einer Station an relativ scharfen seismischen Diskontinuitäten konvertierte Wellen (von P- zu S-Wellen oder umgekehrt), die an der Erdoberfläche registriert werden. Diese Methode ermöglicht eine Abbildung von Schichtgrenzen im Erdinneren bis zu etwa 700 km Tiefe. Die Lithosphäre besteht aus der Kruste und dem obersten Teil des Erdmantels und kann Scherspannungen über lange Zeiträume hinweg aushalten, ohne sich plastisch (permanent) zu verformen. Die Lithosphäre verhält sich damit mechanisch kohärent und entspricht den „Platten“ in der Theorie der Plattentektonik. Die Lithosphäre verschiedener Regionen unterscheidet sich in ihrer Mächtigkeit, Dichte und Festigkeit gegenüber elastischen Verformungen, d.h. Faktoren, welche die Prozesse bei der Kollision kontinentaler Platten bestimmen. Die Abbildung von Konfiguration und Mächtigkeit der Lithosphäre ist daher für das Verständnis der Manteltektonik von fundamentaler Bedeutung. Typische kontinentale Lithosphärenmächtigkeiten liegen zwischen 100 und 200 km.

Die Geschwindigkeit seismischer Wellen im Mantelgestein wird neben dem Druck (d. h. Tiefe) in erster Linie von der Temperatur bestimmt, wobei höhere Temperaturen eine Verringerung der Geschwindigkeit verursachen. Die Temperaturabhängigkeit ist bei S-Wellen stärker ausgeprägt als bei P-Wellen (etwa 2% S-Geschwindigkeitsunterschied pro 100°C Temperaturunterschied, demgegenüber 1% bei P). Wenn sich die Temperatur dem Solidus annähert, d. h. der Temperatur, bei dem die ersten Bestandteile des Gesteins zu schmelzen beginnen, verringert sich die S-Geschwindigkeit noch sehr viel stärker. Eine direkte Folge der mechanischen Kohärenz der Lithosphäre ist, dass der Wärmetransport durch Wärmeleitung erfolgt. Für die Lithosphäre außerhalb von Kollisionszonen bedeutet dies einen fast linearen Anstieg der Temperatur von 0°C an der Oberfläche bis zu 1300°C beim Übergang in die Asthenosphäre (konduktiver Gradient). In der Asthenosphäre und im tieferen

Links: Erdbebenstation auf dem tibetanischen Hochplateau mit Blick auf die Kunlun-Berge (Blickrichtung nach Norden), die Grenze zwischen dem Tibet-Plateau und dem Qaidam-Becken. Der seismische Sensor und das zugehörige Datenaufzeichnungsgerät sind eingegraben, um eine stabile Betriebstemperatur zu halten, und zudem Diebstahl oder Vandalismus zu erschweren. (Foto: F. Tilmann, GFZ)

Left: Earthquake station on the Tibetan high plateau with a view of the Kunlun Shan (viewing direction to the north), the mountain range marking the border between the Tibetan plateau and the Qaidam basin. The seismic sensor and data logger are buried to ensure security and temperature stability.



Kontakt: F. Tilmann
(tilmann@gfz-potsdam.de)

Mantel ist das Mantelgestein durch die hohen Temperaturen relativ weich, so dass Konvektion möglich ist. Dieses bedeutet, dass die Asthenosphäre immer wieder umgewälzt wird, wodurch die Wärme mehr oder weniger gleichmäßig verteilt wird und damit nur eine geringe Abhängigkeit der Temperatur von der Tiefe herrscht. Die geringe Abhängigkeit rührt von der Wechselwirkung von Druck und Temperatur her, die auch ohne Wärmeaustausch besteht (adiabatischer Gradient). In der Übergangszone von der Lithosphäre zur Asthenosphäre (Lithosphere-Asthenosphere Boundary: LAB) treffen der konduktive und adiabatische Gradient aufeinander. Die Temperatur nähert sich dort dem Solidus so nah wie in keiner anderen Tiefe. Für die seismischen Geschwindigkeiten bedeutet dies, dass sich eine Niedriggeschwindigkeitszone ausbildet, d.h. ein Tiefenbereich, innerhalb dessen die Geschwindigkeit mit der Tiefe abnimmt, während die Geschwindigkeit ansonsten mit der Tiefe zunimmt. Deshalb ist es eines der Hauptziele der seismologischen Beobachtungen, eine Zone reduzierter Geschwindigkeit zu entdecken, die als Untergrenze der Lithosphäre interpretiert werden kann.

Im Rahmen der INDEPTH-Projekte führt das GFZ seit fast zwanzig Jahren in internationaler Kooperation mit chinesischen, amerikanischen, britischen und kanadischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern eine Reihe von aktiven (Erzeugung

der seismischen Wellen mit Hilfe von Explosionen) und passiven (Registrierung von Erdbeben) seismischen Experimenten in Tibet durch. Ziel dieser Experimente ist es, detailliert die Struktur der tibetanischen Erdkruste sowie die Mächtigkeit der Lithosphärenplatten zu untersuchen. In Phasen I bis III der INDEPTH-Experimente, die sich auf den Süden und das Zentrum Tibets konzentrierten, konnte die Existenz der Indischen Platte mehrere hundert Kilometer in nördlicher Richtung unter Tibet nachgewiesen werden. Die Kruste der Indischen Platte wurde dabei von der Mantellithosphäre abgeschält und trug zu der Verdickung der tibetanischen Kruste bei. Zonen niedriger Geschwindigkeit in der Kruste deuten auf ein langsames Fließen der Mittelkruste hin, was das Vorkommen von stark metamorphen Gesteinen aus der mittleren und unteren Kruste im Himalaya erklärt.

In der Phase IV der INDEPTH-Experimente mit Feldarbeiten von 2007 bis 2009 stehen die Datenanalyse und Interpretation kurz vor dem Abschluss. Diese Studien konzentrieren sich auf den nördlichen Rand von Tibet. Hier geht der nördlichste Teil des Hochplateaus in das Kunlun-Gebirge über, an dessen Nordrand die Topographie dramatisch in das Qaidam-Becken abfällt, eine Geröllwüste in 2500 m Höhe. Das Qaidam-Becken stellt eine fast perfekte Ebene dar, da dort die an der Oberfläche sichtbaren Spuren geologischer Prozesse von Sedimenten

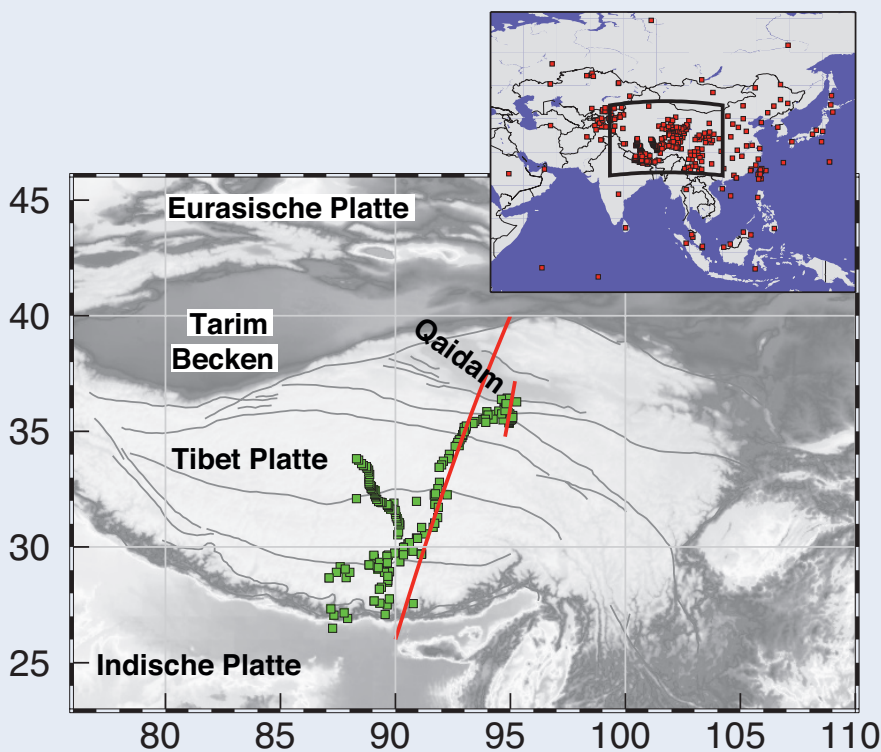


Abb. 1: Übersichtskarte des Messgebiets. Die grünen Symbole markieren die Lage der mobilen seismischen Stationen zur Registrierung von Erdbeben, die für die Receiver-Funktions-Analyse der Mantellithosphäre benutzt wurden. Die kurze rote Linie markiert das aktive seismische Profil (Abb. 2) und die lange rote Linie markiert den Schnitt durch das Oberflächenwellenmodell (Abb. 3). Rechts oben: Übersichtskarte von Asien. Rote Quadrate markieren die seismischen Stationen, die zur Erstellung des S-Wellengeschwindigkeitsmodells (Abb. 3) mit Oberflächenwellen-Tomographie herangezogen wurden.

Fig. 1: Map of the observational area. Green symbols mark the locations of mobile earthquake recording stations which are used for the receiver function analysis of the mantle lithosphere. The short red line marks the location of the controlled source seismic study of the north Tibetan crust and the long red line marks the location of the S-velocity cross-section shown in Fig. 3. Inset: Map of Asia showing the larger context of the study area. Red squares indicate station locations for surface wave tomographic studies.

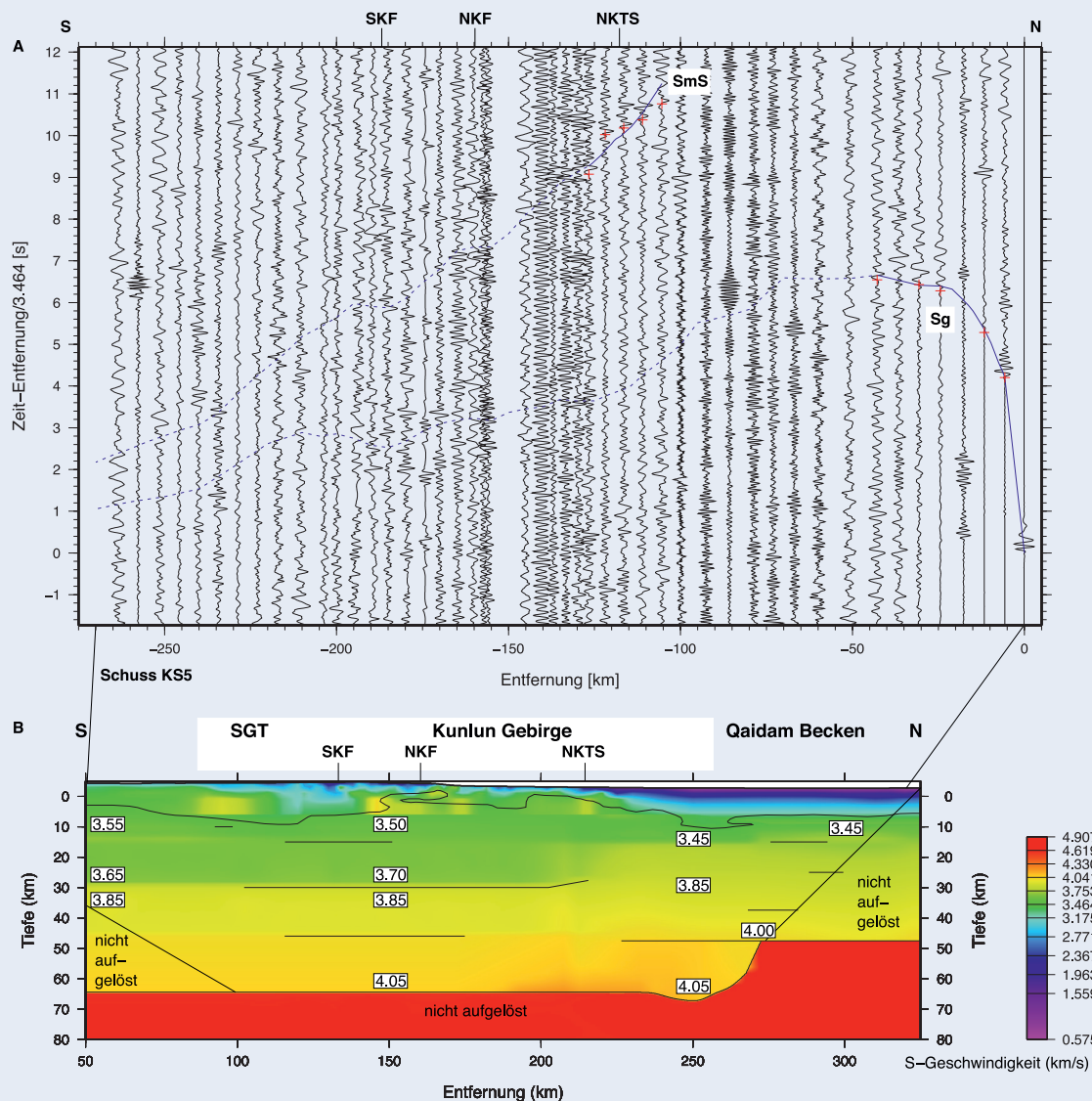


Abb. 2: a) Seismische Daten vom Schuss KS5 beobachtet entlang des INDEPTH IV- Refraktionssprofils. Die Seismogramm-Montage zeigt die transversale Komponente der S-Wellenbewegung. Die Amplituden sind auf das Maximum jeder Spur normiert und der verwendete Bandpassfilter reicht von 2 bis 10 Hz. Blaue Linien markieren die berechneten Laufzeiten aus dem Modell in b), und rote Kreuze markieren die beobachteten Laufzeiten. Jenseits der Regionen mit beobachteten Laufzeiten sind die theoretischen Laufzeiten als gestrichelte Linien dargestellt. b) S-Geschwindigkeitsmodell entlang des INDEPTH IV-Refraktionssprofils. Die schwarze Konturlinie markiert die von Karplus et al. (2011) definierte Höhenlinie für die P-Geschwindigkeit von 5,9 km/s. Diese Grenze markiert die Unterkante von Sedimentgesteinen. Zahlen im Modell repräsentieren Geschwindigkeiten in km/s. Schlüssel: Sg – S-Wellen-Refraktion durch die obere Kruste, SmS – S-Wellen-Reflexion an der Moho, SKF – Südl. Kunlun-Verwerfung, NKF – Nördl. Kunlun-Verwerfung, NKTS – Nördl. Kunlun-Überschiebungssystem, SGT – Songpan Ganzi Terrane (nördlichster Teil Tibets)

Fig. 2: a) Seismic data from shot KS5 recorded along the INDEPTH IV controlled source profile. The record section shows the transverse component of S-wave motion. Each trace is normalized individually and band pass filtered from 2-10 Hz. Blue lines represent phases calculated from the model in b), while red crosses represent observed travel times. Beyond the regions where observed travel times exist, the theoretical phases are shown as dashed lines. b) S-velocity model along the INDEPTH IV controlled source profile. Contour line at depths 0-10 km represents the 5.9 km/s P-velocity contour as defined by Karplus et al. (2011). This boundary represents the base of the Songpan Ganzi flysch south of the NKTS and the base of the Mesozoic and/or Paleozoic sediments north of the NKTS. Velocities are in km/s. Key: Sg – S-wave refraction through the upper crust, SmS – S-wave reflection from the Moho, SKF – South Kunlun Fault, NKF – North Kunlun Fault, NKTS – North Kunlun Thrust System, SGT – Songpan Ganzi Terrane

überdeckt sind und das Becken somit seine Geheimnisse nur durch geophysikalische Erkundung preisgeben wird. Aber auch im Kunlun-Gebirge, das wie ganz Tibet von großen Verwerfungen durchzogen wird, ist die Beobachtung der gesamten Lithosphäre notwendig, um die vergangenen und gegenwärtigen Prozesse, die mit der Kollision einhergehen, zu verstehen.

Für die passiven seismologischen Experimente wurden die seismischen Stationen jeweils für einen Zeitraum von etwa zwei Jahren aufgestellt. Diese Stationen registrieren vollautomatisch. Die benötigte Energie wird mit Hilfe von Solarzellen gewonnen (siehe Titelfoto). In Abb. 1 ist die Lage der seismischen Stationen aus allen Phasen der INDEPTH-Projekte und einiger komplementärer Experimente dargestellt.

In Abb. 2 werden die Daten und Ergebnisse von aktiven seismischen Experimenten gezeigt. Die seismischen Daten eines großen 2000 kg-Schusses, einer Explosion im Untergrund, am Nordende des Refraktionsprofils (siehe Abb. 1) sind in Abb. 2a dargestellt. Hier ist hauptsächlich das Scher(S)-Wellenfeld zu sehen. Zwei S-Wellenphasen sind zu erkennen: die Sg Phase, welche die refraktierte S-Welle durch die obere Kruste ist und die SmS Phase, welche die reflektierte S-Welle an der Moho (Mohorovičić-Diskontinuität, die Grenzfläche zwischen Erdkruste und Erdmantel) ist. Anhand der Modellierung von allen 14 616 gemessenen Einsätzen der beiden Phasen, welche von den 107 Schüssen entlang des Profils registriert wurden, ist das Modell in Abb. 2b abgeleitet worden (Mechie et al. 2012). Das Modell zeigt S-Geschwindigkeiten bis zu 3,7 km/s in der 28 bis 35 km mächtigen oberen Kruste und S-Geschwindigkeiten von 3,85 bis 4,05 km/s in der 22 bis 35 km mächtigen unteren Kruste. Zusammen mit dem Kompressionswellen(P)-Modell (Karplus et al., 2011) kann man das Poissonverhältnis (σ) für die gesamte Kruste und auch bestimmte Tiefenbereiche der Kruste bestimmen. Das Poissonverhältnis wiederum erlaubt Rückschlüsse auf die Gesteinstypen im Untergrund und auf deren mechanische Eigenschaften.

So ergibt sich für den Norden Tibets und das Qaidam-Becken ein σ von 0,24 bis 0,25 für die Unterkruste. Dieses ist ein Wert, der erheblich unter dem typischen Wert für die kontinentale Kruste mit $\sigma \sim 0,27$ und auch unter dem Wert für das Tarim-Becken mit $\sigma \sim 0,26$ liegt. Der niedrige Wert in Tibet deutet auf eine felsische Unterkruste hin, die wahrscheinlich aus Granulit besteht, einem Gestein, das durch Entwässerung und Metamorphose aus granitoidem Gestein hervorgeht. Verglichen mit einer typischen kontinentalen Unterkruste verformen sich Granulite unter starkem Druck plastisch. Diese Besonderheit der Kruste in Qaidam und Nordtibet begünstigt die Verformung der Kruste unter horizontaler Kompression. Die dadurch resultierende sich vergrößernde Krustenmächtigkeit zeigt sich in erhöhter Topographie und damit einer nordostwärts gerichteten Ausbreitung des Hochplateaus, während das Tarim-Becken nahezu unverformt bleibt. Südlich des Qaidam-Beckens hat die

Kruste im nördlichsten Teil des Hochplateaus und des Kunlun-Gebirges ein noch niedrigeres durchschnittliches σ von 0,23 bis 0,24 und ist daher vermutlich noch schwächer und einfacher zu deformieren als die Kruste unter dem Qaidam-Becken. Somit wird die Hypothese unterstützt, dass krustales Material, das sich ursprünglich unter dem Hochplateau befand, nordwärts wie ein dickflüssiger Brei unter die Kruste des Qaidam-Beckens fließt (Karplus et al., 2011).

Die Ergebnisse der Tomographie sind in Abb. 3 in einem Profilschnitt durch Tibet dargestellt. Der Schnitt wurde durch ein am GFZ bestimmtes Modell gelegt, das den oberen Mantel in China und den umliegenden Regionen darstellt. Dieses Modell basiert auf der Analyse von über 50 000 Seismogrammen, die an den permanenten und temporären Stationen in China und umliegenden Ländern aufgezeichnet wurden (Abb. 1). Das Oberflächenwellenmodell zeigt die Lithosphäre der Indischen Platte, die sich unter Tibet geschoben hat, als schnellen Körper, der bis in 230 km Tiefe reicht. Diese hohe Mächtigkeit wird aufgrund der Verdoppelung der Krustenmächtigkeit gegenüber normaler kontinentaler Kruste erreicht und eventuell auch aufgrund der internen Stauchung der indischen Lithosphäre. Demgegenüber ist die Qaidam-Lithosphäre erheblich dünner. Die Lithosphären-Asthenosphären-Grenze (LAB), wie sie von S-Receiver-Funktionen gesehen wird (Abb. 4a), entspricht ungefähr den Ergebnissen der Oberflächenwellenanalyse, insbesondere südlich von 31°N, aber es gibt Unterschiede im Detail: z. B. erscheint die Lithosphäre unter Tibet im Oberflächenwellenmodell als ein zusammenhängender Körper, vermutlich aufgrund der begrenzten horizontalen Auflösung, während sich in den S-Receiver-Funktionen eine Diskontinuität bei 31°S, ungefähr unterhalb der Bangong-Nujiang-Sutur andeutet. Allerdings lassen sich auch im Oberflächenwellenmodell an diesem Breitengrad Veränderungen beobachten. Die Geschwindigkeiten direkt unterhalb der Moho (schwarze Kreuze in Abb. 3) sind nämlich erheblich geringer als im Süden. Die vermutlich höheren Temperaturen schwächen die Lithosphäre, deren Verformung sich in Scherwellenanisotropie niederschlägt (Leon-Soto et al., 2012). Die hohen Temperaturen in der Umgebung der Moho befördern möglicherweise auch ein Fließen der Unterkruste wie oben beschrieben.

Die Ergebnisse der Receiver-Funktions-Analyse sind in Abb. 4 dargestellt. Die S-Receiver-Funktions-Methode wurde weitgehend am GFZ entwickelt und hat sich als eine verhältnismäßig hoch auflösende Methode zum Studium von Diskontinuitäten im oberen Erdmantel bewährt. Im Gegensatz zur P-Receiver-Funktions-Methode ist sie weitgehend frei von störenden Einflüssen anderer Wellentypen und liefert daher gesicherte Abbildungen von Schichtgrenzen im obersten Mantel. Typischerweise sehen die S-Receiver-Funktionen positive Signale von der Moho (graue Signale in Abb. 4a) sowie darunter negative Signale (schwarz in Abb. 4a). Diese Signale werden üblicherweise als S- zu P-Konversionen an einer negativen Dis-

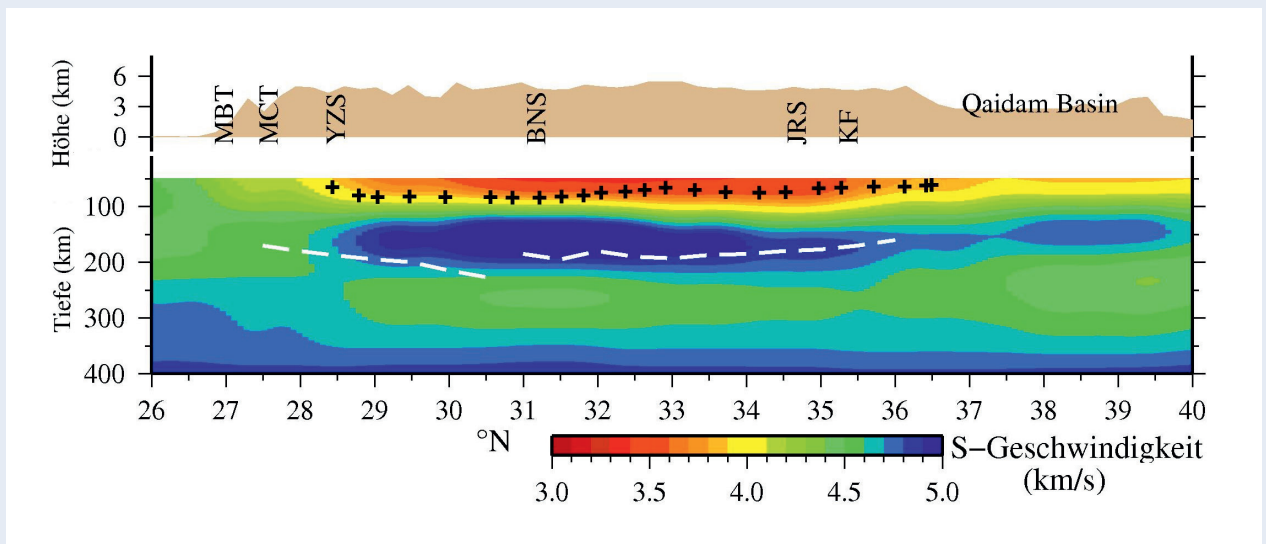


Abb. 3: NNO-SSW Profil durch die Kollisionszone zwischen der indischen und eurasischen Platte (siehe Abb. 1 für Lage des Profils). Die Farben zeigen die Geschwindigkeit in einem tomographischen Modell, das mit Hilfe von Wellenformmodellierung von Oberflächenwellen erstellt wurde. Die untere Begrenzung der Lithosphäre ist im Allgemeinen durch eine Geschwindigkeitsinversion, d. h. einen negativen Geschwindigkeitsgradienten mit der Tiefe, geprägt. Die Ergebnisse der Oberflächenwellenanalyse werden mit der Abschätzung der Lithosphären-Asthenosphären-Grenze (LAB) verglichen, die mit Hilfe von S-Receiver-Funktionen kartiert wurde (gestrichelte weiße Linie). Die Moho wird durch schwarze Kreuze markiert, und die Beschriftung auf dem topographischen Profil zeigt die wichtigsten geologischen Strukturen: MBT – Main Boundary Thrust, MCT – Main Central Thrust, YZS – Indus Yarlung-Sutur, BNS – Bangong Nujiang-Sutur, JRS – Jinsha River-Sutur; KF – Kunlun-Blattverwerfung. Da in Indien nur eine Station zur Verfügung stand, ist die Auflösung südlich der YZS (bei $\sim 28^\circ\text{S}$) erheblich geringer.

Fig. 3: NNE-SSW cross-section through the India-Asia collision zone (see Fig. 1 for location). The colours indicate velocities in the tomographic model derived from waveform modelling of surface waves. The bottom of the lithosphere is marked by a velocity inversion, i.e. a negative velocity gradient with depth. The surface wave result is compared to the Lithosphere-Asthenosphere Boundary (LAB) as mapped by S receiver functions (white dashed line). The black crosses show the Moho, and the labels on the topographic profile show major geological features: MBT – Main Boundary Thrust, MCT – Main Central Thrust, YZS – Indus Yarlung Suture, BNS – Bangong Nujiang Suture, JRS – Jinsha River Suture; KF – Kunlun Fault.

Note that due to the sparsity of available stations in India the southernmost part of the model (south of the YZS at $\sim 28^\circ\text{N}$) is not well resolved.

kontinuität im oberen Mantel interpretiert. Die dafür in Frage kommende Diskontinuität ist in erster Linie die LAB. In Abb. 4a beobachten wir teilweise zwei negative Diskontinuitäten übereinander. Diese interpretieren wir als indische (von Süden) sowie als eurasische (von Norden) einfallende LAB unterhalb einer tibetanischen LAB (Zhao et al., 2011). In Abb. 4b ist diese Situation in einer Skizze dargestellt. Diese Beobachtungen von Schichtgrenzen im oberen Mantel in Tibet sind die bisher hochauflösendsten. Sie bestätigen erstmals analytisch die schon vor fast einhundert Jahren geäußerten Vermutungen, dass sich die indische Lithosphäre unter Tibet schiebt. Darüber hinaus wurden deutliche Hinweise gefunden, dass sich von Norden her die eurasische Lithosphäre entlang des Beobachtungsprofils ebenfalls unter Tibet schiebt. Diese Interpretation der aktuellen Beobachtungen ist aber noch

umstritten. Zudem wurden in Zentraltibet noch Hinweise auf eine weitere, relativ homogene separate Einheit oberhalb der eurasischen Platte gefunden, die man als eigene Tibetanische Platte bezeichnen könnte (Zhao et al. 2011). Obwohl sich das Hochland von Tibet geologisch gesehen aus mehreren Terranen zusammensetzt, scheinen diese sich zumindest an ihrer Unterseite weitgehend homogenisiert zu haben, was auf ein Fließen der Unterkruste (über geologische Zeiträume) hindeutet und durch hohe Temperaturen und eine ungewöhnliche Zusammensetzung der Unterkruste begünstigt wird.

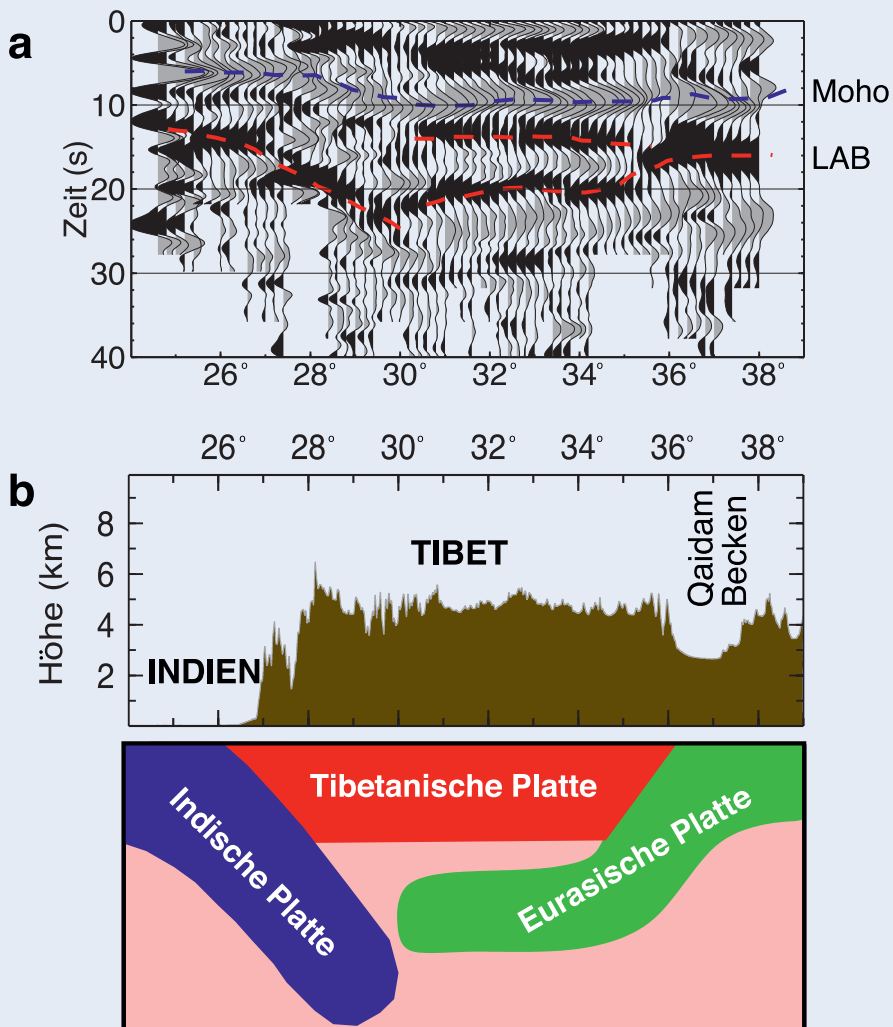


Abb. 4: a) Gestapelte S-Receiver-Funktionen entlang des Nord-Süd-Profiles durch Tibet (siehe Abb. 1). Signale von der Grenze zwischen Erdkruste und Mantellithosphäre sind mit einer blauen gestrichelten Linie markiert (Moho). S-Receiver-Funktions-Signale von der Untergrenze der verschiedenen Lithosphärenplatten sind mit rot gestrichelten Linien markiert (LAB). b) Skizze der Lage der verschiedenen Platten unter Tibet. Die Indische Platte taucht nach Norden unter Tibet ab. Die Eurasische Platte taucht nach Süden ebenfalls unter Tibet ab, schiebt sich aber dann horizontal weiter in südlicher Richtung. Weiterhin haben wir Hinweise auf die Existenz einer dritten separaten Tibetanischen Platte oberhalb der Eurasischen Platte gefunden.

Fig. 4: a) Stacked S receiver functions along the north-south profile through Tibet (see Fig. 1). Signals from the boundary between the Earth's crust and the mantle lithosphere (Moho) are marked with a blue dashed line. S receiver function signals from the lower boundaries of the different lithospheric plates (LAB) are marked by red dashed lines. b) Sketch of the location of the different plates below Tibet. The Indian plate subducts towards the north below Tibet. The Eurasian plate also subducts below Tibet towards the south but flattens out at depth. We also have indications for the existence of a separate Tibetan plate above the Eurasian plate.

Ausblick

Das Studium von Strukturen in der Lithosphäre (Erdkruste und Mantelanteil) ist eine der zentralen Aufgaben der Seismologie. Die Ergebnisse sind eine wichtige Voraussetzung für dynamische Interpretationen von Vorgängen im Rahmen der Plattentektonik. Die Dynamik des Erdkörpers als Quelle aller Lebensvorgänge auf der Erde dringt immer mehr in das Bewusstsein der Menschheit, was wegen der für menschliche Verhältnisse langsamen Prozesse selbst von der Wissenschaft erst seit einem halben Jahrhundert akzeptiert wird. Mit modernen Methoden (Satelliten) lassen sich heute die Plattenbewegungen an der Erdoberfläche direkt beobachten. Für das Studium des Erdinneren sind aber seismische Methoden nach wie vor unerlässlich. Die Seismologie hat in den letzten fünf bis zehn Jahren eine wahre Explosion der Menge von verfügbaren Daten erfahren, und die Entwicklung von neuen seismischen Methoden geht rapide voran. Dies wird durch den enormen Zuwachs an Rechenkapazität ermöglicht, insbesondere durch die Verfügbarkeit von Rechenclustern; zum Beispiel wird das seismische Hintergrundrauschen inzwischen direkt zur Strukturanalyse herangezogen. Heute liefern Arrays von Sensoren eine Fülle von neuen Informationen, deren Auswirkungen auf unsere Modellvorstellungen von den Vorgängen im Erdinneren nur vermutet werden können. Das betrifft nicht nur ferne Gebiete wie Tibet, die erst in letzter Zeit intensiv untersucht wurden, sondern auch Regionen Europas, die seit langem geologisch und auch geophysikalisch untersucht werden, deren tiefere Strukturen aber zu kompliziert sind, als dass sie mit der bis vor wenigen Jahren zur Verfügung stehenden Stationszahl und konventionellen Methoden adäquat abgebildet hätten werden können. Insbesondere die Alpen, als eine kontinentale Kollisionszone im Prä-Himalaya-Stadium, sind in diesem Zusammenhang zu nennen. Sie nehmen in der Tektonik Europas und auch im Hinblick auf Erdbebengefährdung eine zentrale Rolle ein. Viele grundsätzliche Fragen, wie die Polarität der Aufschiebung (von Norden nach Süden oder umgekehrt) in Teilen des Systems sind aber noch ungeklärt. Eine andere Perspektive auf Kollisionsprozesse bietet Skandinavien, wo sich die kontinentale Kollision bereits vor rund 450 Mio. Jahren abspielte und nicht mehr aktiv ist. Hier hat die Erosion die tieferen Stockwerke der Kollisionszone an die Oberfläche gebracht und damit geologischer Erkundung zugänglich gemacht. Aus der Kombination mit seismologischen Messungen lassen sich hier Erkenntnisse gewinnen, die unser Verständnis aktiver Kollisionszonen verbessern. Internationale geowissenschaftliche Verbundprojekte sind in Planung, um diese Gebiete mit dichten seismologischen Netzwerken zu instrumentieren und die tiefe Struktur dieser Regionen in hoher Auflösung abzubilden und zu verstehen.

Literatur

- Karplus, M. S., Zhao, W., Klemperer, S. L., Wu, Z., Mechie, J., Shi, D., Brown, L. D., Chen, C. (2011): Injection of Tibetan crust beneath the south Qaidam Basin: Evidence from INDEPTH IV wide-angle seismic data. - *Journal of Geophysical Research*, 116, B07301, 10.1029/2010JB007911.
- León Soto, G., Sandvol, E., Ni, J. F., Flesch, L., Hearn, T. M., Tilmann, F., Chen, J., Brown, L. D. (2012): Significant and vertically coherent seismic anisotropy beneath eastern Tibet. - *Journal of Geophysical Research*, 117, B05308, 10.1029/2011JB008919.
- Mechie, J., Zhao, W., Karplus, M. S., Wu, Z., Meissner, R., Shi, D., Klemperer, S. L., Su, H., Kind, R., Xue, G., Brown, L. D. (2012): Crustal shear (S) velocity and Poisson's ratio structure along the INDEPTH IV profile in northeast Tibet as derived from wide-angle seismic data. - *Geophysical Journal International*, 191, 2, 369-384, 10.1111/j.1365-246X.2012.05616.x.
- Zhao, W., Kumar, P., Mechie, J., Kind, R., Meissner, R., Wu, Z., Shi, D., Su, H., Xue, G., Karplus, M., Tilmann, F. (2011): Tibetan plate overriding the Asian plate in central and northern Tibet. - *Nature geoscience*, 4, 870-873, 10.1038/ngeo1309.
- Zhao, J., Yuan, X., Liu, H., Kumar, P., Pei, S., Kind, R., Zhang, Z., Teng, J., Ding, L., Gao, X., Xu, Q., Wang, W. (2010): The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 107, 25, 11229-11233, 10.1073/pnas.1001921107.

Seismische Datengewinnung – moderne Messsysteme verbessern die Abbildung des tiefen Untergrunds

Christian Haberland und Trond Ryberg
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Most of our knowledge of the Earth's interior results from seismological observations. The measurements are based on the fact that different rock types show different physical properties, and that seismic waves (e.g., from earthquakes or explosions) travelling through the Earth can be observed at the surface and be used to infer the internal architecture. Early seismological observations revealed the layered structure of the Earth, and today scientists are working on imaging the regional and local structural variations to better understand the geological processes and dynamics forming the Earth. However, seismic methods are also utilized to reveal the shallow parts bearing important resources such as hydrocarbons, water, or mineral deposits.

In every case, the challenge for these seismic methods is to provide ever detailed images of the subsurface. One important step toward this aim is to increase the number of observations which can often be achieved by increasing the number of recording instruments. Recent technological advances in the field of A/D-converters, GPS receivers, and data storage led to the development of very compact autonomous recorders with a significantly reduced power consumption. Now, more instruments can be transported and installed with less personnel and costs, which results in significantly denser spatial sampling of the seismic wave field, thus eventually yielding better resolved subsurface images.



Moderne Vorstellungen über den Aufbau der Erde basieren in erster Linie auf Befunden seismologischer Studien. Das Grundprinzip der Messungen beruht auf unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von Gesteinstypen. So ändert sich z. B. die Geschwindigkeit von Erdbebenwellen, wenn sie bei ihrem Weg durch den Erdkörper unterschiedliche Gesteinsschichten durchlaufen. Seismische Messungen an der Erdoberfläche erlauben daher Rückschlüsse auf die tieferen Strukturen der Erde.

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts gelang Emil Wiechert, Beno Gutenberg und Andrija Mohorovičić mit geophysikalischen Studien an Erdbebenwellen ein erster Blick ins Erdinnere. Daraus entwickelte sich die Theorie, dass die Erde einen schalenförmigen Aufbau hat. Bis heute dienen Erdbebenbeobachtungen dazu, diesen Schalenbau in weiteren Details zu verstehen sowie regionale strukturelle Variationen und Heterogenitäten näher zu untersuchen, die Hinweise auf die ablaufenden geologischen Prozesse (Gebirgsbildung, Subduktion, Vulkanismus etc.) und die Entstehungsgeschichte der Erde geben (z. B. Haberland et al., 2009; Mohsen et al., 2012). Darüber hinaus liefern diese Beobachtungen Informationen zu Erdbebenort und -zeit sowie Herdmechanismus und Bruchvorgang und leisten so einen wesentlichen Beitrag zur Gefährdungsanalyse und zur Erdbeben- und Tsunami-Frühwarnung.

Seismologische Verfahren lösen die unterirdischen, dem Auge verborgenen Strukturen aber nicht nur im globalen Maßstab auf, sondern dienen auch dazu, unbekannte Strukturen in den obersten Metern bis Kilometern mit hoher Genauigkeit abzubilden. So werden künstliche seismische Quellen beispielsweise von Explosionen oder Vibroseisanregungen routinemäßig für die Exploration von Grundwasser, Kohlenwasserstoffen und mineralischen Rohstoffen bzw. Reservoirs eingesetzt (z. B. Baumann-Wilke et al., 2012). Aktive seismische Verfahren (Refraktions-/Reflexionsseismik) sind die wichtigsten Messverfahren in der Grundlagenforschung zur Erkundung der Struktur der Kruste und des oberen Erdmantels (Prodehl & Mooney, 2012, und Referenzen darin; Mechie et al., 2012).

Links: Neue, kompakte seismische Registrierstation in der Wüste Namibias. Die Station in der Nähe der angolanischen Grenze ist Teil eines 300 km langen seismischen Profils zur Erforschung des namibischen Kontinentalrands. (Foto: Ch. Lendl, GFZ)

Left: New, compact seismic recording equipment in the Namibian desert. This station at the Namibian-Angolan border is part of a 300 km long seismic profile to study the Namibian passive continental margin.

Herausforderung: höhere Auflösung, mehr physikalische Parameter

In allen Fällen – bei der Beobachtung von Signalen natürlicher Erdbeben oder künstlichen seismischen Quellen, auf der globalen wie der lokalen Skala, in den obersten Metern wie an der Kern-Mantel-Grenze – besteht die Herausforderung für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler darin, immer höher aufgelöste Abbilder des Untergrunds zu erarbeiten und die geologischen Strukturen detailliert aufzuzeigen (Abb. 1).

Eine Möglichkeit, Abbilder zu verbessern, bieten neue, innovative Analysemethoden. So verwendet beispielsweise die Wellenformtomographie Aufzeichnungen über ein längeres Zeitintervall (im Gegensatz zu nur einem Laufzeitwert bei klassischen Verfahren) und erzielt damit höher aufgelöste Bilder (Pratt, 1999; Hole et al., 2005). Neben solchen verbesserten Datenanalyseverfahren kommt der Erhöhung der Anzahl der Messungen eine wichtige Bedeutung zu, zumal einige Verfahren eine hohe Signaldichte methodenbedingt voraussetzen. Diese kann entweder durch die Anzahl der seismischen Quellen und/oder der seismischen Stationen (Kanäle) erhöht werden, in manchen Fällen auch durch eine längere Registrierzeit. Das Ziel ist dabei, das Wellenfeld räumlich genauer zu erfassen – eine Voraussetzung dafür, die geologischen Strukturen besser aufzulösen. Zudem führt eine höhere Beobachtungsdichte zu einer signifikanten Rauschunterdrückung (Heath, 2008). Letztlich verbessert die Mehrfachmessung die Möglichkeit, Fehlfunktionen einzelner Stationen oder Komponenten auszugleichen.

Bei der Explorationsseismik ist seit Jahren der Trend zu einer steigenden Anzahl eingesetzter Registrierstationen zu beobachten. Typischerweise verdoppelt sich hier die Anzahl der verwendeten Kanäle (pro Messtrupp) etwa alle zwei Jahre (Heath, 2008). Heute werden in einigen Fällen Untersuchungen mit mehr als 100 000 aktiven Kanälen durchgeführt, um den Untergrund, z. B. ein Reservoir, petrophysikalisch und lithologisch zu charakterisieren.

In der Explorationsseismik werden auf lokaler Skala überwiegend kabelbasierte Systeme eingesetzt, bei denen die Daten einzelner Empfänger über Kabel oder Funk (in Nahe-Echtzeit) weitergeleitet werden. Großskalige oder lokale/regionale temporäre seismologische Studien decken Profile von mehreren 100 km bzw. Flächen von mehreren 10 000 km² ab und weisen Stationsabstände größer 100 m (bis mehrere 10er km) auf. Die Anzahl der verwendeten Geräte bei diesen nichtkommerziellen Anwendungen ist mit typischerweise unter 1000 Kanälen häufig sehr viel geringer als in der Explorationsseismik. In diesen großskaligen Untersuchungen kommen daher fast ausschließlich



Kontakt: Ch. Haberland
(haber@gfz-potsdam.de)

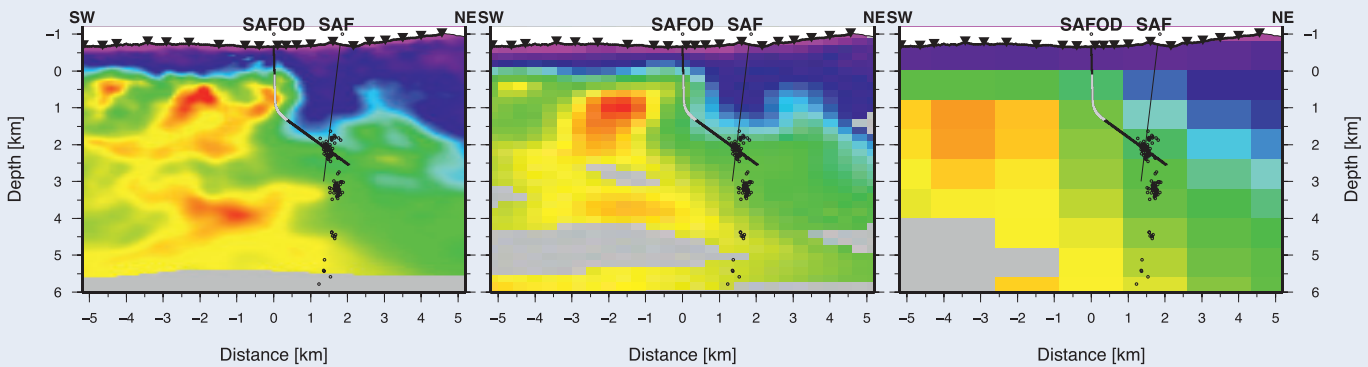


Abb. 1: Abbildungsleistung tomographischer Verfahren in Abhängigkeit von der Empfängerdichte. Für dieses Beispiel wurde der Originaldatensatz (aktive Seismik an der San Andreas-Verwerfung; Ryberg et al., 2012) sukzessive künstlich verringert, um den Effekt der Beobachtungsdichte zu zeigen (seismische Geschwindigkeiten sind farbkodiert). Links: Tomographische Inversion des Originaldatensatzes (Empfängerabstand 25 m). Mitte: Tomographische Inversion mit dezimiertem Datensatz, der einem Empfängerabstand von 125 m entspricht. Rechts: Tomographische Inversion mit dezimiertem Datensatz, der einem Empfängerabstand von 500 m entspricht. Die asymmetrische Geschwindigkeitsstruktur ist auf allen Bildern deutlich zu erkennen – die Feinstruktur, besonders in Relation zur Position der Bohrung, jedoch nur auf dem linken Bild (geringste Empfängerabstände).

Fig. 1: Spatial resolution of tomographic methods as a function of observation density. For this example the original dataset (controlled source seismic experiment at the San Andreas fault, California; Ryberg et al., 2012) was artificially decimated to simulate less dense observations. Seismic velocities are color-coded. Left: Tomographic inversion of the original dataset (receiver spacing 25 m). Middle: Tomographic inversion of decimated dataset reflecting a receiver spacing of 125 m. Right: Tomographic inversion of decimated dataset reflecting a receiver spacing of 500 m. The asymmetric velocity structure is visible at all images, however, the fine structure, particularly in relation to the drill hole position, can only be assessed in the left image (highest observation density – smallest receiver spacing).

autonome Registriereinheiten zum Einsatz, bei denen die Daten gespeichert und am Ende des Experiments ausgelesen werden.

Herausforderung an Logistik

Die größten Herausforderungen bei dem Einsatz einer größeren Anzahl von Sensoren in temporären Experimenten liegen in der Logistik. Ab einem bestimmten Volumen und Gewicht der Instrumente steigen der Logistikaufwand und die Transportkosten enorm an. Zudem ist der Stromverbrauch der Messgeräte eine besonders kritische Größe, da er gegebenenfalls die Verwendung großer und schwerer Batterien (und möglicherweise weiterer externer Stromversorgung, z. B. durch Solarpaneele) erforderlich macht. Bei kabelbasierten Systemen wird zudem das Gewicht der Kabel bei größeren Empfängerabständen überproportional groß (Lansley et al., 2008).

Neue Gerätegeneration

Fortschritte bei den technischen Komponenten wie Computer-Prozessoren, AD-Wandlern, Speicherchips und GPS-Empfängern machten die Entwicklung besonders kompakter und robuster autonomer Datenrekorder möglich, die sich durch einen extrem niedrigen Stromverbrauch (= kleinere Batterien) und vergleichsweise günstigen Preis bei gleichzeitig hoher Leistungsfähigkeit auszeichnen (Abb. 2). Diese Geräte ermöglichen, dass – verglichen mit älteren Geräten – ein Registriertrupp eine viel größere Zahl von Stationen/Kanälen in gleicher Zeit aufbauen kann, Logistik- und Transportkosten durch das geringere Gewicht gemindert werden und damit letztlich eine größere Anzahl von Stationen/Kanälen zur Verfügung steht. Gegenüber kabelbasierten Geräten kommt es zu geringeren Ausfällen (beispielsweise durch Kabelbeschädigungen). Die Geräte lassen sich auch an logistisch schwierigen Stellen aus der Luft (z.B. Hubschrauber) oder unkompliziert in innerstädtischen Bereichen aufbauen (z.B. Lansley, 2012).



Abb. 2: Vorbereitung von 300 seismischen Rekordern für Untersuchungen von Erdkruste und oberem Mantel am Kontinentalrand Namibias (Januar 2012). Die Geräte wurden sukzessive an 2000 Messpunkten entlang eines 200 km langen Profils aufgebaut. (Foto: Ch. Haberland, GFZ)

Fig. 2: Preparation of 300 seismic recorders for investigations of crust and upper mantle at the Namibian passive continental margin (January 2012). These instruments were successively deployed at 2000 locations along a 200 km long profile.

Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ wurden in den letzten Jahren solche kompakten 3-Kanal-Datenrekorder entwickelt, die sowohl in aktiven seismischen Experimenten als auch in temporären seismologischen Untersuchungen von Erdbeben (bis Perioden von 20 Sekunden) eingesetzt werden (Abb. 3). Diese Entwicklung mündete 2011 in einer Firmenausgründung am GFZ, die die Geräte fertigt und vertreibt. Über den Geophysikalischen Gerätepool Potsdam (GIPP) des GFZ steht eine Vielzahl dieser (und anderer) Geräte für die wissenschaftliche Community bzw. geowissenschaftliche Forschungsprojekte kostenfrei zur Verfügung (näheres siehe S. 37).

Die Verringerung von Gewicht und Volumen und demzufolge die Vorteile bei Transport und Installation machen sich auch bei kleineren Experimenten positiv bemerkbar: sie können mit geringeren Kosten und Personalaufwand durchgeführt werden – dies ist vor allem bei kleinen Forschungsprojekten wichtig. Zudem ermöglichen die vielen kontinuierlich registrierenden,

autonomen Stationen die Anwendung innovativer Abbildungsverfahren, die auf einer Langzeitmessung des seismischen Hintergrundrauschens (*ambient noise*) basieren. Verbunden mit allen Vorteilen der neu entwickelten Hardware können mit diesem Abbildungsverfahren sehr dichte Profile bzw. Flächen vermessen werden (z. B. Ryberg, 2011).

Auch bei der industriellen Exploration finden die kabellosen (autonomen) Systeme immer mehr Verbreitung (z. B. Heath, 2008, 2012; Mougnot, 2010; Dean, 2012), da mit ihnen der Datentransfer bei den sehr hohen Kanalzahlen realisiert werden kann.



Abb. 3: Die Registrierstationen – wie hier in der namibischen Wüste – können fast vollständig eingegraben werden, um beispielsweise Störungen durch Tiere zu minimieren. (Foto: Ch. Haberland, GFZ)

Fig. 3: The instruments, as here in the Namibian desert, can be buried almost completely – for example to minimize disturbances by animals.

Ausblick

In den kommenden Jahren wird die neue Gerätegeneration, die u. a. eine sehr viel größere Anzahl von Beobachtungsstationen in den einzelnen Experimenten ermöglicht, höher aufgelöste Abbilder des Untergrunds liefern und somit zu einem besseren Verständnis der geologischen Strukturen und der ablaufenden Prozesse beitragen. Die schnelle Verfügbarkeit der Daten wird bei vielen Experimenten und Monitoring-Anwendungen auch weiterhin wichtig sein. Neben der Entwicklung innovativer Auswertemethoden werden sich zukünftige Forschungsarbeiten am GFZ mit einem effizienten Datentransfer, mit der Entwicklung neuer Sensoren und Rekorder sowie mit einer Optimierung des Managements von Experimenten befassen.

Danksagung

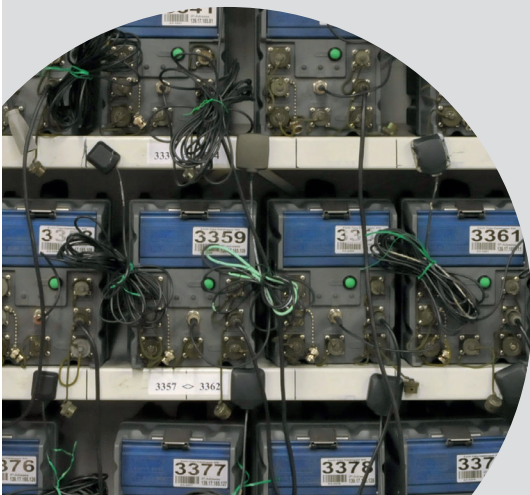
Viele Kollegen haben die Entwicklung der neuen Datenrekorder maßgeblich vorangetrieben, allen voran Mike Höning, Karl-Heinz Jäckel, Jens Bribach, Christof Lendl und Albrecht Schulze.

GIPP – Geophysikalischer Gerätepool des GFZ

Neben den seit vielen Jahrzehnten betriebenen Observatorien und permanenten Beobachtungsnetzen bilden temporäre Experimente, die typischerweise Tage bis Monate dauern, einen zentralen Bestandteil geophysikalischer Forschung. Für diese Experimente hält der Geophysikalische Gerätepool Potsdam (GIPP) des GFZ eine große Anzahl mobiler Feldinstrumente vor, die auch Arbeitsgruppen an Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen für die akademische Forschung kostenfrei zur Verfügung stehen. Zu dem Gerätepool gehören magnetotellurische (elektromagnetische) und seismologische Sensoren und Datenrekorder sowie eine Vielzahl von Peripheriegeräten, die überwiegend bei Landexperimenten zum Einsatz kommen. Einige weitere Geräte dienen amphibischen Experimenten. Übliche Einsatzzeiten liegen zwischen zwei Wochen und zwei Jahren. Der GIPP wurde im Jahr 1992 in Betrieb genommen und hat seitdem rund 200 geowissenschaftliche Projekte mit Geräten ausgerüstet. Der Erfolg dieser Infrastruktur dokumentiert sich in einer großen Anzahl Publikationen und Dissertationen, die auf Daten GIPP-unterstützter Experimente basieren. Die mit GIPP-Geräten aufgezeichneten Daten werden am GFZ gespeichert und stehen einer weiteren Nutzung zur Verfügung. Die Verwaltung, Benutzerschulung, Pflege und Weiterentwicklung des Gerätepools wird durch das GFZ finanziert. Die Bereitstellung der Geräte erfolgt kostenfrei für alle Forschungseinrichtungen.

Weitere Informationen:

<http://www.gfz-potsdam.de/gipp>



Literatur

- Baumann-Wilke, M., Bauer, K., Schovsbo, N. H., Stiller, M. (2012): P-wave traveltome tomography for a seismic characterization of black shales at shallow depth on Bornholm, Denmark. - *Geophysics*, 77, 5, EN53-EN60, 10.1190/geo2011-0326.1.
- Dean, T. (2012): Land seismic: the 'quiet' revolution. - *Preview*, 157, 38–41, 10.1071/PVv2012n157p38.
- Haberland, C., Rietbrock, A., Lange, D., Bataille, K., Dahm, T. (2009): Structure of the seismogenic zone of the southcentral Chilean margin revealed by local earthquake traveltome tomography. - *Journal of Geophysical Research*, 114, B01317, 10.1029/2008JB005802.
- Heath, B. (2008): Land seismic: the move towards the mega-channel. - *First Break*, 26, 2, 53-58.
- Heath, B. (2012): Seismic of tomorrow: configurable land systems. - *First Break*, 30, 6, 93-102.
- Hole, J. A., Zelt, C. A., Pratt, R. G. (2005): Advances in Controlled-Source Seismic Imaging. - *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 86, 18, 177–184, 10.1029/2005EO180001.
- Lansley, M., Laurin, M., Ronen, S. (2008): Modern land recording systems: How do they weigh up? - *The Leading Edge*, 27, 7, 888–894, 10.1190/1.2954029.
- Lansley, M. (2012): Cabled versus cable-less acquisition: making the best of both worlds in difficult operational environments. - *First Break*, 30, 1, 97–102.
- Mechie, J., Zhao, W., Karplus, M. S., Wu, Z., Meissner, R., Shi, D., Klemperer, S. L., Su, H., Kind, R., Xue, G., Brown, L. D. (2012): Crustal shear (S) velocity and Poisson's ratio structure along the INDEPTH IV profile in northeast Tibet as derived from wide-angle seismic data. - *Geophysical Journal International*, 191, 2, 369-384, 10.1111/j.1365-246X.2012.05616.x.
- Mohsen, A., Asch, G., Kind, R., Mechie, J., Weber, M. (2012 online first): The lithosphere-asthenosphere boundary in the eastern part of the Dead Sea Basin (DSB) from S-to-P receiver functions. - *Arabian Journal of Geosciences*, 10.1007/s12517-011-0503-4.
- Mougenot, D. (2010): Land cableless systems: use and misuse. - *First Break*, 28, 2, 55–58.
- Pratt, R. G. (1999): Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part 1: Theory and verification in a physical scale model. - *Geophysics*, 64, 888–901, 10.1190/1.1444597.
- Prodehl, C., Mooney, W. (2012): Exploring the Earth's Crust - History and Results of Controlled-Source Seismology, (Memoir / Geological Society of America ; 208), Boulder, 764 p.
- Ryberg, T. (2011): Body wave observations from cross-correlations of ambient seismic noise: A case study from the Karoo, RSA. - *Geophysical Research Letters*, 38, L13311, 10.1029/2011GL047665.
- Ryberg, T., Hole, J. A., Fuis, G. S., Rymer, M. J., Bleibinhaus, F., Stromeyer, D., Bauer, K. (2012): Tomographic Vp and Vs structure of the California Central Coast Ranges, in the vicinity of SAFOD, from controlled-source seismic data. - *Geophysical Journal International*, 190, 3, 1341-1360, 10.1111/j.1365-246X.2012.05585.x.

Die elektrisch leitfähige Erde

Oliver Ritter, Ute Weckmann, Gerard Muñoz
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Understanding the electrical conductivity of earth materials is important to decipher structures and processes in Earth's deep interior. Electromagnetic deep sounding methods are used to unravel structures at depths from a few tens of meters to tens of kilometres. The Geo-Electromagnetic Group of GFZ is interested in all aspects of this research field: sensor and instrument development, novel algorithms for signal processing and data inversion, conductivity measurements on rock samples and application of the method to basic and applied research topics. We present examples from the San Andreas Fault, California, South Africa and the North German Basin.



Einige Metalle, wie beispielsweise Kupfer oder Aluminium, setzen dem elektrischen Stromfluss wenig Widerstand entgegen. Andere Stoffe, beispielsweise Granit oder Marmor, leiten dagegen den elektrischen Strom so gut wie nicht. Salzwasser mit seinem hohen Anteil gelöster Ionen ist wiederum ein guter Leiter. Auch tief in der Erde gibt es Schichten unterschiedlicher Leitfähigkeit. Wie gut einzelne Gesteinsschichten den elektrischen Strom leiten, hängt von ihrem Wassergehalt, ihrer chemischen Zusammensetzung und vor allem vom Grad ihrer Mineralisation ab. So sind stark mineralisierte Gesteine, die Erze, Graphit und viele Sulfide enthalten, sehr gute unterirdische Leiter.

Da man den elektrischen Widerstand der Gesteine im tiefen Untergrund nicht direkt messen kann, werden die elektrischen und magnetischen Felder an der Erdoberfläche mit Sonden aufgenommen. Als „Stromquelle“ dienen dabei die Sonne und Blitze, denn der ständig wehende Sonnenwind und die weltweite Gewitteraktivität, vor allem im tropischen Gürtel, erzeugen in der Magnetosphäre und Ionosphäre elektrische Wechselströme. Weltweit gibt es zwischen 2000 und 3000 Gewitter täglich, mit bis zu 30 Mio. Blitzen. Deren Magnetfeldänderungen wiederum induzieren elektrische Ströme im Untergrund. Die horizontalen magnetischen und elektrischen Feldkomponenten können an der Erdoberfläche mit geeigneten Messsystemen aufgezeichnet und diese Daten anschließend mit Computerprogrammen ausgewertet werden. Als Ergebnis erhält man ein Modell der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit mit der Tiefe. Diese Messungen werden als „magnetotellurische Tiefensondierungen“ (MT) bezeichnet.

Die Geo-Elektromagnetikgruppe am Deutschen GeoForschungszentrum GFZ beschäftigt sich mit allen Aspekten der elektromagnetischen Tiefenforschung. Sie betreibt z. B. aktiv die Entwicklung von Sensor- und Datenerfassungssystemen für die Magnetotellurik-Komponente des Geophysikalischen Gerätepools Potsdam (GIPP). GIPP ist eine Forschungsinfrastruktur des GFZ, die hunderte von Messgeräten für die Seismologie und über 70 Geräte für die Magnetotellurik umfasst (vgl. Artikel Haberland und Ryberg in diesem Heft). Über diesen Instrumentenpool können sich Universitäten und andere deutsche

Forschungseinrichtungen Instrumente für geophysikalische Experimente ausleihen. Weitere Forschungsschwerpunkte der Geo-Elektromagnetikgruppe sind die Entwicklung neuer Algorithmen für die Signalverarbeitung und numerische Inversionsverfahren, Leitfähigkeitsuntersuchungen an Gesteinsproben, sowie die Entwicklung und Anwendung elektromagnetischer Verfahren mit künstlichen Quellen.

Die Durchführung großer Feldexperimente ist ein wesentlicher Aspekt unserer Forschung. Das Ziel ist dabei, Strukturen tief im Erdinneren besser zu verstehen. Große, aktive Verwerfungszonen, wie zum Beispiel die San Andreas-Verwerfung in Kalifornien, sind mehr als tausend Kilometer lang und trennen tektonische Platten bis in Tiefen von mehreren Zehner-Kilometern. Geophysikerinnen und Geophysiker bauen deshalb ihre Geräte und Sensoren an diesen Zonen auf.

Eine magnetotellurische Messstation besteht aus Magnetometern und Elektroden zur Aufzeichnung der magnetischen und elektrischen Wechselfelder sowie einem Datenerfassungssystem. Die Sensoren (Magnetometer und Elektroden) messen dabei nur vorhandene Felder, ohne selbst Ströme im Untergrund zu erzeugen. Die Messdauer an einem Punkt hängt von der angestrebten Sondierungstiefe ab. Für Eindringtiefen im Bereich von mehreren hundert Metern bis einigen Kilometern beträgt sie typischerweise ein bis drei Tage, für Tiefen von mehreren zehn bis hundert Kilometern können die Messzeiten einen Monat und länger betragen.

Die elektrisch leitende San Andreas-Verwerfung

Auf diese Weise sind inzwischen eine Reihe geologisch aktiver Gebiete vermessen worden. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk den sogenannten Scherzonen, also jenen Bereichen der Erdkruste, in denen sich zwei Gesteinsschollen aneinander vorbeischieben. Große Horizontalverschiebungen, wie die San Andreas-Verwerfung in Kalifornien, sind Nahtstellen der Erde, die durch die gesamte Erdkruste bis in den Erdmantel hinein wirken. Welche Prozesse dabei ablaufen und welchen Verlauf solche Störungszonen in der Tiefe nehmen, ist ein geowissenschaftlich hochaktuelles Thema. An der Erdoberfläche wandert Los Angeles jährlich im Mittel rund sechs Zentimeter auf San Francisco zu, weil sich die Pazifische Platte, auf der Los Angeles liegt, nach Norden bewegt, parallel zur Nordamerikanischen Platte, auf der San Francisco liegt. In einigen Bereichen der Verwerfung ist diese Bewegung fast kontinuierlich, kriechend, während sich andere Bereiche verhaken, um sich dann, mit starken Erdbeben verbunden, ruckartig um mehrere Meter gegeneinander zu verschieben. Beim San Francisco-Erdbeben von 1906 wurde z. B. ein schlagartiger Versatz von sechs Metern registriert.

Mit Magnetotellurikmessungen ist es gelungen, diese Grenzfläche bis in große Tiefen abzubilden und einen Zusammen-

Links: Magnetotellurik-Messgeräte: Stationsaufbau im Tien Shan in Kirgisistan (Foto: G. Willkommen, GFZ)

Left: Magnetotelluric equipment: Station deployment in the Tien Shan in Kyrgyzstan



Kontakt: O. Ritter
(oritter@gfz-potsdam.de)

hang zwischen Vorgängen in der Tiefe und den Prozessen an der Erdoberfläche herzustellen (Becken et al., 2011). Im Abbild der elektrischen Leitfähigkeit in Abb. 1 wird deutlich, dass Gesteinswässer aus Tiefen des oberen Erdmantels, d. h. zwischen 20 und 40 km, bis in oberflächennahe Bereiche des kriechenden Teils der Verwerfung eindringen können, während diese Wässer in den anderen Bereichen von einer undurchlässigen Deckschicht am Aufstieg gehindert werden. Wo Fluide aufsteigen können, wird ein Gleiten der Platten begünstigt, während sie sich an anderer Stelle verhaken. Diese Ergebnisse legen nahe, dass es auch in der Tiefe große Unterschiede in den mechanischen und stofflichen Eigenschaften entlang der Störung gibt. So scheinen die sogenannten Tremor-Signale an Bereiche unterhalb der San Andreas-Verwerfung gekoppelt zu sein, in denen Fluide eingeschlossen sind. Mit Tremor werden niederfrequente Erschütterungen bezeichnet, die nicht mit Bruchvorgängen einhergehen, wie sie für normale Erdbeben typisch sind. Die Beobachtungen stützen insgesamt die Annahme, dass Fluide bei der Entstehung oder dem Ausbleiben von starken Erdbeben entlang großer Störungszonen eine wichtige Rolle spielen.

Die Arbeiten helfen, die treibenden Kräfte der Plattentektonik besser zu verstehen und zeigen neue Möglichkeiten auf, den Ablauf dynamischer Prozesse von großen Störungssystemen zu erklären. Ein besonders spannender Aspekt dieser Arbeiten ist der mögliche Zusammenhang von Fluiden und den an der San Andreas-Verwerfung beobachteten Tremorsignalen. Dies ist Gegenstand weitergehender Forschungstätigkeiten.

Generell sind die aktiven tektonischen Gebiete der Erde, in denen tektonische Platten aufeinandertreffen, wichtige Untersuchungsziele für die Geowissenschaften. Häufig werden diese geodynamischen Fragestellungen mit einer Vielzahl von Methoden und Verfahren in multi-disziplinären Ansätzen und in international vernetzten Projektgruppen untersucht. Die tiefe Magnetotellurik liefert für eine große Zahl dieser regionalen Projekte wertvolle Daten. Beispiele dafür sind die Verwerfung am Toten Meer (Israel/Jordanien), die zwei kontinentale Platten voneinander trennt, die kontinentale Kollisionszone im Pamir und Tien Shan (Kirgisistan/Tadschikistan) und die Subduktionszone in Chile.

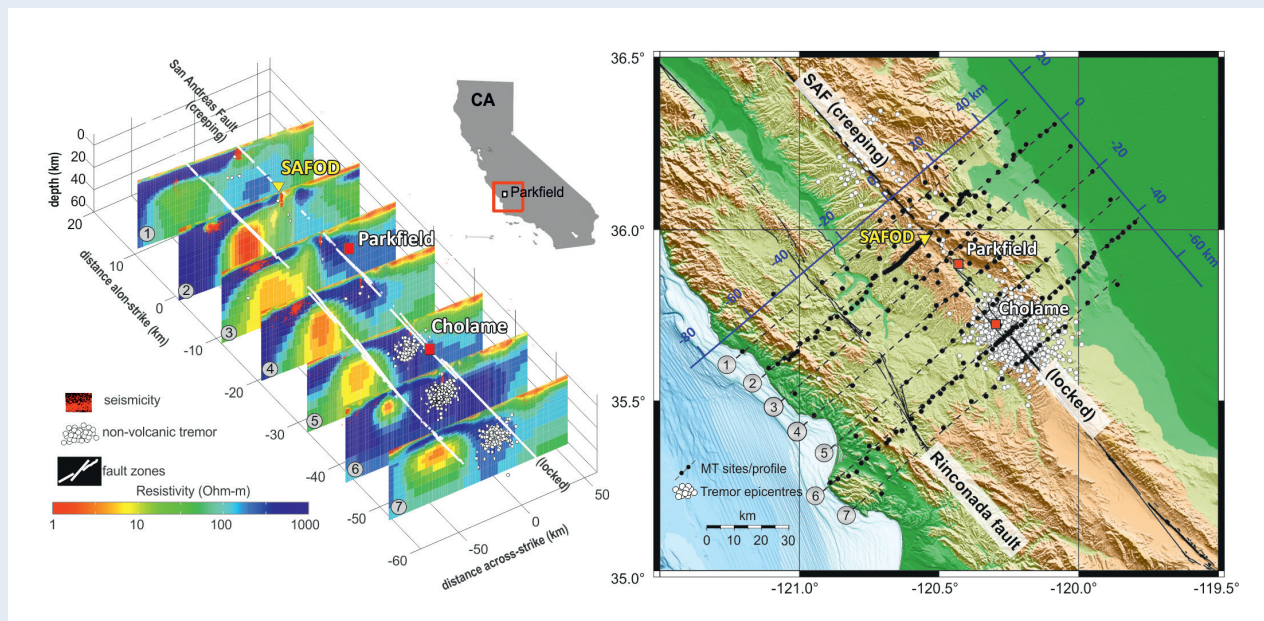


Abb. 1: Links: Im Abbild der elektrischen Leitfähigkeit erscheint im Bereich der San Andreas-Verwerfung ein tieferreichender, leitfähiger Kanal, der die gesamte Erdkruste bis in den oberen Erdmantel hinein durchdringt. Hohe Leitfähigkeiten, hier in roten und gelben Farbtönen dargestellt, lassen sich durch das Vorkommen von Fluiden erklären. Rechts: Verteilung der MT-Stationen (schwarze Punkte) und Lage der San Andreas-Verwerfung (SAF) in Kalifornien. Die weiß markierten Punkte zeigen Gebiete, in denen Tremorsignale gefunden wurden.

Fig. 1: Left: The image of electrical conductivity shows a deep-reaching conductive channel in the area of the San Andreas Fault penetrating the entire crust and into the upper mantle. High conductivities, shown in red and yellow colours, are explained with the presence of fluids. Right: Distribution of MT stations (black dots) and location of the San Andreas Fault in California. White dots show areas where tremor signals have been detected.

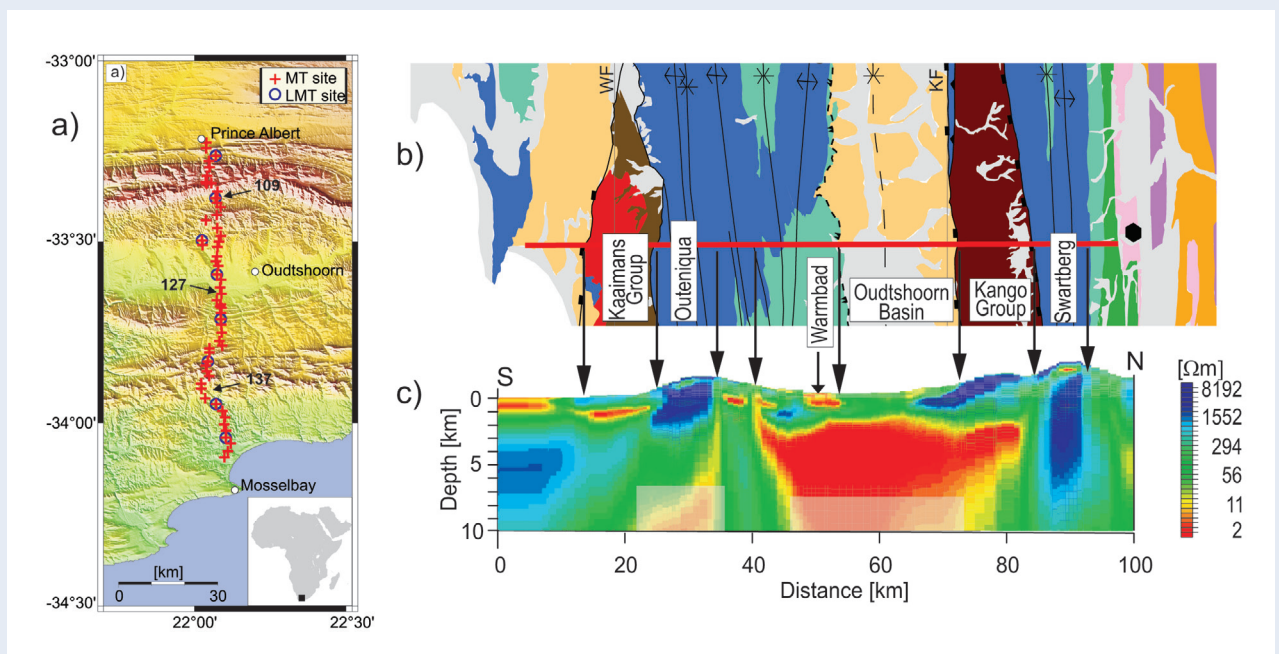


Abb. 2: a) Topographische Karte des Cape Fold Belts in Südafrika mit magnetotellurischen Messstationen (rote Kreuze). b) Oberflächengeologie entlang des in a) gezeigten Stationsprofils. c) Im Abbild der elektrischen Leitfähigkeit zeigen Gebirgszüge, wie der Swartberg und die Outeniqua-Berge schlecht leitende Gebirgsurzeln (blaue Farbe) bis in 2 km bzw. 7 km Tiefe. Unterhalb des Oudtshoorn-Beckens erscheint eine große Leitfähigkeitsanomalie (rote Farbe) ab einer Tiefe von etwa 3 km, die wahrscheinlich von heißen (und salzhaltigen) Wässern hervorgerufen wird.

Fig. 2: a) Topographic map of the Cape Fold Belts in South Africa with magnetotelluric stations (red crosses). b) Surface geology along the profile shown in a). c) In the image of electrical conductivity mountain ranges, like the Swartberg and the Outeniqua Mountains show poorly conductive roots (blue colours) down to depths of 2 km and 7 km, respectively. Below the Oudtshoorn Basin a large high conductivity anomaly (red colour) appears at a depth of about 3 km, possibly caused by hot (and saline) water.

Fossile Kollisionzonen und passive tektonische Gebiete

Während von den heute aktiven Platten- oder Kontinentalgrenzen eine direkte Gefahr in Form von starken Erdbeben für die dort lebenden Menschen ausgeht, erscheinen alte, sogenannte fossile Kollisionzonen zunächst weniger wichtig zu sein. Dennoch ist die Untersuchung und das Verständnis dieser Gebiete ein wichtiges Thema für die Geoforschung, denn an fossile Scherzonen sind viele heutige Georessourcen, wie z. B. Erze, gebunden. Außerdem waren heute tektonisch inaktive Gebiete zu anderen Zeiten der Erdgeschichte sehr aktiv. Das Verschieben und Aufbrechen von Kontinenten hatte erheblichen Einfluss auf unser Klima. Im südlichen Afrika lassen sich die Spuren dieser tektonischen Prozesse über einen sehr langen Zeitraum besonders gut studieren. Dieser Teil des Kontinents beherbergt nämlich die ältesten Gesteine der Erde und besitzt somit ein Geo-Archiv, das bis in die frühe Entwicklungsgeschichte unseres Planeten Erde zurück reicht.

Mit Magnetotellurik sind in den Jahren 2004 bis 2010 verschiedene Geo-Traversen in Südafrika vermessen worden, um Spuren der früheren Kontinentalkollisionen in Erdkruste und -mantel abzubilden (Weckmann et al., 2012). Die heutige Form Afrikas geht auf die Öffnung des Südatlantiks zurück, die vor etwa 130 Mio. Jahren einsetzte – der damalige Superkontinent Gondwana brach auseinander. Abb. 2a zeigt die Stationsverteilung eines MT-Profiles durch den Cape Fold Belt in Südafrika, der als letzte größere tektonische Einheit mit dem damaligen Superkontinent Gondwana vor etwa 250 Mio. Jahren kollidiert ist. Durch die enormen Kräfte bei der Kollision sind zwei Gebirgsketten (blaue/braune Farben in Abb. 2b) aufgeschoben worden. Die Swartberge und die Outeniqua-Berge besitzen tiefe Gebirgsurzeln (Abb. 2c), wogegen die Kango-Gruppe aufgrund dieses Leitfähigkeitsabbilds eher als flache Überschiebungsdecke zu interpretieren ist. Von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung für die Region könnte die große Leitfähigkeitsanomalie unterhalb des Oudtshoorn-Beckens sein. Sie zeigt höchst wahrscheinlich einen heißen (salinaren)

Wasserspeicher in mehr als 3 km Tiefe an. Entlang von Störungs-zonen scheint es Wegsamkeiten für die Fluide bis fast an die Erdoberfläche zu geben, was auch durch heiße Quellen, wie etwa im Ort Warmbad, gestützt wird.

Generell helfen diese neuen Abbilder der tieferen Erdkruste, existierende geologische Modelle zu modifizieren, die hauptsächlich auf Oberflächenbeobachtungen basieren und neue Erkenntnisse für die Entstehung von Kontinenten abzuleiten. Mit ihnen lassen sich aber ebenso Abschätzungen über das Ressourcenpotential, z. B. für Wassernutzung oder geothermische Energiegewinnung, tätigen.

Geophysikalische Exploration

Während die Zone stark erhöhter elektrischer Leitfähigkeit im obigen Beispiel von Südafrika im Nachhinein als mögliche Wasser-Ressource gedeutet wurde, werden elektromagnetische Messungen auch gezielt zur geophysikalischen Exploration eingesetzt. Mit hydrogeophysikalischen Verfahren können oberflächennahe wasserführende Schichten, sogenannte Aquifere, aufgespürt und kartiert werden. Die Spezialität der Geo-Elektromagnetik am GFZ ist die Charakterisierung von Aquiferen in mehreren Kilometern Tiefe. Diese sind neben der

Trinkwasserversorgung auch für die Gewinnung geothermischer Energie oder der Speicherung von Gasen im Untergrund von Bedeutung.

Abb. 3 zeigt die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit entlang eines 40 km langen Profils, das nördlich von Berlin im Gebiet des GFZ-Geothermielabors Groß Schönebeck vermessen wurde (Muñoz et al., 2010). In diesem aus zwei rund 4 km tiefen Bohrungen (einer sogenannten Doublette) bestehenden In-situ-Labor werden Technologien für die Stromerzeugung mittels Erdwärme entwickelt (Huenges et al. 2007, vgl. auch Beitrag Huenges in „GFZ-Journal System Erde“ (2011) Heft 2; online verfügbar: <http://systemerde.gfz-potsdam.de>). Für eine nachhaltige Nutzung der geothermischen Energie sind Temperaturen von über 100 °C und eine langfristige Wasserzirkulation im Untergrund erforderlich. Die elektromagnetischen Verfahren spielen bei der geothermischen Exploration eine wichtige Rolle, denn die elektrische Leitfähigkeit nimmt mit der Temperatur und der Permeabilität der Gesteine zu. Die gut leitenden Zonen in rund 4 km Tiefe (Abb. 3, rote Farben) stellen die Regionen dar, in denen der Untergrund besonders durchlässig ist und ein nachhaltiger Fluidenkreislauf möglich wäre.

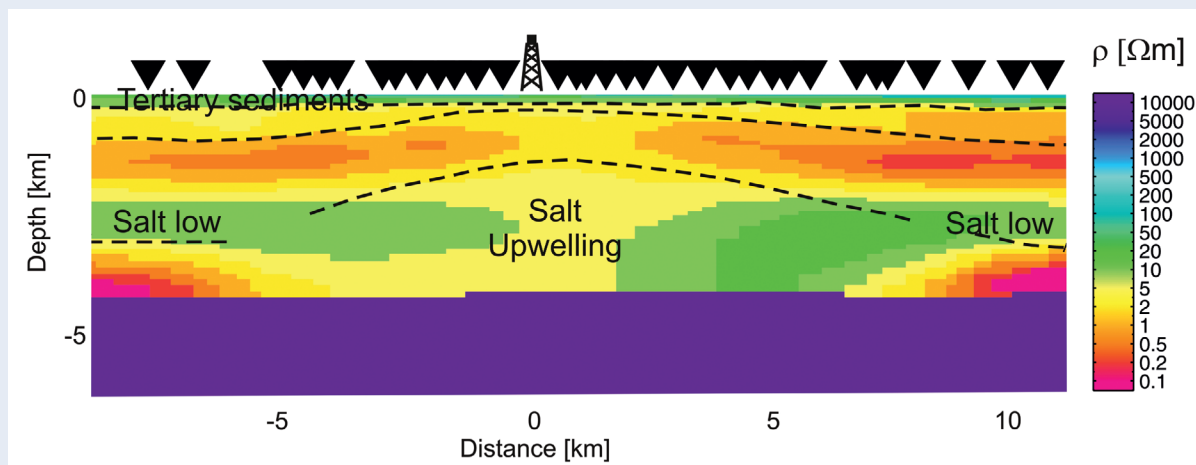


Abb. 3: Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Gebiet von Groß Schönebeck nördlich von Berlin. Die Dreiecke zeigen die Lokationen der MT-Messpunkte und der Bohrturm die Lage des In-situ-Geothermielabors. Die Zonen hoher Leitfähigkeit (rote Farbe) in einer Tiefe von ca. 4 km korrelieren wahrscheinlich mit stark zerklüfteten Gesteinen. Das Grundgebirge (ab einer Tiefe von etwa 4 bis 5 km) wird als schlecht leitend (blaue Farbe) abgebildet.

Fig. 3: Distribution of electrical conductivity in the region of Groß Schönebeck, north of Berlin. The inverted triangles show locations of MT stations and the drilling rig the position of the in-situ geothermal laboratory. Areas with high conductivity (red colours) at a depth of approximately 4 km could be correlated with heavily fractured rocks. The basement (from a depth of approximately 4-5 km) is imaged as a poor conductor (blue colour).

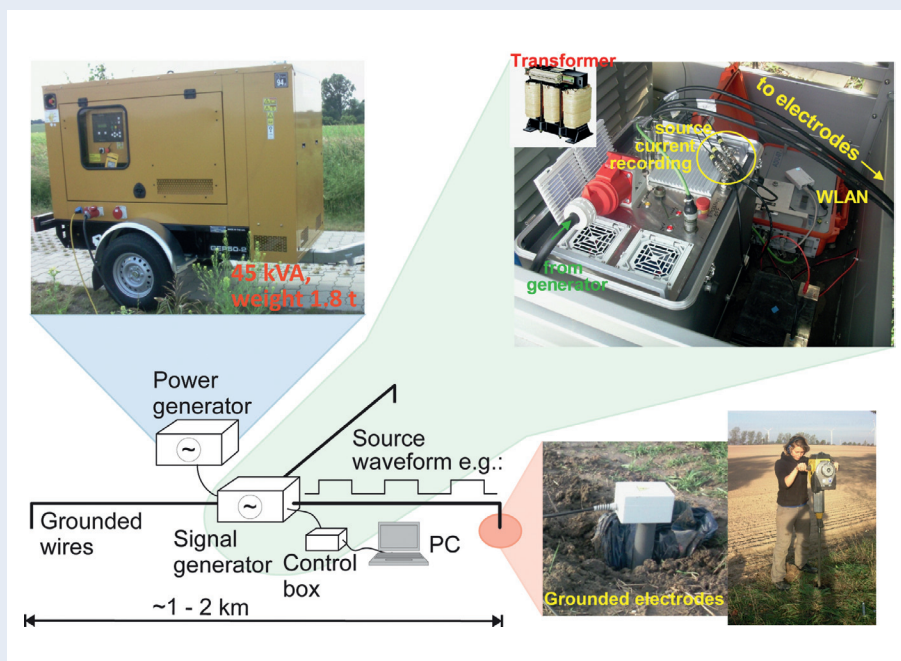


Abb. 4: Controlled Source-Elektromagnetik: Mit einem handelsüblichen 3-Phasen-Stromerzeuger (a) werden über einen programmierbaren Signal-generator (b) und Erdungselektroden Ströme in die Erde eingespeist. Als Einspeiseelektroden dienen Stahlspeieße, die mit einem hydraulischen Hammer einige Meter tief in den Boden getrieben werden (c) und die mit bis zu 1 km langen Kabeln an der Erdoberfläche verbunden sind.

Fig. 4: Controlled Source Electromagnetics: Currents are injected into the ground using a commercially available 3-phase power generator (a) and a programmable signal generator (b). For the current electrodes, steel rods are driven several meters into the ground using a hydraulic hammer (c); they are connected at surface with cables of up to 1 km length.

Elektromagnetische Tiefensondierung mit eigenen Stromquellen

Da die Magnetotellurik auf natürlich vorkommenden elektromagnetischen Feldern beruht, hat man keinen Einfluss auf deren Feldstärke. Gerade in den dicht besiedelten Gebieten Mitteleuropas gibt es vielfältige, durch menschliche Aktivitäten geschaffene Störquellen, die MT-Messungen stark erschweren können. Abhilfe kann das Verfahren der aktiven (oder „*controlled source*“) Elektromagnetik schaffen, mit dem Wechselströme gezielt in den Boden eingespeist werden; mit der Entwicklung und Anwendung dieser Methode haben sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ in den letzten Jahren intensiv beschäftigt.

Abb. 4 zeigt die prinzipiellen Komponenten des Systems (Streich et al., 2011). Es können verschiedene Signalformen (Rechteck, *pseudorandom binary sequences*) in einem breiten Frequenzbereich von mHz bis kHz mit bis zu 560 V und 40 A erzeugt und so bis in Entfernungen von mehreren Kilometern gemessen werden. Eine Besonderheit dieses neuartigen Systems ist es, dass mit einem Aufbau gleich mehrere Senderichtungen (Polarisationen) erzeugt werden können.

Mittlerweile haben wir das Verfahren am GFZ-Teststandort für CO₂-Untertagespeicherung in Ketzin trotz hoher Rauschpegel erfolgreich einsetzen können. Aus den gemessenen Daten können mittels mathematischer Verfahren, sogenannten Inversionsverfahren, Leitfähigkeitsmodelle abgeleitet werden. Erste Inversionsergebnisse zeigen, dass mit dem Verfahren

bis in Tiefen von mehreren Kilometern sondiert werden kann und damit weitere innovative Möglichkeiten zur Erkundung sowie zum Management des geologischen Untergrunds bereitgestellt werden.

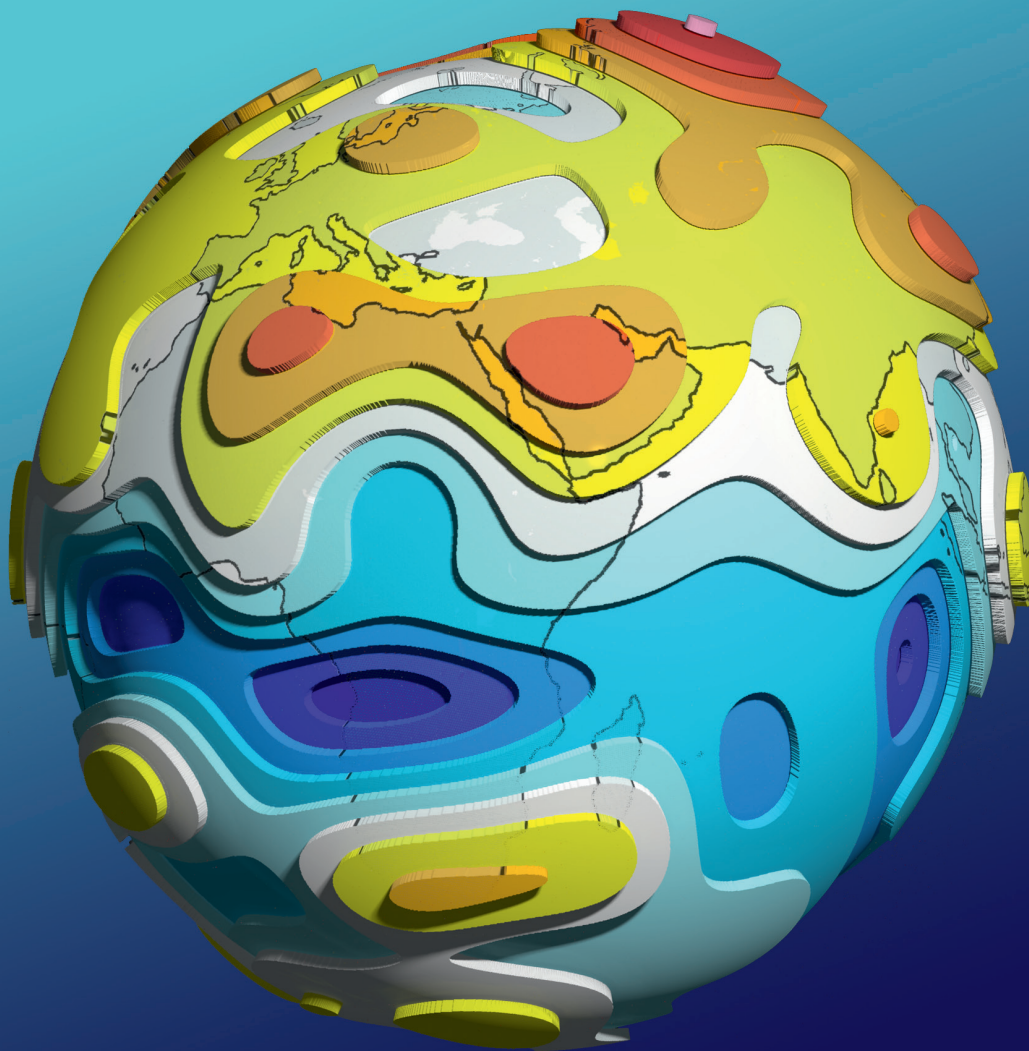
Literatur

- Becken, M., Ritter, O., Bedrosian, P., Weckmann, U. (2011): Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault. - *Nature*, 480, 87-90, 10.1038/nature10609.
- Huenges, E., Moeck, I., Geothermal Project Group (2007): Directional drilling and stimulation of a deep sedimentary geothermal reservoir. - *Scientific Drilling*, 5, 47-49, 10.2204/iodp.sd.5.08.2007.
- Muñoz, G., Ritter, O., Moeck, I. (2010): A target-oriented magnetotelluric inversion approach for characterizing the low enthalpy Groß Schönebeck geothermal reservoir. - *Geophysical Journal International*, 183, 3, 1199-1215, 10.1111/j.1365-246X.2010.04795.x.
- Streich, R., Becken, M., Matzander, U., Ritter, O. (2011): Strategies for land-based controlled-source electromagnetic surveying in high-noise regions. - *The Leading Edge*, 30, 10, 1174-1181, 10.1190/1.3657078.
- Weckmann, U., Ritter, O., Chen, X., Tietze, K., de Wit, M. (2012): Magnetotelluric image linked to surface geology across the Cape Fold Belt, South Africa. - *Terra Nova*, 24, 3, 207-212, 10.1111/j.1365-3121.2011.01054.x.

Das Erdmagnetfeld – Fenster zum Erdkern

Ingo Wardinski, Vincent Lesur, Seiki Asari, Martin Rother, Monika Korte
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The Earth's magnetic field has undergone temporal and spatial variations including polarity reversals. Paleomagnetic and historical magnetic field measurements suggest persistent distinct patterns of variation of the geomagnetic field taking place in different regions of the Earth. At least on the millennia time scale these patterns may be explained by the thermal influence of Earth's mantle on the geodynamo. Whether this influence can already be discerned on the century time scale is still debated. Although, the Earth's interior is inaccessible for direct observations, the effects of such processes at the top of the core and below are well observed at the Earth's surface. Several observables of these processes are used to infer the dynamical regime of Earth's outer core and its interaction with its vicinity.



Obwohl wir das Erdmagnetfeld nicht direkt wahrnehmen können, hätte sein Fehlen unmittelbaren Einfluss auf unser Leben und auf die Entwicklung des Lebens auf der Erde: Es verhindert das Eindringen hochenergetischer Teilchen aus dem interstellaren Raum und des Sonnenwindes in die Biosphäre. Ohne das Erdmagnetfeld hätte sich wahrscheinlich keine für das Leben günstige Umgebung ausgebildet. Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus dem Vergleich von Erde und Venus. Das Fehlen eines Magnetfelds bei der Venus führte vermutlich vor etwa vier Mrd. Jahren zu einem sich selbstverstärkenden Treibhauseffekt, bei dem das ursprünglich vorhandene Oberflächenwasser verdampfte und so den anfänglichen Treibhauseffekt verstärkte. In der Folge erhöhte sich der Anteil anderer Treibhausgase, die diesen Effekt weiter verstärkten. Ohne Magnetfeld war die Venus nicht in der Lage, leichte Gase wie Wasserdampf und Sauerstoff in ihrer Atmosphäre zu halten. So weist die Venus eine Oberflächentemperatur von 740 K auf und die Atmosphäre besteht im Wesentlichen aus Kohlendioxid und Stickstoff. Der Anteil von Wasserdampf beträgt 20 ppm und Sauerstoff fehlt gänzlich in der unteren Atmosphäre. Unter solchen Bedingungen erscheint die Entwicklung erdähnlichen Lebens kaum vorstellbar.

Das Magnetfeld unseres Planeten wird von einem Dynamo-Prozess im flüssigen Außenkern generiert. Diese Erkenntnis basiert auf seismologischen Erkundungen, vor allem die Entdeckung des flüssigen Erdkerns (1926) und der Entwicklung der modernen Dynamotheorie Mitte des 20. Jahrhunderts. Weitere Arbeiten von Mauersberger (1955) und Lowes (1966), die die räumliche Struktur des Magnetfelds an der Erdoberfläche untersuchten, führten zu der Erkenntnis, dass der größte Anteil des Magnetfelds im Erdkern erzeugt wird. Man bezeichnet diesen als das Hauptfeld.

Links: Modellierung der Vertikalkomponente des Magnetfelds an der Grenze zwischen flüssigem Erdkern und darüber liegendem Mantel. Sie basiert auf dem am GFZ entwickelten Magnetfeldmodell GRIMM-2 (GFZ Reference Internal Magnetic field Model), das aus Observatoriums- und Satellitenmessdaten berechnet wurde. Die hier gewählte Projektion ist eine Vereinfachung der kontinuierlichen Flächenfunktion und hebt wichtige Eigenschaften der Morphologie des Feldes hervor. (Abbildung: M. Rother, GFZ)

Left: Vertical magnetic field component at the top of the liquid outer core. It is derived from GRIMM-2 (GFZ) which based on observations of the Earth's magnetic field made at geomagnetic observatories and on-board geomagnetic satellite missions. A very simplistic projection is chosen to emphasize some of the main features of the Earth's magnetic field.

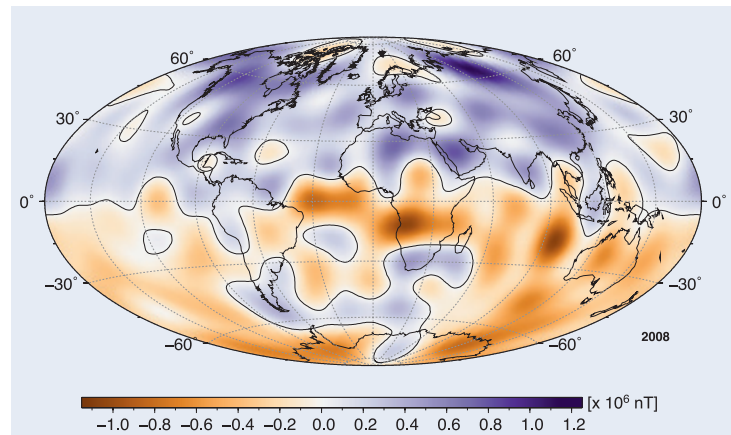


Abb. 1: Morphologie der Vertikalkomponente des Magnetfelds an der Kern-Mantel-Grenze für das Jahr 2008. Die Nulllinie (grau) markiert im südlichen Atlantik einen großen Bereich mit entgegengesetztem magnetischem Fluss und zeigt den Verlauf des magnetischen Äquators.

Fig. 1: The morphology of the vertical magnetic field component computed for the epoch 2008 at the core mantle boundary. Zero-contour lines are added to aid the identification of reverse flux patches and the magnetic equator.

Das Erdmagnetfeld unterliegt zeitlichen Schwankungen. So wissen wir aus Untersuchungen von magnetischen Gesteinen (Basalten, Diaziten, Laven), dass die Erde seit 3,5 Mrd. Jahren ein Magnetfeld besitzt, das sich in der Erdgeschichte mehrmals umgepolt hat. Bei diesen Umpolungsprozessen befindet sich das Erdmagnetfeld zuerst in einem dipolaren Zustand (zwei Pole), wobei die Achse des Dipols weitgehend mit der Rotationsachse der Erde zusammenfällt. Im Weiteren entwickeln sich immer größer werdende Abweichungen zwischen den beiden Achsen, zusätzlich verringert sich die Stärke des Dipolcharakters und multipolare Anteile werden bedeutsam. Als Folge der stärker werdenden multipolaren Anteile entwickeln sich an der Oberfläche des Außenkerns im Hauptfeld Regionen mit entgegengesetztem magnetischem Fluss. Die (Haupt-) Pole wandern äquatorwärts und es kommt zum vollständigen Umklappen der Pole. Das Feld gewinnt also zunächst an Komplexität und weist vorübergehend mehr als zwei Pole auf. Dann baut es sich mit zunehmender Stärke in umgekehrter Richtung als Dipol wieder auf. Es ist noch unklar, wie lange ein kompletter Umpolvorgang dauert. Nach aktuellem Forschungsstand geht man von wenigen Jahrtausenden aus (Nowaczyk et al., 2012).

Während der letzten Jahrtausende führten die Magnetpole häufig solche von der geographischen Achse abweichenden Bewegungen aus. In der fernerer Vergangenheit kam es jedoch mehrfach zu kompletten Umpolungen des Erdmagnet-



Kontakt: I. Wardinski
(ingo@gfz-potsdam.de)

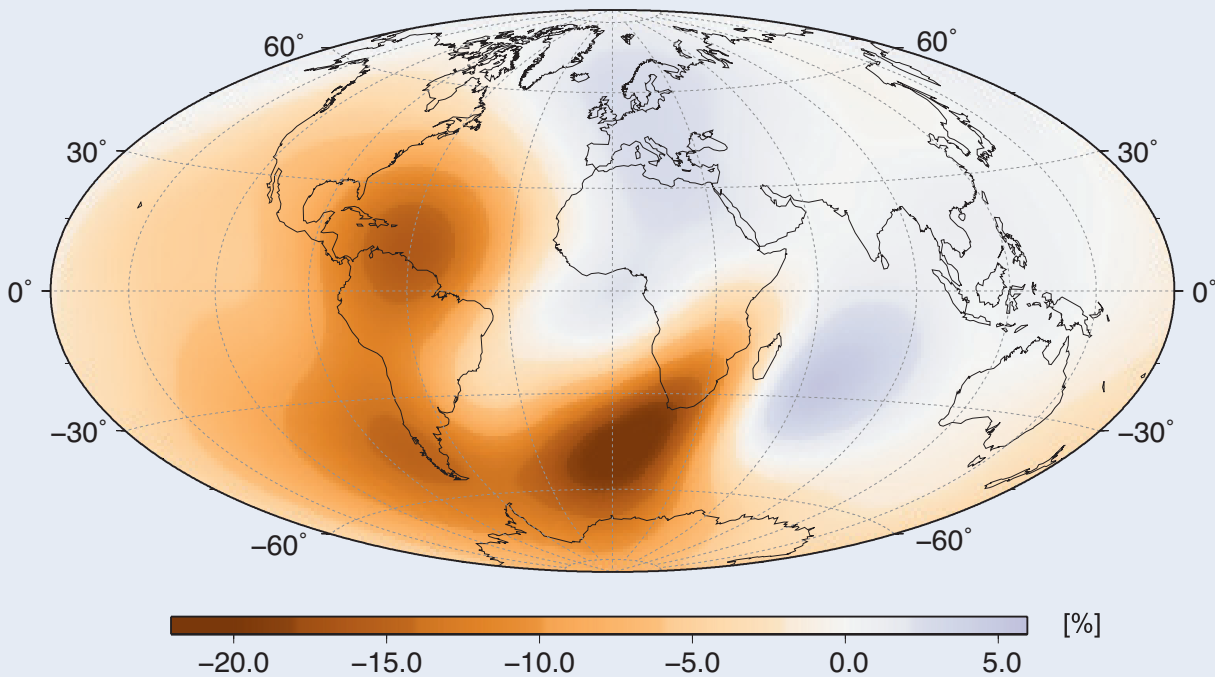


Abb. 2: Änderung der Magnetfeldstärke im Zeitraum 1957 bis 2008. Eine besonders starke Abnahme der Feldstärke um mehr als 20 % fand im Bereich des südlichen Atlantiks statt.

Fig. 2: Change of the magnetic field strength between 1957 and 2008. The largest decrease of 20 % is observed in the South Atlantic region and is known as the South Atlantic Anomaly.

felds, die letzte vor 780 000 Jahren. Im Durchschnitt fand in den letzten 80 Mio. Jahren etwa alle 500 000 Jahre eine Umpolung statt. Daraus zu schließen, dass die nächste Umkehrung schon überfällig ist, wäre jedoch zu einfach. Die Dauer einzelner Polaritätsintervalle ist sehr unterschiedlich: Während die kürzesten nur einige zehntausend Jahre anhielten, dauerte das längste über fünf Mio. Jahre. In der Kreidezeit, vor etwa 120 bis 80 Mio. Jahren, war das Feld nach heutigem Wissensstand sogar dauerhaft in der derzeitigen Polaritätsrichtung stabil. Dieser Zeitraum wird als „Cretaceous Normal Superchron“ bezeichnet.

Zurzeit beobachten wir mehrere Regionen mit entgegengesetztem magnetischem Fluss, wobei die größte im Bereich des südlichen Atlantiks liegt (Abb. 1). Zudem beschleunigt sich aktuell die Wanderung des nördlichen Magnetpols. Inwieweit diese Phänomene mit der Umpolung des Magnetfelds zusammenhängen, ist Teil der Forschungsarbeiten am Deutschen GeoForschungszentrum GFZ.

Modelle des Erdmagnetfelds

Die Entwicklung globaler Modelle des Erdmagnetfelds am GFZ liefert wichtige Beiträge zu den Erkenntnissen über das Erdmagnetfeld (siehe z. B. Lesur et al. 2008, 2010; Wardinski und Lesur, 2012; Korte et al., 2010). Diese Modelle basieren auf Daten geomagnetischer Satellitenmissionen und Observatorien und beschreiben das Erdmagnetfeld der letzten Dekade sowie der letzten 50 Jahre. Für längere Zeiträume beruhen die Modelle auf paläomagnetischen und historischen Messungen und geben eine Beschreibung des Erdmagnetfelds der letzten zehntausend Jahre. Diese Modelle dienen unter anderem der Datierung von Klimazeitreihen und der Charakterisierung der Ionisierung der Atmosphäre im Holozän (vgl. Artikel von Korte und Frank sowie Nowaczyk et al. in „GFZ-Journal System Erde“ (2012) Heft 1, online: <http://systemerde.gfz-potsdam.de>). Die globalen Modelle bieten zudem einen einzigartigen Zugang zu den dynamischen Prozessen im flüssigen Außenkern der Erde und den Wechselwirkungen zwischen Erdkern und -mantel. Diese Prozesse laufen auf unterschiedlichen Zeitskalen ab. Auf sehr langen Zeitskalen von einigen tausend Jahren können die Variationsmuster des

Magnetfelds mit dem thermischen Einfluss des Erdmantels auf den Erdkern erklärt werden. Dieser Einfluss lässt sich auf kürzeren Zeitskalen nicht zweifelsfrei ableiten.

Die Modelle, die das Erdmagnetfeld anhand der Beobachtungen der letzten 50 Jahre beschreiben, weisen eine eindeutige Dominanz der Dipolfeldstärke auf. Sie hat aber in diesem Zeitraum etwa 20 % ihrer Stärke verloren (Abb. 2). Ob es sich dabei um eine regelmäßige Fluktuation handelt oder um ein erstes Anzeichen einer Polumkehrung, ist noch unklar. An der Kernoberfläche beobachtet man Strukturen in der Morphologie des Magnetfelds, die auf einen solchen Umpolungsprozess hindeuten könnten. Bei diesen Strukturen handelt es sich um große Gebiete, in denen der magnetische Fluss eine umgekehrte Polarität besitzt, als in deren Umgebung. Diese treten in der Nähe des Nordpols auf, aber auch auf der südlichen Hemisphäre, unterhalb des Südatlantiks (Abb. 1).

In direktem Zusammenhang mit dieser anomalen Konfiguration des Magnetfelds an der Kernoberfläche steht die sogenannte South Atlantic Anomaly (SAA), welche auch als „Bermuda-Dreieck“ der erdnahen Satelliten bekannt ist. Dort kommt es in Zeiten erhöhter solarer Aktivität zu einem erhöhten Eintrag von hochenergetischen Teilchen in die obere Atmosphäre. Bildlich gesprochen ist diese Region eine mit hochenergetischen Teilchen gefüllte Senke. Auf dem Weg durch die SAA kommt es an Bord der Satelliten zu Überspannungen und Fehlfunktionen. Zudem erleiden betriebswichtige elektronische Teile

eine starke Verwitterung. Die genaue Kenntnis der Lage dieser Anomalie und die Beobachtung der solaren Aktivität sind daher von volkswirtschaftlichem Interesse. Denn so können Vorkehrungsmaßnahmen getroffen und damit die Lebenszeit der Satelliten verlängert werden.

Geomagnetische Jerks

Bei den kurzzeitigen Änderungen des Erdmagnetfelds spielen die sogenannten geomagnetischen Jerks eine besondere Rolle. Diese abrupten Änderungen der Säkularvariation (erste zeitliche Ableitung des Magnetfelds) werden weltweit in geomagnetischen Observatorien beobachtet. Als Beispiel wird hier die Beobachtung der Säkularvariation am geomagnetischen Observatorium des GFZ in Niemegek vorgestellt (Abb. 3), wo mehrere dieser Ereignisse mit unterschiedlicher Intensität gemessen wurden. Im Jahr 1969 trat einer der stärksten geomagnetischen Jerks auf, ein weiteres Ereignis ist der Jerk von 2003, der erstmals in geomagnetischen Satellitendaten nachgewiesen wurde (Olsen und Manda, 2008).

Die Ursache dieser Ereignisse sind Prozesse im Erdkern. Um sowohl die kurzzeitigen (Jerks) als auch die langfristigen Variationen (Polumkehrungen) des Erdmagnetfelds verstehen zu können, werden numerische Modelle des Geodynamos entwickelt, die auf der Physik der wirkenden Kräfte und der resultierenden Bewegungen beruhen. Die Dynamik wird mit

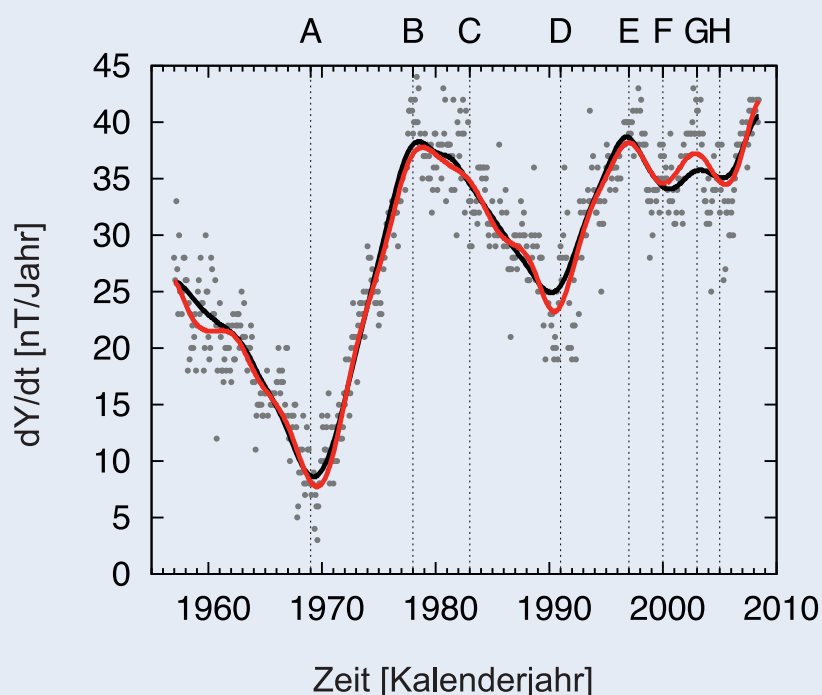


Abb. 3: Vergleich der am Geomagnetischen Observatorium des GFZ in Niemegek gemessenen geomagnetischen Säkularvariation der Ost-Komponente Y (graue Punkte) mit zwei Modellkurven (rot und schwarz). Die vertikalen gestrichelten Linien markieren das Auftreten von geomagnetischen Jerks (A bis H). Die Modellkurven basieren auf unterschiedlichen Annahmen; rot: die zeitliche Variabilität der Säkularvariation ist im Wesentlichen glatt und die Morphologie des Felds einfach; schwarz: die Säkularvariation entsteht durch die Advektion des Magnetfelds und es wird keine magnetische Diffusion beobachtet.

Fig. 3: Comparison between the observed (gray dots) and the modelled secular variation of the East-component (dY/dt) in Niemegek. The vertical lines, marked with the characters A to H, indicate occurrence times of geomagnetic jerks.

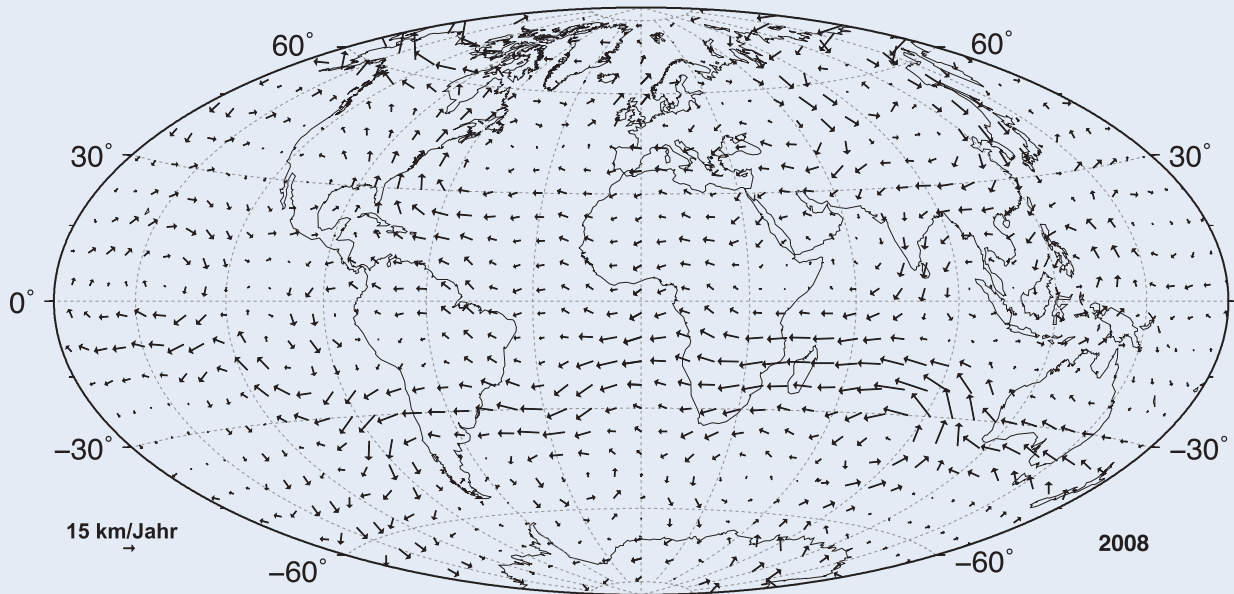


Abb. 4: Fluidbewegung an der Kernoberfläche. Man erkennt eine starke westwärts gerichtete Bewegung im Bereich zwischen Indischem Ozean und Südatlantik.

Fig. 4: Map of the core surface flow at the epoch 2008. The strongest motion occurs in the region under the Indian ocean and the South Atlantic.

der Navier-Stokes-Gleichung beschrieben, welche zusätzlich noch einen Term der Lorentz-Kraft enthält, um die magnetische Wechselwirkung im flüssigen Außenkern (Fluid) zu beschreiben. Ähnlich wie in der Meteorologie und der Klimamodellierung ist das Zusammenspiel dieser Kräfte hochgradig komplex. Es erfordert hohe Rechnerleistungen, um eine genaue Modellierung der Dynamik und deren Abhängigkeit von den magnetischen, elektrischen und stofflichen Eigenschaften des Kernmaterials zu erreichen.

Obwohl die Entwicklung des Systems chaotisch ist, wird die Dynamik im Außenkern durch die schnelle Rotation der Erde dominiert. Die Erdrotation impliziert die Dominanz der Corioliskraft. Hieraus ergibt sich eine Reihe von Vereinfachungen bei der Beschreibung der Dynamik. Eine mögliche Annahme geht von einem Kräftegleichgewicht zwischen Corioliskraft und Druckgradientkraft aus. Vergleichbar mit der Meteorologie bezeichnet man dies als geostrophische Annahme. Mit Hilfe dieser Annahme kann man nun anhand von Beobachtungen des Erdmagnetfelds an der Erdoberfläche Rückschlüsse auf die Fluidbewegung an der Kernoberfläche ziehen. Prinzipiell ist die beobachtete Änderung des Magnetfelds die Folge zweier Prozesse, Diffusion und Advektion. Bei der magnetischen Diffusion sickert die magnetische Energie durch die Erdkernoberfläche in den Erdmantel, bei der Advektion wird die Morphologie des Erdmagnetfelds an der Kern-Mantel-Grenze durch die Fluidbewegung verändert. Die Überlagerung beider Prozesse resultiert in einer zeitlichen Änderung des Erdmagnetfelds. Dabei sind die Zeitskalen der Prozesse unterschiedlich: Diffusionsprozesse agieren auf einer rund 300-fach län-

geren Zeitskala als die Advektion. Die magnetische Diffusion ist daher bei der Untersuchung der Prozesse im Aussenkern vernachlässigbar. Unter Verwendung der diffusionslosen Induktionsgleichung, bei der die Änderung des Magnetfelds durch die Advektion des Magnetfelds beschrieben wird, ergibt sich ein Modell der Fluidbewegung im äußeren Kern. In Abb. 4 ist die geostrophische Fluidbewegung dargestellt.

Zeitliche Änderungen in der Fluidbewegung wirken sich nicht nur als zeitliche Änderungen des Magnetfelds aus, auch andere Beobachtungsgrößen des Erdsystems zeigen Korrelationen zur Fluidbewegung. So variiert z. B. die Länge der Erdrotation. Diese Variation kann lunaren, ozeanischen und atmosphärischen Beiträgen zugeordnet werden. Nach dem Entfernen dieser Anteile, die zu einer Beschleunigung bzw. Abbremsung der Erdrotation führen, zeigt die restliche Variation eindeutige Zusammenhänge mit der Säkularvariation des Magnetfelds und den Änderungen der Fluidbewegung im Außenkern. Wardinski et al. (2008) konnten diesen Zusammenhang zwischen dem geomagnetischen Jerk von 2003 und einer Änderung der Erdrotation nachweisen. So fluktuieren einige zonale Komponenten der Fluidbewegung beim Auftreten des Jerks gleichzeitig mit einer Änderung in der Erdrotation. Die Ursache der geomagnetischen Jerks ist aber noch nicht restlos verstanden.

Eine gängige Modellvorstellung geht davon aus, dass sich das Fluid im äußeren Erdkern unter Einfluss der Erdrotation in einer zylindrischen Symmetrie entlang der Rotationsachse bewegt. Es bilden sich dabei mehrere konzentrische Zylinder im Außenkern mit entgegengesetzter Bewegungsrichtung. Diese Symmetrie kennt man auch aus hydrodynamischen Experimenten.

Kleine Abweichungen von dieser Gleichgewichtsstellung der Zylinder parallel zur Rotationsachse führen zu einer entgegengesetzten Bewegungsrichtung in den Zylindern (Abb. 5). Ein Grund dafür könnte eine elektromagnetische Kopplung des äußersten Zylinders mit den untersten Schichten des Erdmantels sein. Diese führt zu einer Beschleunigung des äußeren Zylinders in deren Folge sich eine magnetische Rückholkraft aufbaut, die der Beschleunigung des Zylinders entgegenwirkt und seine Bewegung abbremst.

An einem bestimmten Punkt sind magnetische Rückholkraft und Kopplungskraft gleich, die Kopplung mit dem Erdmantel bricht zusammen und die magnetische Rückholkraft beschleunigt den Zylinder in Richtung der Ausgangsposition. Es kommt zu einem Überschwingen des Zylinders, dem eine erneute magnetische Rückholkraft (diesmal mit entgegengesetztem Vorzeichen) entgegenwirkt. Sind diese Schwingungen einmal angestoßen, setzen sie sich fort, die Bewegung erfolgt in zonaler Richtung (parallel zum Äquator). Man bezeichnet diese Schwingungen als torsionale Oszillationen, die auch ein Grund für geomagnetische Jerks sein können. Die theoretischen Vorhersagen der Schwingungsperioden betragen einige Jahrzehnte. Das ist aber zu lang, um das zeitliche Auftreten aller Jerks einheitlich zu erklären. Daher interpretieren neuere Ansätze diese Ereignisse als sogenannte Alfvén-Wellen – niederfrequente Welle in elektrisch leitenden Flüssigkeiten – im flüssigen Außenkern.

Eine aktuelle Studie, die sich auf die Auswertung hochpräziser Messungen des Erdschwerefelds mit dem Satelliten GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) stützt, weist darauf hin, dass geomagnetische Jerks mit Massenverlagerungen im Außenkern einhergehen (Mandea et al., 2012). Die Daten der vom GFZ geleiteten Satellitenmission GRACE zeigen im Bereich des äquatorialen Afrikas, des Indischen und des atlantischen Ozeans kurzzeitige Fluktuationen des Erdschwerefelds, die gleichzeitig mit den geomagnetischen Jerks auftreten. In diesem Bereich ist die Fluidbewegung an der Oberfläche des

Erdkerns am stärksten (Abb. 4). Es wird erwartet, dass die für das Jahr 2013 geplante Satellitenmission Swarm hierzu weitere wichtige Datensätze liefern wird.

Ausblick

In Deutschland laufen an den Universitäten in Göttingen und Münster sowie am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau aufwendige Computersimulationen des Geodynamos. Die permanente Verbesserung dieser Modelle in Verbindung mit der wachsenden Anzahl geo- und paläomagnetischer Daten kann eine solide Grundlage für Vorhersagen von Magnetfeldänderungen über einen Zeitraum von mehreren hundert Jahren schaffen. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert diese Arbeiten in dem für die Erforschung planetarer Magnetfelder eingerichteten Schwerpunktprogramm „Planetarer Magnetismus“ (Planet Mag, DFG-SPP 1488). Ein wesentlicher Aspekt dieses Programms ist die Schaffung von Synergien zwischen allen deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen, die sich mit dem Erdmagnetfeld beschäftigen. Das GFZ beteiligt sich unter anderem mit der Entwicklung von Ansätzen zur Vorhersage zukünftiger Magnetfeldvariationen. Dabei ist ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit die numerische Modellierung des Geodynamos und die Entwicklung globaler Modelle des Erdmagnetfelds basierend auf geomagnetischen Beobachtungen.

Literatur

- Korte, M., Constable, C., Donadini, F., Holme, R. (2011): Reconstructing the Holocene geomagnetic field. - *Earth and Planetary Science Letters*, 312, 3-4, 497-505, 10.1016/j.epsl.2011.10.031.
- Lesur, V., Wardinski, I., Rother, M., Mandea, M. (2008): GRIMM: the GFZ Reference Internal Magnetic Model based on vector satellite and observatory data. - *Geophysical Journal International*, 173, 2, 382-394, 10.1111/j.1365-246X.2008.03724.x.
- Lesur, V., Wardinski, I., Hamoudi, M., Rother, M. (2010): The second generation of the GFZ Reference Internal Magnetic Model: GRIMM-2. - *Earth Planets and Space*, 62, 10, 765-773, 10.5047/eps.2010.07.007.
- Mandea, M., Panet, I., Lesur, V., de Viron, O., Diament, M., Le Moué, J.-L. (2012 online first): Recent Changes of the Earth's core derived from satellite observations of magnetic and gravity fields. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 10.1073/pnas.1207346109.
- Nowaczyk, N. R., Arz, H. W., Frank, U., Kind, J., Plessen, B. (2012): Dynamics of the Laschamp geomagnetic excursion from Black Sea sediments. - *Earth and Planetary Science Letters*, 351-352, 54-69, 10.1016/j.epsl.2012.06.050.
- Olsen, N., Mandea, M. (2008): Rapidly changing flows in the Earth's core. - *Nature Geoscience*, 1, 6, 390-394, 10.1038/ngeo203.
- Wardinski, I., Holme, R., Asari, S., Mandea, M. (2008): The 2003 geomagnetic jerk and its relation to the core surface flows. - *Earth and Planetary Science Letters*, V 267, 468-481, 10.1016/j.epsl.2007.12.008.
- Wardinski, I., Lesur, V. (2012): An extended version of the C₃FM geomagnetic field model: application of a continuous frozen-flux constraint. - *Geophysical Journal International*, 189, 3, 1409-1429, 10.1111/j.1365-246X.2012.05384.x.

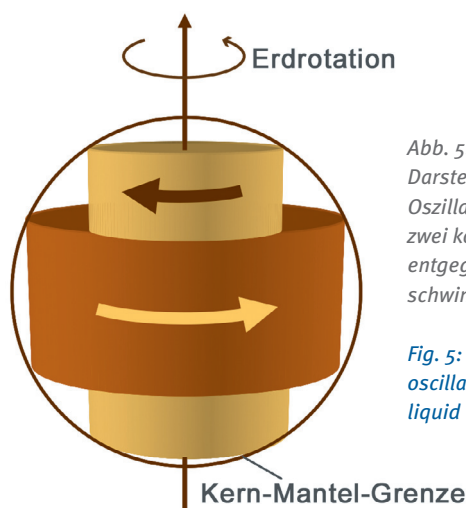


Abb. 5: Schematische Darstellung torsionaler Oszillationen, bei denen zwei koaxiale Zylinder in entgegengesetzter Richtung schwingen

Fig. 5: Sketch of torsional oscillations occurring in the liquid outer core

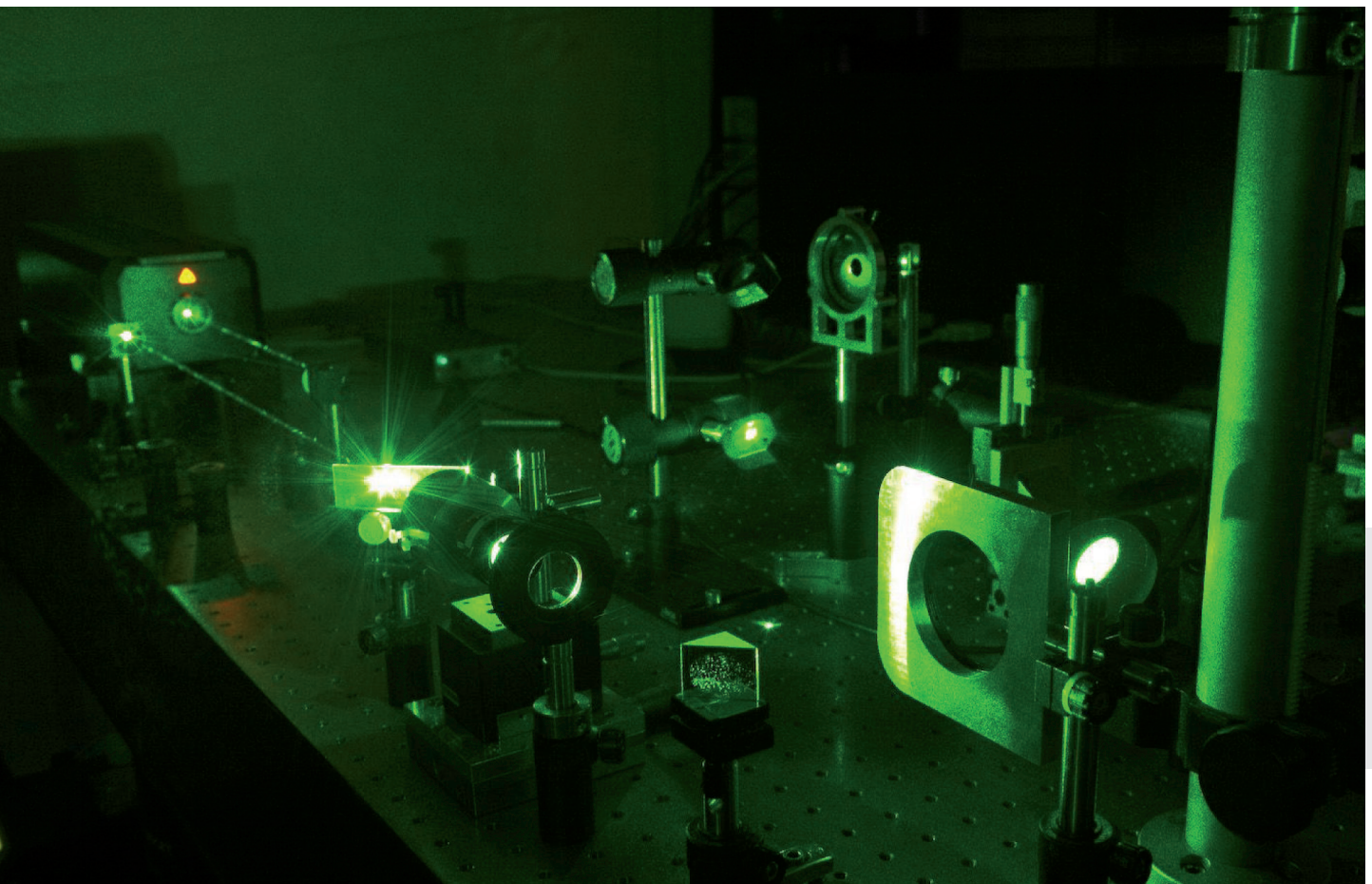
Die tiefe Erde im Labor

*Sergio Speziale, Hans J. Reichmann, Hauke Marquardt
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

Seismological and other geophysical observations from the surface show that the internal structure of our planet consists of concentric layers: the crust (on which we live), the mantle and a metallic core. However, even the deepest drill holes can access less than 1 percent of the Earth depth for chemical/physical measurements or sampling. A multidisciplinary approach combining geophysics, geochemistry, petrology and geodynamic modeling is required in order learn more about the deep Earth.

Mineral physics provides data at high pressure measured in the laboratory. High pressure measurements performed at the GFZ in the framework of an international cooperation showed that the spin transition of divalent iron in ferropericlase (Mg,Fe)O has a major effect on the elastic properties at conditions existing in the lower mantle. This spin transition of (Mg,Fe)O is caused by a pressure induced spin pairing of the 3d electrons between 40 and 60 GPa. The measurements showed that the bulk modulus and the density of ferropericlase increase by several percent at this pressure regime. Moreover, the shear wave velocity anisotropy increases by about 60 % in the same pressure range. These results suggest that the anisotropy in lowermost mantle is caused by the texture of the ferropericlase rather than by perovskite that is about four times more abundant.

Additional new experiments performed on a synthetic mantle rock at the synchrotron light source PETRA III (DESY, Hamburg) have the potential to reveal the development of texture in rocks subject to the extreme pressures and temperatures conditions present in the very deep mantle of the Earth.



Der Aufbau der Erde lässt sich vereinfacht durch ein sogenanntes Schalenmodell beschreiben (Abb. 1). Auf die oberste Schicht – die Kruste – folgen der obere und untere Mantel. Daran schließen sich der flüssige äußere und der feste innere Erdkern an. Ein direkter Einblick in Aufbau und Struktur des Erdinnern ist nur sehr begrenzt möglich. Auf der Halbinsel Kola, Russland, befindet sich das tiefste Loch, das jemals in die Erdkruste gebohrt wurde. Es ist rund 12 km tief, ungefähr ein 500stel des Erddurchmessers. Eine direkte Probenentnahme von Gesteinen des tiefen Erdinnern ist nur in Aufschlüssen der tiefen Lithosphäre, die einer Orogenese (Gebirgsbildung) ausgesetzt war, bei Mantelxenolithen, die durch vulkanische Aktivitäten an die Oberfläche transportiert wurden und bei relativ seltenen Einschlüssen in Diamanten, die ihren Ursprung im unteren Erdmantel haben können, möglich.

Die Bereiche der sogenannten Übergangszone (410 bis 660 km Tiefe) und des unteren Erdmantels (660 bis 2900 km Tiefe) sind besonders wichtig für das Verständnis der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und der Dynamik unseres Planeten. Die effizienteste Möglichkeit, Informationen über die Zusammensetzung des Erdinnern zu erhalten, sind Laborversuche. Dabei werden die physikalischen Eigenschaften der durch geo- und kosmochemische Befunde bekannten Mineralien unter Druck- und Temperaturbedingungen, wie sie im Erdinnern herrschen, bestimmt. Diese Ergebnisse werden dann mit den (gemittelten) Eigenschaften des Erdinnern, die aus geophysikalisch-seismologischen Messungen bekannt sind, verglichen.

Eine häufig verwendete Methode zur Bestimmung der Mineraleigenschaften bei den extremen Druck- und Temperaturbedingungen des unteren Erdmantels ist die Kombination von Diamanthochdruckzellen (DAC) mit spektroskopischen Methoden. Die Diamantzelle ist im Prinzip sehr einfach aufgebaut: Zwei natürliche oder künstliche Diamanten werden aufeinander gepresst (Abb. 2). Die „Spitzen“ der Diamanten haben einen Durchmesser von etwa 200 bis 500 μm . Mit dieser Anordnung können Drücke von über 1,5 Mbar bei einer Kraft von einigen Hundert Newton erreicht werden (zum Vergleich: an der Kern-Mantel-Grenze in 2900 km Tiefe herrscht ein Druck

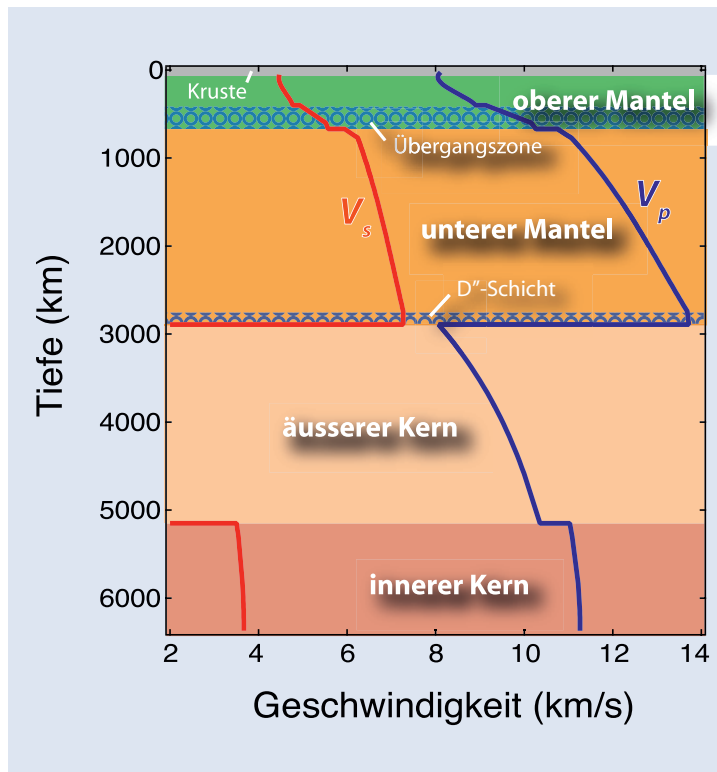


Abb. 1: Der Schalenbau der Erde. Die Übergänge zwischen den verschiedenen „Schalen“ sind durch abrupte Änderungen der seismischen Geschwindigkeiten V_p und V_s , sogenannte seismische Diskontinuitäten, gekennzeichnet.

Fig. 1: Layered structure of the Earth's interior. The transition between different "layers" is characterized by discrete changes in the seismic velocities V_p and V_s , referred to as seismic discontinuities.

von etwa 130 GPa = 1,3 Mbar). Die Probenkammer besteht aus einer zylindrischen Bohrung in einer Metall- oder Keramikscheibe, die zwischen den Diamanten liegt. Um einen (quasi) hydrostatischen Druck in der Probenkammer zu gewährleisten, wird die Bohrung mit einer druckübertragenden Flüssigkeit gefüllt. Die Probe in der Diamantzelle kann entweder durch einen Heizdraht oder mit einem Infrarot-Laser, der auf die Probe fokussiert ist, geheizt werden. Ein wichtiger Vorteil von Diamanten ist – neben der Härte und mechanischen Belastbarkeit – die geringe Absorption in einem weiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Die Diamantzelle kann deshalb bei Messungen im infraroten, sichtbaren, ultravioletten, Röntgen- und γ -Bereich genutzt werden, um den Effekt von Druck und Temperatur auf die Struktur, Dichte, elastischen Eigenschaften, elektronische Struktur und thermodynamische Stabilität von Geomaterialien zu untersuchen.

Links: Aufbau des Brillouin-Messstands am GFZ. Ein Laser der Wellenlänge 532 nm wird zur inelastischen Phononenstreuung genutzt. (Foto: H. Marquardt, GFZ)

Left: Brillouin scattering set up at the GFZ. A laser of wavelength 532 nm is utilized for the inelastic phonon scattering.



Kontakt: S. Speziale
(speziale@gfz-potsdam.de)

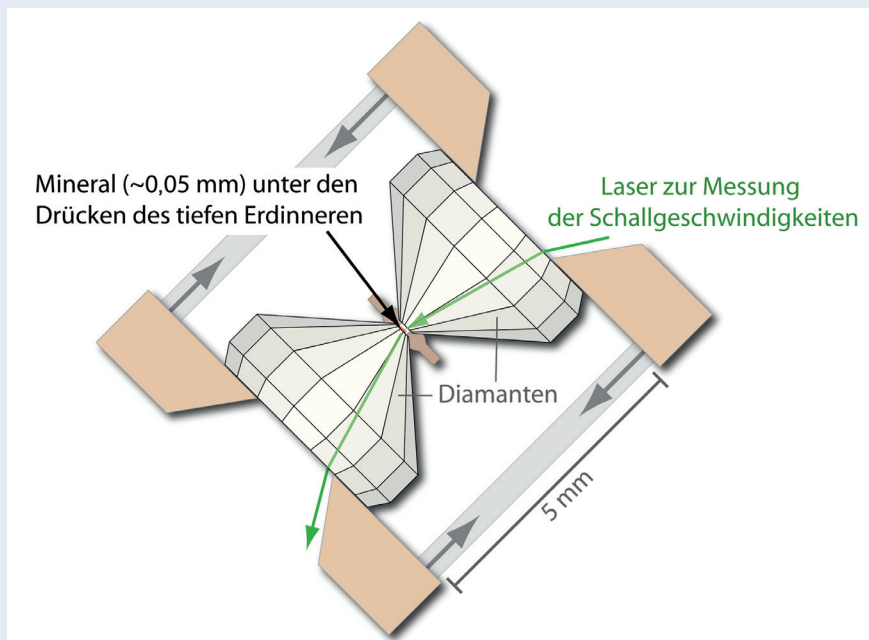
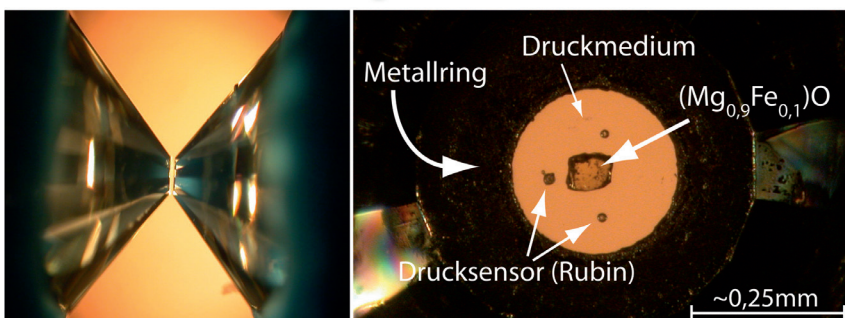


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau einer Diamant-hochdruckzelle. Zwischen zwei Diamanten wird ein Gasket (Rhenium-, Stahl- oder Keramikscheibe) gelegt. Die Bohrung in der Scheibe dient als Probenkammer. Die typischen Dimensionen der Bohrungen reichen von etwa 100 μm bis 250 μm im Durchmesser, die Größe der Probe ist etwa $50 \times 50 \times 20 \mu\text{m}^3$.

Fig. 2: Diagram of a diamond anvil cell. A gasket is located between two diamonds. A hole drilled in the gasket (diameter about 150 μm) is the sample chamber. The size of the sample is about $50 \times 50 \times 20 \mu\text{m}^3$.



Unterer Erdmantel und Spinübergang in Eisen

Synchrotron-Messungen

Ein Bereich von besonderem Interesse ist der unterste Teil des Erdmantels in 2500 bis 2900 km Tiefe. Seismische Beobachtungen sowie computertomographische Modelle deuten auf seismische Diskontinuitäten (horizontal reflektierende Schichten mit sprunghaften Änderungen der seismischen Impedanzen), laterale Heterogenitäten und seismische Anisotropien hin. Die momentan zur Verfügung stehende Datenmenge reicht jedoch noch nicht aus, um ein konsistentes Modell dieser Region des Erdmantels anzufertigen. Zudem werden einige Aspekte der seismischen Beobachtungen kontrovers diskutiert.

Eine Aufgabe der Mineralphysik ist es, wichtige Informationen über die physikalischen Eigenschaften von möglichen Gesteinskomponenten des Erdmantels zu liefern. Diese experimentell ermittelten Eigenschaften werden mit den geophysikalisch-seismologisch gemessenen Datensätzen verglichen. Aus dem Vergleich der Ergebnisse dieser Messungen kön-

nen dann z.B. Rückschlüsse auf die chemisch-mineralogische Zusammensetzung oder mögliche Phasenumwandlungen (und der dadurch bedingten Änderungen der seismischen Geschwindigkeiten) der beteiligten Minerale gewonnen werden. Als Beispiel sei hier die Entdeckung des strukturellen Phasenübergangs von Mg-reichem silikatischem Perovskit $(\text{Mg,Fe})(\text{Al,Si})\text{O}_3$ zu Postperovskit (Mao et al., 2006; Murakami et al., 2004) erwähnt. Dieser Phasenübergang erklärt eine Vielzahl von Beobachtungen, wie etwa die ausgeprägte seismische Diskontinuität der Scherwellen etwa 200 km über der Kern-Mantel-Grenze.

Kürzlich richtete sich die Aufmerksamkeit der Forschung auf den gerade entdeckten Druck-induzierten Spinübergang von Fe^{2+} (Badro et al., 2003). Eisen ist in den beiden wichtigsten Mineralen des unteren Erdmantels enthalten: im Silikat-Perovskit bzw. Postperovskit sowie in der Mg-reichen Oxidphase Ferroperiklas $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ (Lin et al., 2007; Marquardt et al., 2009b; Speziale et al., 2007). Der elektronische Übergang wird durch eine „Umgruppierung“ der sogenannten 3d-Elektronen des

Eisens von der High-spin (HS) zur Low-spin (LS)-Konfiguration verursacht (Abb. 3). Diese äußeren Elektronen sind an der chemischen Bindung beteiligt. Die Umgruppierung hat Konsequenzen auf die lokale Struktur des Festkörpers (Bindungslänge) und indirekten Effekt auf andere Volumeneigenschaften des Wirtminerals, wie etwa die Dichte oder den Kompressionsmodul, ein Maß für die Volumenänderung bei hydrostatischem Druck.

Im Rahmen einer internationalen Kooperation wurde am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ zunächst der Effekt des Spin-Übergangs von Fe^{2+} auf die Dichte und Inkompressibilität von Ferropervskit untersucht. Das Mineral wird dabei Drücken äquivalent denen im unteren Erdmantel ausgesetzt, wo $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ nach Mg-Perovskit vermutlich das zweithäufigste Mineral ist. Zunächst wurde gemeinsam mit Wissenschaftlern aus den USA der Effekt des „Spinpairing“ auf die Dichte von Ferropervskit mit den Zusammensetzungen $(\text{Mg}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})\text{O}$, die nahe an der vermuteten Zusammensetzung im unteren Mantel liegt, untersucht. Die Befunde bestätigten quantitativ eine Änderung der Druckabhängigkeit des Kompressionsmoduls, verursacht durch einen High-spin/Low-spin-Übergang der Elektronenkonfiguration des Fe^{2+} (Abb. 4). Durch die Änderung der elektronischen Konfiguration von Ferropervskit vergrößern sich die Dichte und die Inkompressibilität von LS-Ferropervskit um etwa 1,5 bis 2% bzw. 4 bis 6% im Vergleich zum HS-Ferropervskit.

Brillouin-Messungen in der Hochdruckzelle

Die sogenannte D“-Schicht etwa 200 km über der Kern-Mantel-Grenze (siehe Abb. 1) weist ausgeprägte seismische Anisotropien auf (z.B. Garnero et al., 2004). Diese sind durch unterschiedliche Geschwindigkeiten, insbesondere der Scher-

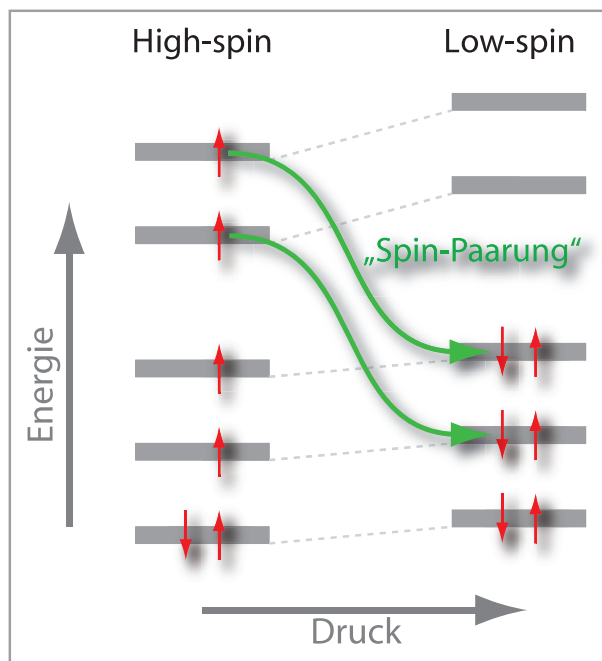


Abb. 3: Spin-Paarung der 3d-Elektronen im Eisenatom des Ferropervskits. Mit zunehmendem Druck wird es energetisch günstiger, zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin (illustriert durch rote Pfeile) in einem Orbital (graue Balken) zu paaren, als jedes Orbital mit Elektronen zu besetzen.

Fig. 3: Spin-pairing of the 3d-electrons in an iron atom in ferropervskite. At increased pressure, it becomes energetically favorable to pair two electrons with opposing spin (illustrated by red arrows) in one orbital (grey bars) instead of distributing the electrons among all orbitals.

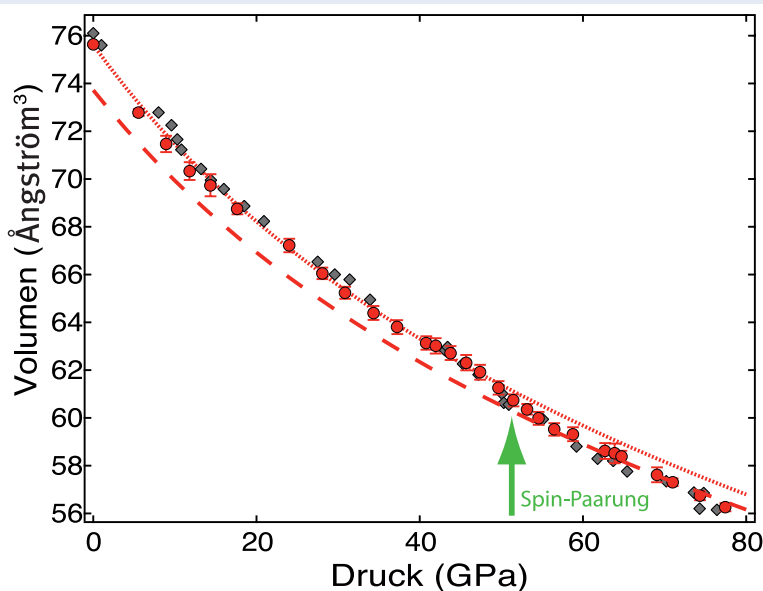


Abb. 4: Isotherme Kompression von $(\text{Mg}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})\text{O}$ (Marquardt et al., 2009a). Die roten Punkte zeigen die experimentellen Ergebnisse, die gestrichelte Linie repräsentiert die Extrapolation der Hochdruckergebnisse zu niedrigen Drücken, die gepunktete Linie die Extrapolation der Ergebnisse bei niedrigen Drücken zu hohen Drücken. Deutlich sichtbar ist die Änderung des Kompressionsverhaltens im Bereich des Spin-Übergangs zwischen 40 und 60 GPa.

Fig. 4: Isothermal compression of $(\text{Mg}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})\text{O}$. The red circles represent our experimental data, the red dotted and dashed lines represent the best fit to the data of the HS and LS phase, respectively. The change of compression behavior is clearly visible between 40 and 60 GPa.

wellen, in verschiedene Richtungen oder durch unterschiedliche Geschwindigkeiten verschiedener Polarisationen in der gleichen Richtung charakterisiert.

Um die Ursache dieser Anisotropie zu ermitteln, müssen – wie weiter oben schon erläutert – Labormessungen von akustischen (seismischen) Geschwindigkeiten mit seismischen Daten verglichen werden. Aus diesem Grund wurden Brillouin-Experimente an Ferroperiklas in einer Hochdruck-Diamantzelle durchgeführt. Brillouin-Messungen basieren auf einer inelastischen Streuung eines Laserstrahls an thermisch aktivierten Phononen der Probe. Aus der (geringen) Energiedifferenz der gestreuten und der ungestreuten Strahlung lassen sich

die akustischen Schallwellengeschwindigkeiten ermitteln. Für unsere Experimente setzten wir einen Einkristall-Ferroperiklas ($Mg_{0,9}Fe_{0,1}O$) Drücken bis zu 81 GPa aus (Marquardt et al., 2009a); dies entspricht einer Tiefe von 1600 km und stellt den höchsten Druck dar, der bisher bei Einkristall-Brillouin-Messungen im Labor erreicht wurde. Wir beobachteten, dass der Spin-Übergang in Fe^{2+} die Anisotropie der Scherwellen deutlich in dem Druckbereich zwischen 40 und 60 GPa verstärkt (Abb. 5a). Dies ist der Bereich, in dem die Elektronenkonfiguration von der HS- zu LS-Konfiguration übergeht. Zudem konnten wir den Wert für die Druckabhängigkeit vom Kompressionsmodul eingrenzen und unsere experimentellen Werte auf die D'' -Region extrapolieren. Die dabei erzielten Ergebnisse legen

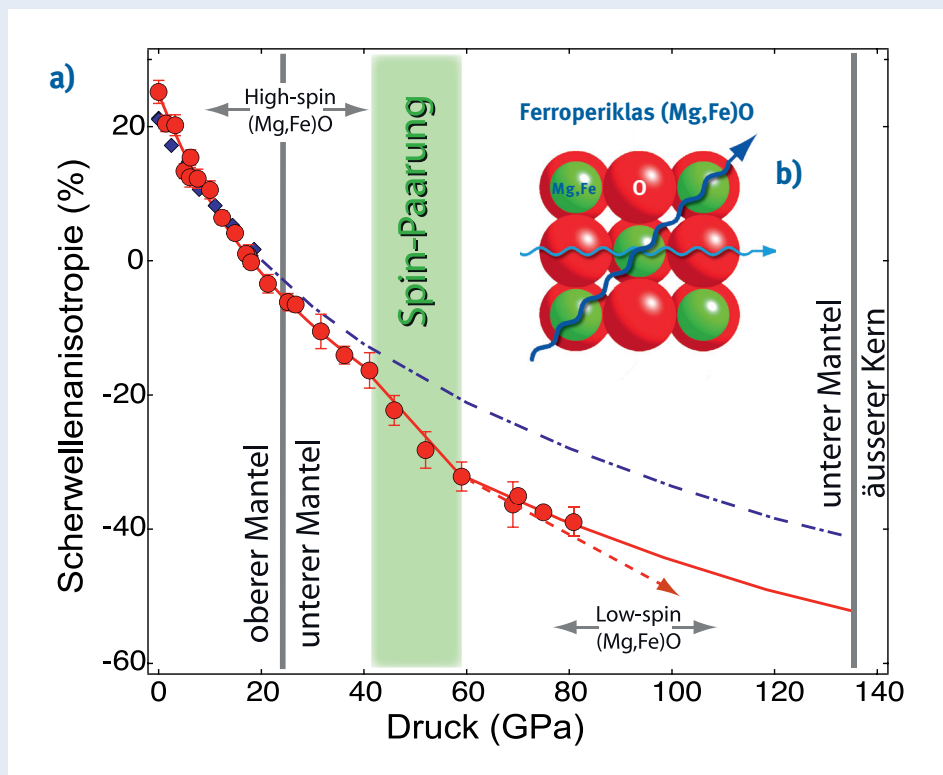


Abb. 5: a) Scherwellenanisotropie von $(Mg_{0,9}Fe_{0,1}O)$ als Funktion des Drucks (rote Punkte) (Marquardt et al., 2009b). Die Scherwellenanisotropie ist definiert als $(V_{s[001]} - V_{s[011]}) / [(V_{s[001]} + V_{s[011]}) / 2]$. Bei geringen Drücken ist die Anisotropie von $(Mg_{0,9}Fe_{0,1}O)$ etwa gleich dem von Periklas (MgO; blaue Rauten). Bei höheren Drücken ist Ferroperiklas elastisch anisotroper als MgO. Die blaue gestrichelt-gepunktete Linie repräsentiert die zu höheren Drücken extrapolierten Daten von MgO (Sinogeikin und Bass, 2000). Der gestrichelte Pfeil zeigt an, dass die Ableitung nach dem Druck für $(Mg_{0,9}Fe_{0,1}O)$ im unteren Mantel sogar größer als für MgO sein könnte. b) Die Struktur von Ferroperiklas kann man sich als Würfel vorstellen, der durch Sauerstoff (rot), Magnesium und Eisentome (beide grün) aufgebaut ist. Im unteren Erdmantel breiten sich die Scherwellen entlang der Seitendiagonalen schneller aus als entlang der Würfelkanten. Die opposite ist true at ambient conditions.

Fig. 5: a) Shear wave anisotropy of $(Mg_{0,9}Fe_{0,1}O)$ as a function of pressure (red circles). The shear wave anisotropy is defines as $(V_{s[001]} - V_{s[011]}) / [(V_{s[001]} + V_{s[011]}) / 2]$. At low pressure the anisotropy of $(Mg_{0,9}Fe_{0,1}O)$ is similar to that of MgO (blue diamonds). At higher pressure ferropericlase is elastically more anisotropic than MgO. The blue dashed-dotted line is the extrapolation of MgO data to higher pressures. The dashed red arrow indicates, that the pressure derivative of the anisotropy of $(Mg_{0,9}Fe_{0,1}O)$ might be even larger than for MgO. b) The structure of ferropericlase can be illustrated as a cube, made up of oxygen (red), magnesium and iron (both green) atoms. At the depth of the lower mantle sound shear waves propagate much faster along the cube's face diagonal than parallel to the edge. The opposite is true at ambient conditions.

nahe, dass die elastische Anisotropie von Ferroperiklas mit Fe^{2+} in der LS-Konfiguration größer ist als diejenige der silikatischen Komponenten im untersten Bereich des Mantels. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen ist, dass die Textur der Gesteine durch eine ausgeprägte Vorzugsorientierung (= systematische parallele Anordnung bestimmter Kristallrichtungen) von $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ charakterisiert ist und so die ausgeprägte Anisotropie verursacht (siehe Abb. 5b).

DAC-Synchrotron Messungen in radialer Geometrie

Da die Vorzugsorientierungen der Kristalle mit großer Wahrscheinlichkeit eine bedeutende Rolle für die elastischen Eigenschaften des unteren Erdmantels spielen, ist es wichtig zu verstehen, wie es zu diesen Vorzugsorientierungen kommt. In den am GFZ durchgeführten Laborversuchen wurden daher die Deformations- und Texturmechanismen in Gesteinen analysiert. Hierzu wurden DAC-Synchrotron-Messungen von Vorzugsrichtungen in radialer Geometrie an polykristallinen Proben durchgeführt. Die Experimente wurden in Zusammenarbeit mit L. Miyagi (Yale University, U.S.A.) und mit H.-P. Liermann (PETRA III-Speicherring, DESY-HASYLAB, Hamburg) vorgenommen. Durch Weglassen eines Mediums zur Druckübertragung wurde der nötige Druckgradient in der Diamantzelle erzielt. Die resultierende Vorzugsorientierung der Kristallite in der DAC wurde untersucht, indem Röntgenbeugungsaufnahmen der Proben entlang des maximalen Drucks (also entlang der Diamantachse) und entlang des minimalen Drucks (senkrecht zur Diamantachse) gemacht wurden. Zusätzlich zur direkten Beobachtung mittels Röntgenmessungen wurde das Mikrotextr-Verhältnis zwischen einzelnen Körnern von rückgewonnenen (dekomprimierten) Proben untersucht. Diese Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit R. Wirth und K. Marquardt an den Raster- und Transmissionselektronenmikroskopen des GFZ durchgeführt.

Die mit diesen Studien gewonnenen Ergebnisse erhärten die Hypothese, dass der Spin-Übergang von zweiwertigem Eisen *weder* die Anordnung *noch* die Stärke der Vorzugsrichtung von $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ ändert. Basierend auf diesen Ergebnissen kann ein mögliches Szenario der Vorzugsrichtung in einem synthetischen Gemisch von Ferroperiklas und Silikat-Perovskit, das einer möglichen mittleren Zusammensetzung des unteren Mantels entspricht, modelliert werden.

Ausblick

Die hier beschriebenen Messungen wurden bei hohen Drücken und Raumtemperatur durchgeführt. Da neben dem Druck auch die Temperatur einen Einfluss auf die elastischen Eigenschaften der Minerale und Gesteine hat, sind Brillouin-Messungen bei gleichzeitig hohen Drücken und Temperaturen geplant. Solche Hochdruck-Hochtemperatur-Brillouin-Experimente stellen eine besondere Herausforderung dar, weil diese Messungen in der Regel mehrere Stunden dauern und die Temperatur und der Druck in dieser Zeit konstant bleiben müssen. Aktuell werden experimentelle Aufbauten konzipiert und gebaut, um in naher Zukunft Hochdruck-Hochtemperatur-Brillouin-

Experimente von Einkristallen und polykristallinen Proben durchführen zu können. Mittels dieser In-situ-Messungen können zum einen die Auswirkungen der Temperatur auf den Druckbereich des Spin-Übergangs im Vergleich zu Messungen bei Raumtemperatur und zum anderen das Kompressionsverhalten und die Schallwellengeschwindigkeiten bei diesen extremen P-T-Bedingungen untersucht werden. Synchrotronmessungen in radialer Geometrie (mit beheizten Diamantzellen) ermöglichen zudem Aufschlüsse über die Texturbildung des Minerals. Nachfolgende TEM/SEM-Untersuchungen der dekomprimierten Probe am GFZ geben Einblicke in mögliche chemische Änderungen bei hohen Drücken und Temperaturen. Die Ergebnisse dieser kombinierten experimentellen und analytischen Methoden ermöglichen dann einen besseren Vergleich mit seismischen Datensätzen und darüber hinaus ein verfeinertes Modell der Dynamik und der Petrologie des untersten Teils des Erdmantels.

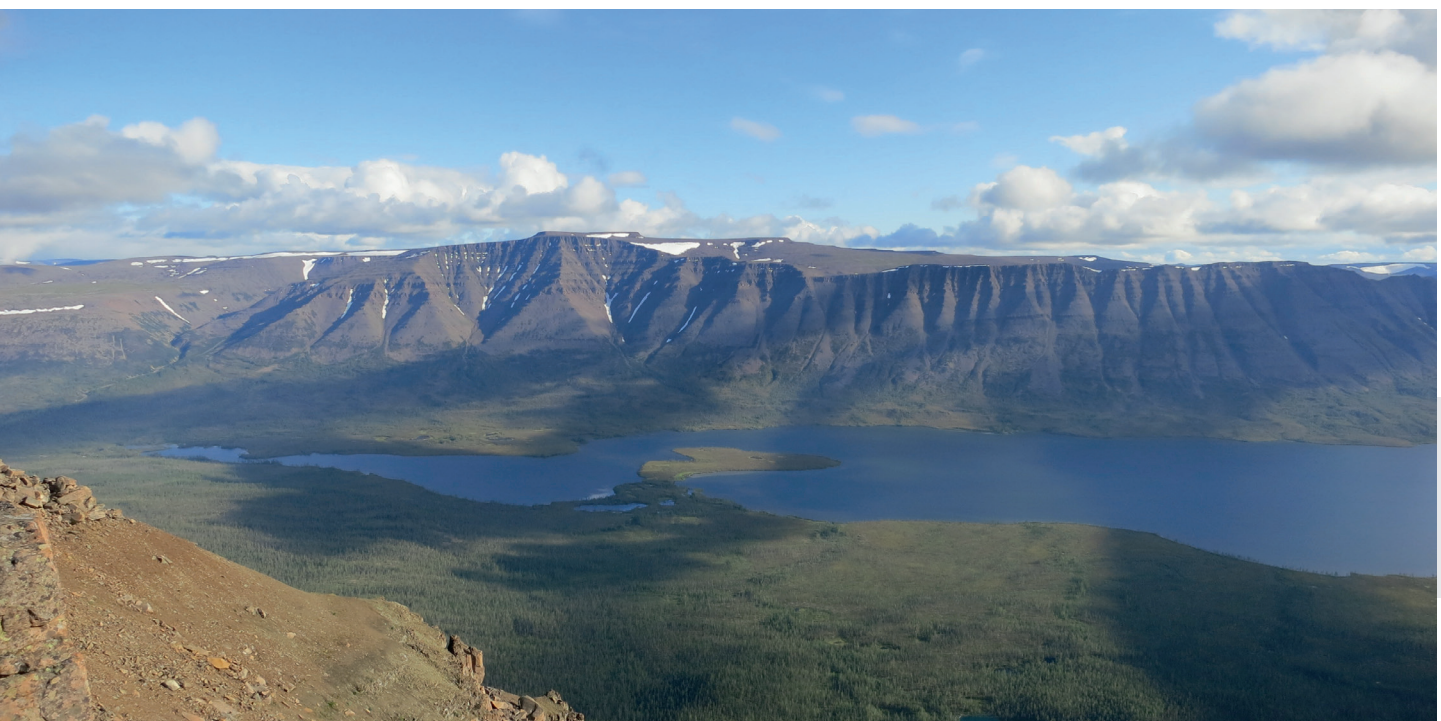
Literatur

- Badro, J., Fiquet, G., Guyot, F., Rueff, J.-P., Struzhkin, V. V., Vankó, G., Monaco, G. (2003): Iron partitioning in Earth's mantle: Toward a deeper lower mantle discontinuity. - *Science*, 300, 5620, 789-791, 10.1126/science.1081311.
- Garnero, E. J., Maupin, V., Lay, T., Fouch, M. J. (2004): Variable Azimuthal Anisotropy in Earth's Lowermost Mantle. - *Science*, 306, 5694, 259-261, 10.1126/science.1103411.
- Lin, J. F., Vankó, G., Jacobsen, S. D., Iota, V., Struzhkin, V. V., Prakapenka, V. B., Kuznetsov, A. Y., Yoo, C.-S. (2007): Spin transition zone in Earth's lower mantle. - *Science*, 317, 5845, 1740-1743, 10.1126/science.1144997.
- Mao, W. L., Mao, H.-K., Sturhahn, W., Zhao, J., Prakapenka, V. B., Meng, Y., Shu, J., Fei, Y., Hemley, R. J. (2006): Iron-rich post-perovskite and the origin of ultralow velocity zones. - *Science*, 312, 5773, 564-565, 10.1126/science.1123442.
- Marquardt, H., Speziale, S., Reichmann, H. J., Frost, D. J., Schilling, F. R. (2009): Single-crystal elasticity of $(\text{Mg}_{0.9}\text{Fe}_{0.1})\text{O}$ to 81 GPa. - *Earth and Planetary Science Letters*, 287, 3-4, 345-352, 10.1016/j.epsl.2009.08.017.
- Marquardt, H., Speziale, S., Reichmann, H. J., Frost, D. J., Schilling, F. R., Garnero, E. J. (2009): Elastic Shear Anisotropy of Ferropericlase in Earth's Lower Mantle. - *Science*, 324, 5924, 224-226, 10.1126/science.1169365.
- Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., Sata, N., Ohishi, Y. (2004): Post-perovskite phase transition in MgSiO_3 . - *Science*, 304, 5672, 855-858, 10.1126/science.1095932.
- Sinogeikin, S. V., Bass, J. D. (2000): Single-crystal elasticity of pyrope and MgO to 20 GPa by Brillouin scattering in the diamond cell. - *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 120, 1-2, 43-62, 10.1016/S0031-9201(00)00143-6.
- Speziale, S., Lee, V. E., Clark, S. M., Lin, J. F., Pasternak, M. P., Jeanloz, R. (2007): Effects of Fe spin transition on the elasticity of $(\text{Mg, Fe})\text{O}$ magnesiowüstites and implications for the seismological properties of the Earth's lower mantle. - *Journal of Geophysical Research*, 112, B10212, 10.1029/2006JB004730.
- Speziale, S., Milner, A., Lee, V. E., Clark, S. M., Pasternak, M. P., Jeanloz, R. (2005): Iron spin transition in Earth's mantle. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 102, 50, 17918-17922, 10.1073/pnas.0508919102.

Geodynamische Modellierung: Zusammenhänge zwischen Struktur der tiefen Erde, Vulkanismus und Umweltkatastrophen

Stephan Sobolev und Bernhard Steinberger
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Processes near the Earth's surface are linked to the deep mantle and core. From plate reconstructions, we can infer where slabs have been subducted through geologic time and the distribution of slabs throughout the mantle, which can be compared with seismic tomographic images. When slabs approach the core-mantle boundary (CMB), they push the thermal boundary layer ahead, leading to large lateral variations in heat flux from the core to the mantle: Beneath regions of subduction, we compute heat flux of several hundred mW/m^2 , whereas in areas where hot material has resided for long times, it is $< 10 \text{ mW}/\text{m}^2$. CMB heat flux likely influences the geodynamo, yet we are only beginning to understand such core-mantle processes. Seismology indicates there are large domes of geochemically distinct materials in the lowermost mantle which possibly represent old oceanic crust that was subducted during the billions of years of plate tectonics. Hot mantle plumes are mainly generated from the margins of lower mantle heterogeneities, where hot material pushed ahead of slabs is forced to rise. The largest and hottest plumes entrain a large amount (up to 20%) of the former oceanic crust and carry it to the base of the lithosphere. This material has lower melting temperature than "normal" peridotitic mantle and contains huge amounts of CO_2 , HCl and other components that are toxic for the environment. Mantle plumes rich in such material produce exceptional volume of melts and cause extreme pollution of the atmosphere and hydrosphere. This happened 252 Mln years ago, when millions of cubic km of lava were erupted in Siberia in the time of a few hundred thousand years or less. That led to the Permo-Triassic mass extinction, the largest environmental catastrophe in Earth history when more than 90% of all species on land and in the ocean became extinct.



Die Theorie der Kontinentaldrift wurde bereits vor etwa 100 Jahren von Alfred Wegener entwickelt. Seit der plattentektonischen Revolution, die vor etwa 50 Jahren begann, wird allgemein anerkannt, dass die Lithosphäre – die äußere Schicht der Erde – in Platten geteilt ist, die sich gegeneinander bewegen, an mittelozeanischen Rücken neu erzeugt werden und die an Subduktionszonen in das Erdinnere abtauchen. Plattentektonik wird allgemein als eine Auswirkung der Konvektion im Erdmantel angesehen, durch die Wärme vom Kern und Mantel zur Oberfläche abgeführt wird. Aber in welcher Form diese Konvektion vor sich geht, warum sie zu Plattentektonik führt und welcher Zusammenhang zwischen Mantelströmungen und Plattenbewegungen besteht, ist weit weniger bekannt und Gegenstand aktiver Forschungen.

Ein spezieller Aspekt von Mantelkonvektion sind sogenannte „Hotspots“. Dabei handelt es sich um relativ kleinräumige Regionen von Vulkanismus innerhalb tektonischer Platten, wie zum Beispiel die Inselgruppe Hawaii. Die Region mit aktivem Vulkanismus liegt dabei zumeist am Ende einer Vulkankette, wobei die Vulkangesteine mit zunehmendem Abstand von den aktiven Vulkanen immer älter werden. Seit den Arbeiten von Tuzo Wilson und Jason Morgan in den 1960er Jahren ist die verbreitete Erklärung für Hotspots, dass sich Lithosphärenplatten über fokussierte, annähernd stationäre Aufströmungen im Erdmantel – sogenannte Mantelplumes – hinwegbewegen. Das heiße Mantelmaterial schneidet sich durch die Lithosphäre und hinterlässt so auf der sich darüber hinwegbewegenden Platte eine Vulkankette.

Bevor der Hotspot-Vulkanismus einsetzt, der über mehr als 100 Mio. Jahre andauern kann, erzeugen Mantelplumes durch extrem ergiebigen Vulkanismus an der Erdoberfläche häufig sogenannte magmatische Großprovinzen („Large Igneous Provinces“, kurz LIP), in denen Millionen von Quadratkilometern bis zu 4 km dick mit Lavaströmen bedeckt sein können. Da sie in geologisch kurzen Zeitspannen – oft weniger als 1 Mio. Jahre – entstehen, können sie die Umwelt dramatisch beeinflussen (Wignall, 2001). Die Entstehung der größten kontinentalen magmatischen Großprovinz, der Sibirischen Flutbasalte (siehe Foto links) vor 252 Mio. Jahren, führte beispielsweise zum

Permo-Triassischen Massensterben, der größten Umweltkatastrophe in der phanerozoischen Erdgeschichte, bei der mehr als 90% aller Arten an Land und in den Ozeanen ausstarben. Die Verteilung von Mantelplumes und subduzierten Platten im unteren Erdmantel wiederum verursacht Variationen im Wärmestrom vom Kern in den Mantel. Der Zusammenhang von Plattentektonik, Subduktion, Erzeugung von Mantelplumes und Kern-Mantel-Wärmestrom, sowie der Ursprung magmatischer Großprovinzen und ihre Auswirkung auf die Umwelt werden gegenwärtig am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ erforscht.

Abtauchen tektonischer Platten in den unteren Erdmantel

Wenn sich zwei Platten aufeinander zu bewegen, sinkt in der Regel eine der Platten in den Erdmantel ab. Ausgehend von der Dicke der abtauchenden Platte (sog. „Slab“), der Konvergenzgeschwindigkeit und der Viskosität des Mantelmaterials kann die Abtauchgeschwindigkeit in einem geodynamischen Modell berechnet werden. Abb. 1 (links oben) zeigt das Ergebnis einer solchen Berechnung. Aufgrund der hohen Viskosität im unteren Mantel verringert sich dort die Abtauchgeschwindigkeit, und die Platte verdickt sich entsprechend. Ein Vergleich der berechneten thermischen Dichteanomalien mit beobachteten seismischen Geschwindigkeitsanomalien, die in Manteltomographiemodellen ermittelt werden (Abb.1, links Mitte und unten) ist sinnvoll, da seismische Geschwindigkeitsanomalien im mittleren Mantel vermutlich größtenteils durch Temperaturanomalien verursacht werden. Eine Anpassung der Parameter des geodynamischen Modells oder eine Modifikation der Lage der Subduktionszonen kann zu einer Verringerung der Unterschiede führen. Zwar unterscheiden sich auch die P- und S-Wellenmodelle voneinander, jedoch sind die Unterschiede zum geodynamischen Modell erheblich größer. Abb. 1 zeigt, dass das subduzierte Material im geodynamischen Modell vergleichsweise tief liegt: in diesem Modell sinken subduzierte Platten in etwa 100 Mio. Jahren bis in den untersten Mantel, während der Vergleich mit der Tomographie auf eine langsamere Absinkgeschwindigkeit hindeutet.

Ein Vergleich geodynamischer Modellergebnisse mit den auf seismischen Beobachtungen basierenden Tomographiemodellen kann also zu einem besseren Verständnis der Vorgänge sowohl im tiefen Erdmantel als auch in der Erdgeschichte führen. Ein wichtiges Ziel der geodynamischen Modellierung am GFZ ist daher eine bessere Übereinstimmung dieser Modelle zu erreichen.

Links: Basaltdecken im Putorana-Plateau, nördliches Sibirien
(Foto: S. Sobolev, GFZ)

Left: Flood basalt flows at Putorana plateau in North Siberia



Kontakt: S. Sobolev
(stephan@gfz-potsdam.de)

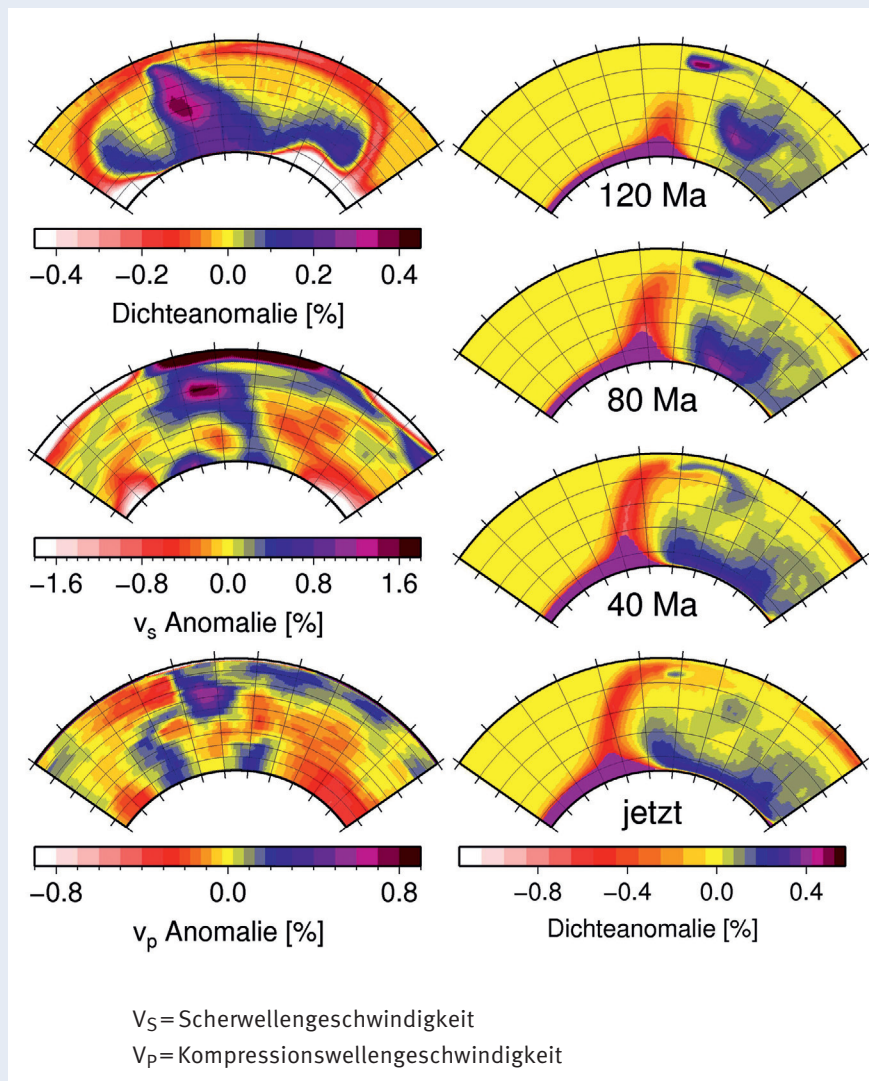


Abb. 1: Abtauchende tektonische Platten im Erdmantel und ihr Einfluss auf die Entstehung von Mantelplumes. Linke Reihe: Vergleich des geodynamischen Modells mit der Tomographie entlang eines Querschnitts unter Südamerika. Oben: Auf der Subduktionsgeschichte basierendes geodynamisches Modell. Mitte: Gemitteltes S-Wellen-Tomographiemodell (SMEAN-Modell, Becker und Boschi, 2002). Unten: P-Wellenmodell (Li et al., 2008). Rechte Reihe: Querschnitte durch den Nordpazifik zu drei verschiedenen Zeiten, um zu illustrieren, wie subduzierte „Slabs“ – abtauchende Lithosphärenplatten – (blau) einen Mantelplume (rot) am Rand eines thermochemischen Hügels (violett) unter dem Pazifik erzeugen, an einer Position ähnlich wie Hawaii. Die Positionen der Querschnitte werden in der unteren rechten Karte in Abb. 2 gezeigt (schwarze Kurven).

Fig. 1: Subducted slabs in the mantle, and how they trigger mantle plumes. Left row: a comparison between geodynamic and tomographic models along a cross section beneath South America. Top: Geodynamic model based on subduction history. Middle: S-wave mean tomography model (SMEAN model, Becker and Boschi, 2002). Bottom: P-wave model (Li et al., 2008). Right row: cross sections through the North Pacific at three different times, illustrating how subducted slabs (blue) generate a plume (red) at the margin of a thermo-chemical dome (violet) beneath the Pacific, at a location similar to Hawaii. Locations of cross sections are shown in the bottom right panel of Fig. 2 (black curves).

Erzeugung von Mantelplumes

Unsere Modellierungen beschäftigen sich auch mit der Frage, wo und wie Mantelplumes nahe der Kern-Mantel-Grenze erzeugt werden können und in welchem Zusammenhang sie mit Subduktionsvorgängen stehen. Auf der rechten Seite von Abb. 1 ist der von uns bevorzugte Mechanismus (Steinberger und Torsvik, 2012) illustriert: wenn subduzierte Platten zur Kern-Mantel-Grenze absinken, schieben sie heißes Material der thermischen Grenzschicht zum Kern vor sich her. Auf der Kern-Mantel-Grenze befinden sich vermutlich auch zwei „Hügel“ aus chemisch unterschiedlichem Material von mehreren 100 km Höhe, die in S-Wellen-Tomographiemodellen als Afrikanische und Pazifische „Large Low Shear wave Velocity

Provinces“ (LLSVPs) – d.h. große Bereiche niedriger S-Wellengeschwindigkeiten – zu sehen sind (Abb. 2, oben rechts). Diese sind zwar heiß, aber aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung so schwer, dass sie an der Kern-Mantel-Grenze bleiben. Wenn nun heißes und weniger dichtes „normales“ Mantelmaterial gegen einen dieser Hügel (in violett in Abb. 1, rechts) geschoben wird, bewegt es sich nicht weiter entlang der Kern-Mantel-Grenze, sondern beginnt aufzusteigen. Deshalb bilden sich bevorzugt an den steilen Rändern der beiden Hügel Aufströme durch den gesamten Erdmantel in der Form von Mantelplumes. Abb. 2, unten rechts, zeigt die berechnete Verteilung von Slabs, Plumes und thermochemischen Hügeln oder „Domes“. Der Mechanismus kann erklären, warum große Vulkanprovinzen, von denen man annimmt, dass

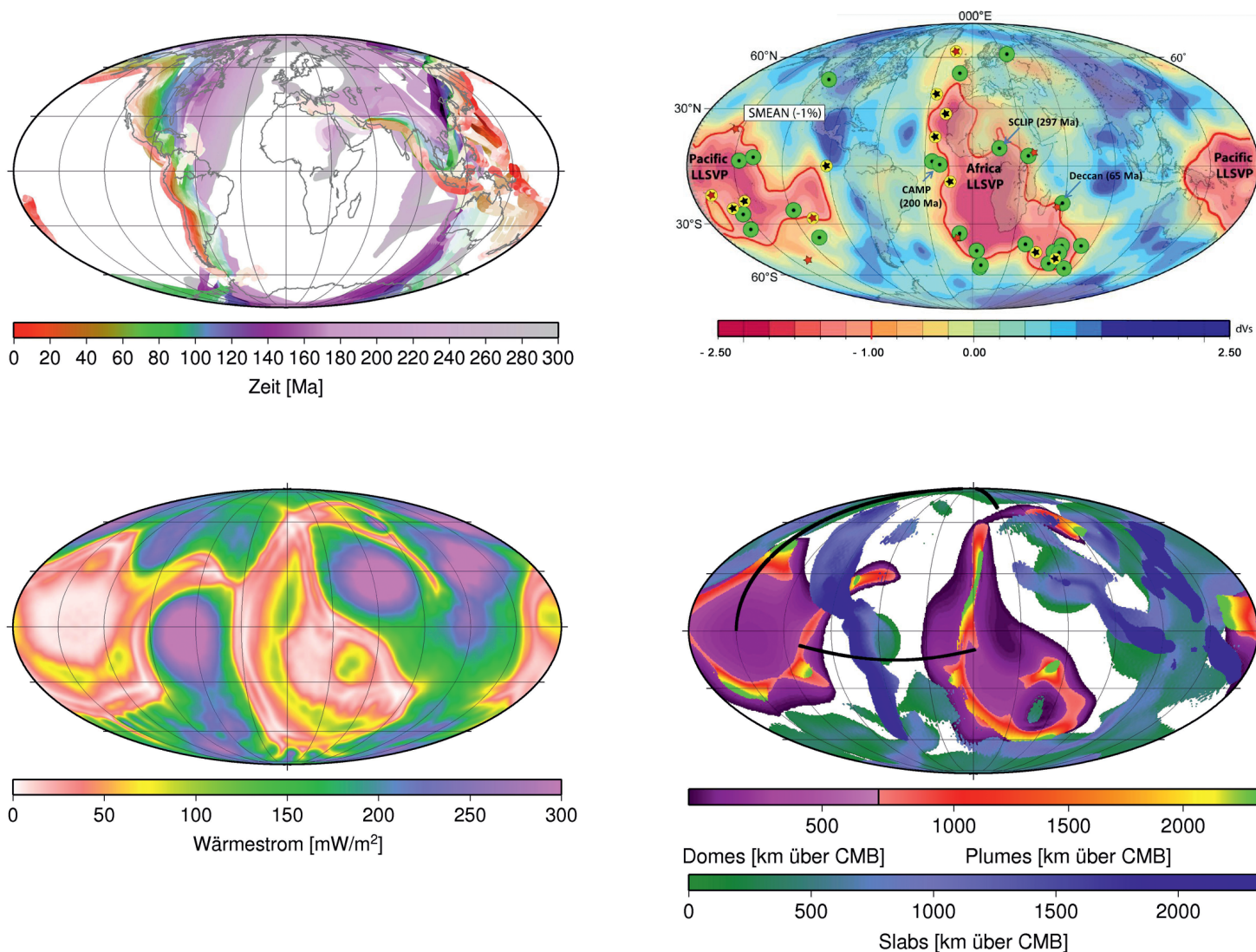


Abb. 2: Vergleich von Subduktionsgeschichte, Kern-Mantel-Wärmestrom, Lage von Mantelplumes und rekonstruierten magmatischen Großprovinzen. Oben links: Position von Subduktionszonen in der Vergangenheit (nach Steinberger und Torsvik, 2012). Unten links: Berechneter Wärmestrom an der Kern-Mantel-Grenze. Unten rechts: Berechnete Lage von Slabs, Plumes und thermochemischen Hügeln, sog. „Domes“. Slabs sind dort eingetragen, wo in einer Höhe (wie durch die Farbskala angegeben) über der Kern-Mantel-Grenze (CMB) die thermische Dichteanomalie $\geq 0,2\%$ oder mehr positiv ist, Plumes, wenn sie $\geq 0,25\%$ oder mehr negativ ist, und „Domes“ wenn die Dichteanomalie aufgrund der Zusammensetzung $\geq 1,15\%$ ist. Oben rechts (nach Torsvik et al., 2006): Hotspots mit wahrscheinlichem Ursprung im tiefen Erdmantel (Sterne) und rekonstruierte Lage der Eruption magmatischer Großprovinzen (grüne Kreise) zusammen mit S-Wellengeschwindigkeitsanomalien im untersten Erdmantel (SMEAN-Modell, Becker und Boschi, 2002)

Fig. 2: Comparison between subduction history, core-mantle heat flow, location of mantle plumes and reconstructed Large Igneous Provinces (LIPs). Top left: Past subduction zone locations (after Steinberger and Torsvik, 2012). Bottom left: Inferred heat flow at the CMB. Bottom right: Predicted locations of slabs, plumes and thermo-chemical piles. “Slabs” are plotted whenever at a depth indicated by the color scale positive thermal density anomalies exceed $+0.2\%$, and “plumes” when negative thermal anomalies exceed -0.25% , “domes” when compositional density anomalies exceed 1.15% . Top right (after Torsvik et al., 2006): Hotspots with likely deep mantle origin (stars), and reconstructed LIP eruption sites (green) plotted above S-wave velocity anomalies in the lowermost mantle (SMEAN model, Becker and Boschi, 2002)

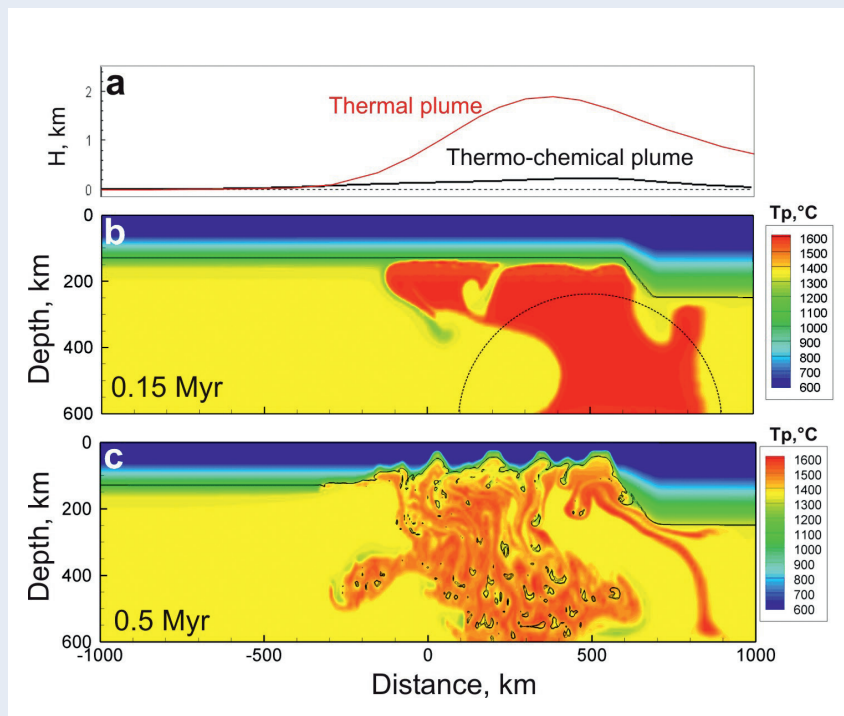


Abb. 3: a) Maximale Hebung (H) der Oberfläche vor Beginn des Magmatismus über einem sich ausbreitenden Mantelplume mit einer um 250°C erhöhten Temperatur. b), c) Temperaturverteilung ($^{\circ}\text{C}$) entlang von Querschnitten durch das Modell zu den Zeiten $0,15$ Myr (=Millionen Jahre) (b) und $0,5$ Myr (c). Nach Sobolev et al. (2011)

Fig. 3: a, Maximum pre-magmatic surface uplift (H) atop a spreading mantle plume with an excess temperature of 250°C . b, c, Temperature distributions ($^{\circ}\text{C}$) in the model cross-section at model times of 0.15 Myr (b) and 0.5 Myr (c). After Sobolev et al. (2011)

sie bei Ankunft eines Mantelplumes an der Oberfläche entstehen, anscheinend hauptsächlich über den Rändern der LLSVPs entstehen (Abb. 2, oben rechts), ebenso wie aktive Hotspots, für die ein Ursprung im tiefen Mantel vermutet wird.

Zahlreiche Fragen bleiben jedoch offen und werden in weiteren Forschungsarbeiten am GFZ behandelt. Abb. 2 zeigt, dass die LLSVPs (oben rechts) sich im Wesentlichen dort befinden, wo während der letzten 300 Mio. Jahre keine Platten subduziert wurden. Der Grund hierfür ist noch nicht bekannt. Es ist möglich, dass subduzierte Slabs die thermochemischen Hügel vor sich hergeschoben und in die jetzige Position gebracht haben. Andererseits könnten letztere auch aktiv die Mantelkonvektion beeinflusst haben, so dass Platten fast nur in anderen Regionen subduziert wurden.

Ebenfalls ungeklärt ist der Ursprung des dichten Materials, aus dem die LLSVPs bestehen. Eine mögliche Erklärung ist, dass es sich um frühere ozeanische Kruste handelt, die aufgrund von Plattentektonik über mehrere Milliarden Jahre in den unteren Mantel subduziert wurde. Hochdruckexperimente im Labor zeigen, dass dieses subduzierte Material fast überall im Mantel, mit Ausnahme der obersten 50 km, dichter ist, als „normaler“ peridotitischer Mantel. Deshalb wird angenommen, dass sich dieses Material im untersten Mantel ansammelt.

Einfluss von Prozessen im Mantel auf den Erdkern

Abb. 2, unten rechts, zeigt den berechneten Wärmestrom an der Kern-Mantel-Grenze: Dort, wo subduzierte Slabs in den untersten Mantel gesunken sind, ist der Wärmestrom um ein vielfaches höher als unter den thermochemischen Hügeln. Ebenso erhöht sich der Wärmestrom, wenn sich ein Plume von der Kern-Mantel-Grenze ablöst, aber – wie diskutiert – werden Plumes vermutlich ebenfalls von subduzierten Slabs verursacht, so dass die beiden Effekte nicht unabhängig voneinander sind. Neuere Modellierungen zur Erzeugung des Erdmagnetfelds im Kern deuten darauf hin, dass eine Erhöhung des Wärmestroms speziell in Äquatornähe zu einer häufigeren Umkehr des Erdmagnetfelds führen kann. Wenn sich also Subduktionszonen durchschnittlich näher am Äquator befinden, sollte dies – mit zeitlicher Verzögerung – zu häufigerer Feldumkehr führen. Ebenso sollten die Häufung großer Vulkanprovinzen in niedrigen geographischen Breiten mit häufigerer Feldumkehr – allerdings schon einige 10 Mio. Jahre vor deren Eruption – in Zusammenhang stehen. Ein wichtiger Prozess ist in diesem Zusammenhang die „echte Polwanderung“. Darunter versteht man eine Umorientierung des gesamten Erdmantels relativ zur Erdrotationsachse, die durch eine Umverteilung von Massenanomalien im Erdmantel – speziell absinkende Slabs und aufsteigende Plumes – verursacht wird und stets so erfolgt, dass das Trägheitsmoment relativ zur Rotationsachse maximiert wird. Diese echte Polwanderung kann vermutlich

Geschwindigkeiten bis zu 10 bis 20 cm/Jahr erreichen und deshalb vergleichsweise schnell zu einer Veränderung der Wärmestromverteilung relativ zum Erdkern führen. Die echte Polwanderung ebenso wie die Zusammenhänge zwischen dem Massentransport im Erdmantel und dem Erdmagnetfeld werden am GFZ intensiv untersucht (z.B. Doubrovine et al., 2012; Biggin et al., 2012).

Einfluss von Prozessen im Mantel auf die Erdoberfläche

Einer allgemein anerkannten These zufolge entstehen magmatische Großprovinzen durch das Aufsteigen von Schmelzen in temperaturgetriebenen Mantelplumes (White und McKenzie, 1989). Der hohe Auftrieb eines rein temperaturgetriebenen Mantelplumes müsste eigentlich bei Erreichen der Lithosphäre die Erdoberfläche um mehr als einen Kilometer anheben (Abb. 3a, rote Kurve). Diese Anhebung tritt aber nicht bei allen magmatischen Großprovinzen (inklusive der Sibirischen Großprovinz) auf (Czamanske et al., 1998). Außerdem nimmt man an, dass die geschätzte Freisetzung von Gasen bei vielen magmatischen Großprovinzen nicht ausreicht, um Massensterben auszulösen (Self et al., 2006). Ein kürzlich am GFZ entwickeltes numerisches Modell behandelt diese ungelösten Fragen (Sobolev et al., 2011). Den Ergebnissen zufolge bestand der Sibirische Mantelplume zu etwa 15% aus recycelter ozeanischer Erdkruste, die vor langer Zeit in den tiefen Erdmantel subduziert und durch den Mantelplume zurück zur Lithosphäre gebracht wurde. Das Krustenmaterial lag in dem Mantelplume in Form von Eklogit vor, der durch seine hohe Dichte den Auftrieb des Plumes verringert. Deswegen bewirkte der Plume bei seiner Ankunft nur eine geringe Anhebung der Lithosphäre (Abb. 3a, schwarze Kurve). Zudem schmolz die recycelte Kruste bei viel geringeren Temperaturen als das normale Mantelmaterial Peridotit, wodurch der Plume außergewöhnlich große Magmamengen erzeugte und dadurch in der Lage war, innerhalb von nur einigen hunderttausend Jahren die dicke sibirische Lithosphäre thermisch, chemisch und mechanisch zu zerstören (Abb. 3b,c). Weil das wiederverwertete Krustenmaterial besonders viel CO₂ und Halogene enthielt, setzte es während dieses Prozesses große Mengen an Gasen frei, die durch die obersten Erdschichten hindurch in die Atmosphäre gelangten und das Massensterben auslösten. Dem Modell zufolge sollte das Artensterben noch vor den größten magmatischen Eruptionen stattgefunden haben. Obwohl bislang nur wenige hochpräzise Datierungen der Eruptionen und des Massensterbens vorliegen, scheint diese Aussage für viele magmatische Großprovinzen gültig.

Zusammenfassung und Ausblick

Ein umfassendes Modell der Manteldynamik, das die Subduktion und das Abtauchen von Lithosphärenplatten, ihre

Erwärmung und die Erzeugung von Plumes an der Kern-Mantel-Grenze, die Auswirkungen dieser Prozesse auf Vorgänge im Erdkern, den Aufstieg von Plumes durch den Erdmantel und ihre Effekte an der Erdoberfläche in sich stimmig und konsistent mit Beobachtungsdaten erklärt, ist gegenwärtig eine der großen Herausforderungen der Geowissenschaften. Bei den entsprechenden Forschungen am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ steht die numerische Modellierung der thermo-chemischen Konvektion im Erdmantel im Vordergrund. Durch die enge Zusammenarbeit mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern anderer Disziplinen wird erreicht, dass die Modelle möglichst nah an der Realität bleiben. Die Modellierungen können deshalb erheblich zum tieferen Verständnis der Bedingungen, die wir gegenwärtig auf der Erde vorfinden, und ihrer möglichen Veränderlichkeit beitragen.

Literatur

- Becker, T. W., Boschi, L. (2002): A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. - *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 3, 1003, 10.1029/2001GC000168.
- Biggin, A. J., Steinberger, B., Aubert, J., Suttie, N., Holme, R., Torsvik, T. H., van der Meer, D. G., van Hinsbergen, D. J. J. (2012): Possible links between long-term geomagnetic variations and whole-mantle convection processes. - *Nature Geoscience*, 5, 526-533, 10.1038/ngeo1521.
- Czamanske, G. K., Gurevitch, A. B., Fedorenko, V., Simonov, O. (1998): Demise of the Siberian plume: Paleogeographic and paleotectonic reconstruction from the prevolcanic and volcanic record, north-central Siberia. - *International Geology Review*, 40, 2, 95-115, 10.1080/00206819809465200.
- Doubrovine, P. V., Steinberger, B., Torsvik, T. H. (2012): Absolute plate motions in a reference frame defined by moving hotspots in the Pacific, Atlantic and Indian oceans. - *Journal of Geophysical Research*, 117, B09101, 10.1029/2011JB009072.
- 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, Q05018, 10.1029/2007GC001806.
- Self, S., Widdowson, M., Thordarson, T., Jay, A. E. (2006): Volatile fluxes during flood basalt eruptions and potential effects on the global environment: A Deccan perspective. - *Earth and Planetary Science Letters*, 248, 1-2, 518-532, 10.1016/j.epsl.2006.05.041.
- Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutsкая, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., Vasiliev, Y. R. (2011): Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. - *Nature*, 477, 7364, 312-316, 10.1038/nature10385.
- Steinberger, B., Torsvik, T. H. (2012): A geodynamic model of plumes from the margins of Large Low Shear Velocity Provinces. - *Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 13, Q01W09, 10.1029/2011GC003808.
- Torsvik, T. H., Smethurst, M. A., Burke, K., Steinberger, B. (2006): Large igneous provinces generated from the margins of the large low-velocity provinces in the deep mantle. - *Geophysical Journal International*, 167, 3, 1447-1460, 10.1111/j.1365-246X.2006.03158.x.
- White, R., McKenzie, D. (1989): Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts. - *Journal of Geophysical Research*, 94, B6, 7685-7729, 10.1029/JB094iB06p07685.
- Wignall, P. B. (2001): Large igneous provinces and mass extinctions. - *Earth-Science Reviews*, 53, 1-2, 1-33, 10.1016/S0012-8252(00)00037-4.

Netzwerk

Tsunami-Frühwarnung

Dr. Angela Merkel besucht Tsunami-Frühwarnzentrum in Indonesien

Zum Abschluss ihrer ersten Reise nach Indonesien hat die Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel am 11. Juli 2012 das Tsunami-Frühwarnzentrum in Jakarta besucht. Frau Merkel bezeichnete das Tsunami-Warnzentrum als ein sehr gutes Beispiel für die deutsch-indonesische Kooperation. Das verheerende Ausmaß des Tsunami am 26. Dezember 2004 beruhte vor allem auf der fehlenden Vorsorge im Indischen Ozean für eine derartige Naturkatastrophe. Unmittelbar nach dem Ereignis erteilte die Bundesregierung der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, vertreten durch das GFZ, den Auftrag zur Entwicklung und Implementierung eines Frühwarnsystems für Tsunami im Indischen Ozean. Die Mittel in Höhe von insgesamt 55 Mio. Euro stammen zu großen Teilen aus dem Beitrag der Bundesregierung im Rahmen der Flutopferhilfe. Das Deutsch-

Indonesische Tsunami-Frühwarnsystem (GITEWS) wurde als Forschungsvorhaben vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und in Zusammenarbeit mit dem indonesischen Wissenschaftsministerium (RISTEK) und zuständigen Fachbehörden durchgeführt. Frau Merkel lobte die erfolgreiche Umsetzung des GITEWS-Konzepts und die hohe wissenschaftliche Qualität.

Am 29. März 2011, sechs Jahre nach der Tsunamikatastrophe im Indischen Ozean, endete das GITEWS-Projekt planungsgemäß und wurde vollständig an Indonesien übergeben. Damit ist die Kooperation aber nicht beendet. Insbesondere mit der nachhaltigen Aus- und Weiterbildung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Warnzentrumsbetreibers BMKG unterstützt Deutschland auch in Zukunft den Betrieb. Dabei

übernimmt das GFZ weiterhin eine wichtige Rolle. Denn neben dem technischen Aufbau müssen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Katastrophenmanagerinnen und -manager, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Verwaltung und die Bevölkerung geschult werden, was bei einem Starkbeben und einem Tsunami zu tun ist und welche präventiven Maßnahmen getroffen werden können. In drei Testregionen (Padang, Sumatra; Cilacap, Südjava; Kuta/Sanur, Bali) wird dazu der Ablauf einer Tsunamiwarnung bis hin zur Räumung des Küstenabschnitts durchgespielt. Unabhängig davon entwickelte Indonesiens Erdbebendienst BMKG Alarmpläne für das gesamte Land. Noch bis Ende März 2014 wird dieser Teil des Nachsorge-Konzepts für GITEWS, genannt PROTECTS (Project for Training, Education and Consulting for Tsunami Early Warning Systems) andauern. ■



Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel (Mitte) zusammen mit Prof. Reinhard Hüttl (GFZ), Dr. Jörn Lauterjung (GFZ) und E. E. Mangindaan (indonesischer Verkehrsminister) (v.l.n.r.) beim Besuch des deutsch-indonesischen Tsunami-Frühwarnzentrums in Jakarta (Foto: GFZ)



GFZ auf der Weltausstellung EXPO 2012

Das GFZ war mit Beiträgen zur Tsunami-Frühwarnung auf der Weltausstellung EXPO 2012 in Yeosu, Südkorea, im Deutschen Pavillon vertreten. Hier wurden die Besucher von multimedialen Strandkörben empfangen, die sich mit dem Leben an den Küsten und in küstennahen Gewässern beschäftigten. Ein Strandkorb widmete sich Tsunami-Frühwarnsystemen. Das Zentrum für Frühwarnung am GFZ hat hierzu den Aussteller inhaltlich beraten. Zudem haben die GFZ-Forscher Dr. Andrey Babeyko und Dr. Peter Löwe Simulationen von historischen Tsunami-Ereignissen berechnet und bildlich aufbereitet. Daneben wurden Bild- und Videomaterial über GITEWS zur Verfügung gestellt. Die Besucher konnten sich zudem über weltweite Ausbreitung der Riesenwellen

anhand der drei Beispielregionen Pazifik, Indik und Mittelmeer informieren. Gezeigt wurden Simulationen der Tsunami-Ereignisse Japan 2011, Indonesien 2004 und Algerien/Mallorca 2003.

Der Deutsche Pavillon hat zum Abschluss der Weltausstellung am 12. August 2012 den „Gold Award“ für die beste inhaltliche Umsetzung des Expo-Themas „Der lebende Ozean und die Küste“ erhalten. ■

Die EXPO-Besucher konnten über einen interaktiven Bildschirm verschiedene Seebeben auswählen. Die Computersimulation (Bildschirm im Vordergrund) zeigt, wie sich die Wellen vom jeweiligen Epizentrum eines Bebens in Richtung Küste ausbreiten und veranschaulicht die Arbeitsweise eines Tsunami-Frühwarnsystems (Bildschirm im Hintergrund). Die Farbcodes der Tsunami-Simulation geben an, mit welcher Höhe die einzelnen Wellen auf die Küsten treffen. (Foto: Martin Miseré/facts and fiction)

Weitere Informationen zu Frühwarnsystemen

im „GFZ-Journal System Erde“ (2011) Heft 1 „Naturgefahren und Frühwarnsysteme“ und auf der GITEWS-Website:

<http://systemerde.gfz-potsdam.de>

<http://www.gitews.org>

Grönlands aktueller Eismassenverlust



Der durch Schmelzen und Eisbergkalben verursachte Eismassenverlust in Grönland war während der letzten zehn Jahre im Vergleich zu den letzten 50 Jahren außergewöhnlich hoch. (Foto: I. Sasgen, GFZ)

Der grönländische Eisschild verliert weiter an Masse und trägt pro Jahr mit etwa 0,7 mm zur aktuell beobachteten Meeresspiegeländerung von rund 3 mm pro Jahr bei. Dieser Trend steigert sich in jedem Jahr im Mittel um weitere 0,07 mm. Zugleich ergibt sich ein differenziertes räumliches Bild der Eismassenveränderung: Der Massenverlust ist im Südwesten und Nordwesten Grönlands am größten. Dieses Ergebnis wurde durch einen neuen Vergleich dreier unterschiedlicher Arten von Satellitenbeobachtungen ermöglicht: die Messung der Änderung der Erdanziehungskraft durch die Eismassenänderung mit dem Satellitenpaar GRACE, die Vermessung der Höhenänderung mit dem Laseraltimeter auf dem NASA-Satelliten ICESat und die Bestimmung der Differenz zwischen Akkumulation aus regionalen Atmosphärenmodellen und dem Gletscherausstoß, wie er mit Radardaten gemessen wird.

Die Forscherinnen und Forscher konnten auch erstmals für jede Region mit bisher nicht erreichter Genauigkeit bestimmen, welchen Anteil Schmelzen, Eisbergkalben und Schwankungen im Niederschlag am gegenwärtigen Massenverlust ha-

ben. So ist eine Zunahme des Massenverlusts im Nordwesten nach 2005 zum Teil auf starke Niederschläge in der Zeit davor zurückzuführen. Dieser vorherige Massenzuwachs wurde in den folgenden Jahren abgebaut. Ähnlich verhält es sich im Osten Grönlands: dort wurde in den Jahren 2008 und 2009 sogar ein Massenzuwachs beobachtet. Wie die Forscherinnen und Forscher zeigen konnten, wurde dieser nicht durch langsamer fließende Gletscher bedingt, sondern durch zwei Winter mit besonders starkem Schneefall. Inzwischen setzt sich auch hier der Verlust von Eismasse fort. Für alle untersuchten Regionen sind die Schmelz- und Kalbraten zwischen 2002 und 2011 außergewöhnlich hoch im Vergleich zu denen der letzten fünf Jahrzehnte.

Die Arbeiten entstanden im Rahmen des Verbunds Regionale Klimaänderung RE-

KLIM der Helmholtz-Gemeinschaft und des EU-Projekts ice2sea. Durch die Studie sind die Forscherinnen und Forscher dem Verständnis der gegenwärtigen Entwicklungen des Grönländischen Eisschildes ein Stück näher gekommen. Im Nordwesten Grönlands weisen Daten auf einen abrupten Anstieg in der Kalbratenrate hin, der aber allein von den Radardaten nur ungenügend erfasst wurde. Wodurch dieser Anstieg verursacht sein könnte, ob er einen kontinuierlichen oder episodischen Charakter hat, wollen die REKLIM/ice2sea-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in einem nächsten Schritt klären. Eine notwendige Voraussetzung dafür ist eine genügend lange Messreihe, die durch Fortführung der präzisen Schwerefeldmessungen im Rahmen der neuen Satellitenmission GRACE-FO erstellt werden soll. ■

Sasgen, I., van den Broeke, M., Bamber, J. L., Rignot, E., Sørensen, L., Wouters, B., Martinec, Z., Velicogna, I., Simonsen, S. B. (2012): Timing and origin of recent regional ice-mass loss in Greenland. - *Earth and Planetary Science Letters*, 333-334, 293-303, [10.1016/j.epsl.2012.03.033](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.03.033).

Kontakt: Dr. Ingo Sasgen (sasgen@gfz-potsdam.de)

Klimabohrung am nördlichen Polarkreis



Bohrplattform auf dem zugefrorenen El'gygytgynsee (Foto: O. Juschus)

Während der vergangenen 2,8 Mio. Jahre traten in der Arktis in unregelmäßigen Abständen teils extreme Warmzeiten auf. Analyseergebnisse vom längsten Sedimentkern, der jemals in Landgebieten der Arktis erbohrt wurde, ergaben für den nördlichen Polarkreis bisher nicht für möglich gehaltene Temperaturen. Darüber hinaus deutet eine auffällige Übereinstimmung der Warmzeiten in der Arktis mit großen Abschmelzereignissen in der Antarktis auf bisher unbekannte Wechselwirkungen zwischen den Polargebieten hin. Die Erkenntnisse der internationalen Forschergruppe unter der Leitung von Prof. Martin Melles, Universität Köln, stammen aus einem Sedimentkern, der 2009 im Rahmen einer aufwendigen Winterexpedition aus dem El'gygytgynsee im äußersten Nordosten Sibiriens erbohrt wurde. Dieser See wurde vor 3,6 Mio. Jahren gebildet, als ein Meteoriteneinschlag einen Krater von 18 km Durchmesser in die Erdkruste geschlagen hat. Seitdem nimmt er kontinuierlich, Jahr für Jahr, Sedimente auf. Außerdem ist der Meteorit ausgerechnet in einer der wenigen Regionen in der Arktis niedergegangen, die von den Gletschervereisungen während der Kaltzeiten nicht erreicht wurden. Daher ist die mächtige Sedimentabfolge fast ungestört und lückenlos überliefert. Die Einzigartigkeit des Klimaarchivs wird deutlich,

wenn man sich vor Augen führt, dass mit den Bohrkernen etwa 30 mal tiefer in die Erdgeschichte vorgestoßen wurde, als das mit den längsten Bohrkernen von der grönländischen Eiskappe der Fall ist.

Das Alter jeder Sedimentlage aus dem El'gygytgynsee musste dafür präzise bestimmt werden. Die Aufgabe übernahmen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ. Eeva Haltia-Hovi (GFZ, jetzt Universität Lund, Schweden) benutzte dazu die magnetischen Eigenschaften der Minerale in den Sedimenten: das Erdmagnetfeld hat sich in den letzten Jahrmillionen mehrfach umgepolt, diese Umpolungen finden sich in den Sedimenten wieder. Voraussetzung für die präzise Altersdatierung ist die millimeterweise Erfassung des Farbspektrums und der magnetischen Suszeptibilität der erbohrten Sedimente über die gesamte Länge des Kernprofils von 318 m. Dafür entwickelte der GFZ-Wissenschaftler Norbert Nowaczyk einen eigenen Bohrkernscanner. Zudem entwarf er ein Softwarepaket, mit dem die umfangreichen Datensätze aller Partner verarbeitet werden konnten. Die vielfältigen sedimentologischen, geochemischen, magneto- und biostratigraphischen Datensätze konnten so mit den bereits bekannten Klimazyklen der letzten 3,6 Mio. Jahre hochaufgelöst in Beziehung gesetzt

werden. Insgesamt umfasst das so erstellte Altersmodell für die Seesedimente aus dem El'gygytgynsee über 600 Stützstellen.

Das El'gygytgyn Drilling Project brachte die Bohrung im Rahmen des internationalen Wissenschaftsbohrprogramms ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) nieder, dessen Koordination über das GFZ läuft. Die GFZ-Operational Support Group des ICDP lieferte mit geophysikalischen Messungen in zwei Bohrlöchern wertvolle Daten zu verschiedenen In-situ-Parametern (Temperatur, natürliche Gammastrahlung, u.a.). Der Vergleich von Bohrlochmessungen mit Messungen, die vor Ort an Bohrkernen durchgeführt wurden, ermöglichte eine Teufenkorrelation sowie das Auffüllen von Lücken im Bohrkern, eine wichtige Grundvoraussetzung für weitere Untersuchungen. ■

Melles, M., Brigham-Grette, J., Minyuk, P. S., Nowaczyk, N. R., Wennrich, V., DeConto, R. M., Anderson, P. M., Andreev, A. A., Coletti, A., Cook, T. L., Haltia-Hovi, E., Kukkonen, M., Lozhkin, A. V., Rosén, P., Tarasov, P., Vogel, H., Wagner, B. (2012): 2.8 Million Years of Arctic Climate Change from Lake El'gygytgyn, NE Russia. - *Science*, 337, 6092, 315-320, 10.1126/science.1222135.

Kontakt: Dr. Norbert Nowaczyk
(nowa@gfz-potsdam.de)

EMEC-Katalog – Das Erdbebenrisiko in Deutschland und Europa

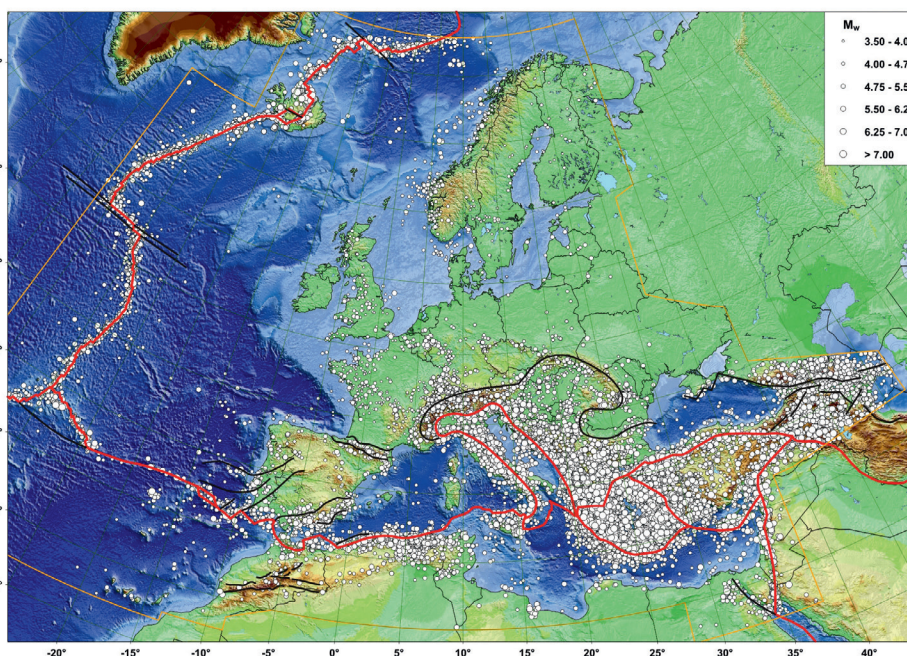
Wie stark kann in Deutschland die Erde beben? Wo sind in Europa die Häufungen von Erdbeben zu finden? Diese Fragen sind Ausgangspunkt für Risikoabschätzungen und werden relevant, wenn es um die Sicherheit von Gebäuden oder das Auftreten von Tsunami geht. Wissenschaftlern des GFZ ist es nun erstmals gelungen, einen harmonisierten Erdbebenkatalog für Europa und den Mittelmeerraum für das letzte Jahrtausend zu erarbeiten. Der Katalog umfasst etwa 45 000 Erdbeben.

Erdbeben treten in unterschiedlicher Häufigkeit auf. Das bedeutet, dass in manchen Regionen starke Erdbeben in Zeitabständen von Hunderten von Jahren auftreten können. Das seltene Auftreten kann damit eine trügerische Sicherheit verursachen, die das tatsächlich vorhandene Risiko überdeckt, zumal erste messtechnische Aufzeichnungen erst seit rund hundert Jahren vorliegen und verlässliche Daten auch zu schwächeren Beben erst seit etwa fünfzig Jahren. Die einzige Möglichkeit zur Erfassung des real existierenden Risikos ist die Auswertung historischer Beben. Der Katalog umfasst die Beben der letzten tausend Jahre ab einer Magnitude M_w von 3,5

im nördlichen Teil des katalogisierten Gebiets und Magnitude M_w größer als 4,0 für den südlichen Teil. Er überdeckt das Gebiet von den Azoren bis zum Kaspischen Meer und von der Sahara bis zum Nordkap. Auf der Basis von etwa 80 zumeist nationalen Katalogen, mehr als 100 weiteren Quellen sowie vielen eigenen Analysen historischer Schlüsselerebeben bietet der EMEC-Katalog (European-Mediterranean Earthquake Catalogue) jetzt erstmals eine regionale Langzeit-Datenbasis mit vereinheitlichten Magnituden zur Messung der Stärke von Beben. Bei der Zusammenführung all dieser Quellen, die teils beträchtlich differierende Stärkeangaben der Beben anhand unterschiedlicher Magnitudenskalen oder Intensitäten nutzen, wurde besonders Augenmerk darauf gerichtet, diese in Form harmonisierter M_w -Magnituden zu vereinheitlichen. Die Beben sind in EMEC für den Zeitraum von 1000 AD bis 2006 katalogisiert. Im Gebiet südlich von 40°N und östlich von 10°E erlaubt die Datenlage die Katalogisierung ab 300 AD. Natürlich sind die Beben in den frühesten katalogisierten Zeiten nicht vollständig. Die Zeiten, ab derer bestimmte Bebenmagnituden hinreichend vollständig vorliegen, variiert im Kataloggebiet

beträchtlich. So lässt sich abschätzen, dass beispielsweise Beben mit $M_w \geq 6,5$ in der Levante ab etwa 300 AD hinreichend vollständig erfasst sind, Beben mit M_w größer als 5 dort ab etwa 1965. Dagegen liegen Beben mit M_w größer als 5 im Gebiet Deutschlands ab etwa 1600 hinreichend vollständig katalogisiert vor. Bestandteil der EMEC-Veröffentlichung ist zudem eine Liste von Beben, die nach neuen Erkenntnissen nicht stattgefunden haben (sogenannte fakes) infolge von Irrtümern von Chronisten, Verwechslungen und Datumsfehlern. Wert gelegt wurde auch auf Nutzerfreundlichkeit. Auf der GFZ-EMEC-Webseite können die Daten innerhalb des Kataloggebiets nach Nutzerwünschen heruntergeladen und entsprechend der Vorgaben der Nutzer Karten der Epizentren der Erdbeben innerhalb gewünschter zeitlicher und räumlicher Ausschnitte, Maßstäbe und Kartenprojektionen generiert, gespeichert und gedruckt werden.

Der EMEC-Katalog ist damit eine verlässliche Grundlage für die Gefährdungsabschätzung für Erdbeben und bebenbedingter Tsunami. Darüber hinaus ist ein solcher Erdbebenkatalog die Grundlage vieler weiterer geowissenschaftlicher Untersuchungen und Quelle für Recherchen außerhalb von Forschungsanwendungen. ■



Kontakt: Prof. Gottfried Grünthal
(ggrue@gfz-potsdam.de)

Link zur GFZ-EMEC-Website:
http://www.gfz-potsdam.de/portal/gfz/Struktur/Departments/Department+2/sec26/services/01_EMEC_2012

Karte der Epizentren von Erdbeben in EMEC sowie Plattengrenzen (rot) und ausgewählte Bruchstörungen erster Ordnung (schwarz); katalogisierte Beben für $M_w \geq 3,5$



Die Basler BT67 „Polar5“ mit Nasenmast während der AIRMETH-Kampagne (Foto: T. Sachs, GFZ)

Methanmessungen im Tiefflug

Erfassung des Treibhausgases Methan in der Arktis

Ein Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (AWI) und des GFZ hat im Juli dieses Jahres eine Messkampagne abgeschlossen, mit der zum ersten Mal vom Flugzeug aus die Methanemissionen aus den weitläufigen Permafrostlandschaften der Arktis großskalig erfasst werden konnten. Das überflogene Untersuchungsgebiet erstreckte sich von Barrow, der nördlichsten Siedlung auf dem amerikanischen Festland, über den gesamten nördlich der Brooks Range gelegenen sogenannten North Slope Alaskas bis ins Mackenzie-Delta in den North West Territories Kanadas. Mit den flugzeuggestützten Messungen (Airborne Measurement of Methane – AIRMETH) in einer Höhe von nur 30 bis 50 Meter über dem Erdboden trägt zur Klärung zweier wichtiger Fragen bei: Wieviel Methan gelangt aus Permafrostgebieten in die Atmosphäre? Tragen bekannte geologische Punktquel-

len, also die Leckage von Erdgas entlang geologischer Störungen, signifikant zur Gesamtmenge bei oder dominiert das in den oberen Bodenschichten mikrobiell produzierte Methan?

Auf der Basis dieser Messungen zum derzeitigen Emissionsstand können die zukünftigen klimabedingten Änderungen abgeschätzt werden. Zudem dienen solche Datenerhebungen dem besseren Verständnis des immer noch unvollständig erforschten Kohlenstoffkreislaufs in der Arktis. Als Messplattform diente das Forschungsflugzeug Polar 5 des AWI. Die Maschine vom Typ Basler BT-67 wurde an seiner Rumpfspitze mit einem meteorologischen Nasenmast ausgerüstet, der eine 5-Lochsonde, Temperatur- und Luftfeuchte-Sensoren enthält. Er erfasst auf diese Weise vor allem Luftströmungen. Über einen Ansaugstutzen auf dem Flugzeughauptdeck wurde zudem Luft in die Kabine gesaugt und dort in einem

Methananalysator untersucht. In dem nächsten Schritt sollen die Messdaten nun weitergehend analysiert und die nachgewiesenen Strömungsprozesse in Computermodelle integriert werden.

Kontakt: Dr. Torsten Sachs
(tsachs@gfz-potsdam.de)

Der Wasserfluss des Amazonas im natürlichen Klimaarchiv

Sauerstoffisotope in Jahrringen von Bäumen sind ein hervorragendes Archiv der Niederschlagsdynamik im tropischen Amazonasgebiet. Die präzise Bestimmung der Verhältnisse der stabilen Sauerstoff-Isotope ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) erweist sich als neuer Parameter für die Erfassung der Dynamik des Wasserkreislaufs in tropischen Regenwaldgebieten und kann damit die in tropischen Gebieten für hochwertige Rekonstruktionen der Klimaverhältnisse ungeeigneten klassischen Messgrößen, wie Jahrringbreite oder Holzdichte ersetzen. Zu diesem Ergebnis kommt eine Gruppe von Forscherinnen und Forschern des GFZ, der Universitäten von Leeds (Vereinigtes Königreich) und Utrecht (Niederlande), sowie dem Institut de Recherche pour le Développement (IRD, Peru).

Die Forscherinnen und Forscher untersuchten Jahrringe der tropischen Baumart *Cedrela odorata* aus Bolivien und stellten fest, dass diese die Isotopenzusammensetzung des Regens im Amazonasgebiet konservieren. Da die Isotopenverhältnisse wiederum von der Niederschlagsmenge über dem Amazonasbecken gesteuert werden, geben die Baumringe die Dynamik des Niederschlags der Vergangenheit mit bisher unerreichter Genauigkeit wieder.

Das Amazonasgebiet, das 17mal größer ist als Deutschland, spielt im globalen Klimageschehen eine zentrale Rolle, aber bislang ist wenig über seine klimatische Vergangenheit bekannt. Dies liegt vor allem daran, dass es bislang nur wenige präzise datierbare und zeitlich hochaufgelöste Klimaarchive aus dieser Region gibt.



Wissenschaftler gewinnen einen Holzkern aus einer *Toona ciliata* (auch bekannt als Australian Red Cedar), die taxonomisch eine Schwester von *Cedrela odorata* (Westindische Zedrele) ist. (Foto: I. Heinrich, GFZ)

Mit dem neuen Verfahren steht ein enorm leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung. Überraschend bei den Untersuchungen ist, dass die Isotopenanalyse von nur acht Bäumen eines einzelnen Standorts im Bereich des oberen Einzugsgebiets des Amazonas nicht nur Informationen über die lokalen Niederschlagsverhältnisse liefert, sondern auch über den gesamten Einzugsbereich des Amazonas. Etwa ein Fünftel des globalen Landflächenniederschlags fällt im Amazonasbecken, welches durch den weltgrößten Fluss in den Atlantik entwässert wird. Die Sauerstoffisotopenwerte der Jahrringe zeigen eine enge Beziehung zu den Wasserstandsschwankungen des Amazonas und geben deshalb wertvolle Hinweise über die Menge des Regens, der in den südlichen Atlantik geführt wird.

Die untersuchten, etwa 150-jährigen Bäume liefern sogar eindeutige Nachweise von Extremereignissen. So sticht beispielsweise der durch das Klimaphänomen El Niño im Jahr 1926 hervorgerufene Tiefstwasserstand des Amazonas deutlich aus der Isotopen-Zeitreihe der Jahrringe hervor. Obwohl der aktuelle Datensatz relativ kurz ist, zeigt sich über das 20. Jahrhundert hinweg ein Anstieg der Sauerstoffisotopenwerte, der mit der Beobachtung eines leichten Anstiegs

der Abflussraten des Amazonas einhergeht. Beides kann sehr wahrscheinlich auf eine Intensivierung des Wasserkreislaufs zurückgeführt werden. Um diese These abzusichern, sind weitere Untersuchungen der Netzwerkpartner an zusätzlichen Standorten im Amazonasbecken geplant. ■

Brienen, R. J. W., Helle, G., Pons, T. L., Guyot, J.-L., Gloor, M. (2012): Oxygen isotopes in tree rings are a good proxy for Amazon precipitation and El Niño-Southern Oscillation variability. - Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), 109, 42, 16957-16962, 10.1073/pnas.1205977109.

Kontakt: Dr. Gerd Helle
(ghelle@gfz-potsdam.de)

Chancen der Nutzung von Geothermie in städtischen Ballungsräumen

Am 15. November 2012 wurde in Brüssel auf Initiative der EU-Kommission ein Workshop zur zukünftigen Rolle der Geothermie in Europas Wärmeversorgung durchgeführt. An der Veranstaltung „Future Utilization of Geothermal Energy in Urban Areas“, bei der es um geothermische Strom- und Wärmeproduktion in urbanen Räumen ging, nahm auch EU-Kommissar Günther H. Oettinger als Redner teil. Ausrichter waren zwei Mitgliedszentren der Helmholtz-Gemeinschaft, das KIT und das GFZ.

Urbane Ballungsräume sind Brennpunkte des Energiebedarfs. Allein in Deutschland gehen über 60 % des Nutzenergiebedarfs in die Wärmeversorgung. Der überwiegende Anteil davon stammt aus fossilen Brennstoffen. Das geothermische Potenzial in der Tiefe deckt ein Vielfaches dieses Bedarfs ab. Die Wärmeversorgung der Bundeshauptstadt beispielsweise beruht zu über 98% auf fossilen Energieträgern. Geothermie aus tiefen Quellen kann hier Abhilfe schaffen. Die Helmholtz-Gemeinschaft hat ein umfangreiches Forschungsprogramm zur Tiefen Geothermie aufgesetzt, an dem ausgewiesene Experten der Helmholtz-Zentren in Potsdam (GFZ) und Karlsruhe (KIT), unterstützt durch das Helmholtz-Zentrum in Leipzig (UFZ), Lösungen für die Nutzbarkeit geothermischer Ressourcen entwickeln.

Tatsächlich ist die Geothermie eine Option Erneuerbarer Energie mit enormem Potenzial: Der IPCC-Report 2011 weist aus, dass allein die obersten fünf Kilometer von Europas Erdkruste genug Wärmeenergie enthalten, um Europa pro Jahr mit rund 4000 TWh Strom und 2000 TWh Wärme zu versorgen, was ungefähr dem Gesamtjahresbedarf Europas entspricht. Da die Geothermie grundlastfähig, also nicht von den Schwankungen des Wetters abhängig ist, würde die Nutzung von 5 % dieses Potenzials genügen, die Stromnetze bei einer Einspeisung von Wind- und Sonnenenergie zu stabilisie-

ren. In Europa sind bereits zahlreiche geothermische Kraftwerke installiert oder aktuell in Planung, die pro Jahr aus Geothermie 86,1 TWh an Wärme und 14 TWh an Strom liefern können. Damit werden bereits heute mehrere Mrd. Liter Heizöl eingespart. Insbesondere in urbanen Räumen können fossil betriebene Heizungen durch Geothermie in eine versorgungssichere und CO₂-arme Wärmeversorgung überführt werden. So bietet z. B. das Nordostdeutsche Sedimentbecken ein großes Potential für die Nutzung der Geothermie als grundlastfähige Energiequelle. Erste Untersuchungen unter Beteiligung des GFZ auf dem früheren Berliner Flughafen Tempelhof weisen auf zwei Horizonte im Untergrund hin, deren Wärmepotential den Berliner Bedarf über mehr als hundert Jahre decken könnte. Die Helmholtz-Geothermieforschung steht im Einklang mit dem „Programm zur Geothermischen Energie“ („Joint Programme Geothermal Energy“) der europäischen Energieforschungsallianz EERA. Dort haben sich unter Leitung des

GFZ 25 europäische Forschungsinstitute aus elf Ländern zusammengeschlossen, um gemeinsam an der Entwicklung kosteneffizienter Technologien für die nachhaltige Nutzung und den Ausbau der geothermischen Energie zu arbeiten. Kurzfristig zielt dieses Programm auf eine Zunahme der geothermisch erzeugten Elektrizität aus konventionellen Geothermiekraftwerken zwischen zwei und zehn Gigawatt. Obwohl sich hierfür besonders vulkanische Gebiete wie auf Island eignen, lassen sich Geothermie-systeme ebenfalls in Gebieten mit geringerer thermischer Energie zum Beispiel als so genannte „Enhanced Geothermal Systems“ (EGS) nutzen. Diese Systeme werden in internationalen Kooperationen am GFZ und KIT erforscht, um standortunabhängig auch in urbanen Regionen wahlweise die Wärme- oder die Strom- und Wärmeversorgung im Grundlastbereich ergänzen zu können. Damit lässt sich der Verbrauch fossiler Energieträger in Ballungszentren nachhaltig reduzieren. ■



Geothermieworkshop am 15. November 2012 in Brüssel, Belgien (v.l.n.r.): Prof. Ernst Huenges (GFZ), Prof. Thomas Kohl (KIT) und Günther Oettinger (EU-Kommissar für Energie) (Foto: HorstWagner.eu /KIT/GFZ)



2012 | 2013

Deutsch-Südafrikanisches
Jahr der Wissenschaft
German-South African
Year of Science



GEO-FUTURE: Symposium zur Erdsystemforschung in Südafrika

Im Rahmen des deutsch-südafrikanischen Jahres der Wissenschaft veranstaltete das GFZ vom 26. bis 30. November 2012 das GEO-FUTURE Symposium. Es ist das feierliche Abschluss-symposium des Inkaba yeAfrica-Programms, dem deutsch-südafrikanischen Vorzeigeverbund für gemeinsame Forschung und Lehre in den Erdsystemwissenschaften. Über 80 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Südafrika, davon 60 Studierende aus acht Universitäten nahmen an dem fünftägigen Workshop in Potsdam teil. Das Symposium behandelte die Themenblöcke Geodynamik und Erdbeobachtung, Energieressourcen, mineralische Rohstoffe sowie Geo-Ökodynamik (Landschaftsentwicklung, Landnutzung, Ökosysteme und Klimawandel). ■

Weitere Informationen zu Inkaba yeAfrica: www.inkaba.org

Internationale Besuche am GFZ

Am 1. Juni 2012 besuchte eine Delegation des chinesischen **Institute of Crustal Dynamics (ICD)** aus Peking das GFZ. Anlass waren Konsultationen mit dem Ziel einer engeren Kooperation mit den Schwerpunkten krustales Spannungsfeld, seismischer Zyklus und Reservoirstabilität. Ein im Nachgang an das Treffen von beiden Parteien unterschriebenes *Memorandum of Understanding (MoU)* regelt die geplanten Aktivitäten im Rahmen der zukünftigen Kooperation.

Am 12. September 2012 war der **kolumbianische Botschafter Juan Mayr Maldonado** zu Gast am GFZ. Ziel der Gespräche war es, zukünftige Kooperationsmöglichkeiten mit kolumbianischen Forschungsinstitutionen und Unternehmen, etwa im Bereich der Klima- und Energieforschung, zu diskutieren

Am 22. Oktober 2012 begrüßte das GFZ den **Botschafter von Schweden, Staffan Carlsson**, der zusammen mit Vertretern aus Industrie, Forschung und öffentlichen Ämtern aus Schweden und Deutschland in Potsdam zu Gast war. Im Rahmen eines „Runden Tisches“ wurden Möglichkeiten der bilateralen Zusammenarbeit im Bereich der Energieforschung und intelligenter Energiesysteme diskutiert.



S.E. Juan Mayr Maldonado, Botschafter von Kolumbien, und Prof. Reinhard F. Hüttel, Wissenschaftlicher Vorstand des GFZ (Foto: GFZ)

Am 29. Oktober 2012 besuchte der **Research Council Oman** (The Research Council, TRC) und das International Advisory Board des TRC das GFZ. Der Besuch erfolgte im Rahmen der Unterzeichnung eines *Letter of Intent (LoI)* zwischen der Helmholtz-Gemeinschaft und TRC zur zukünftigen Zusammenarbeit beim Aufbau eines Technologiezentrums im Oman. Partner auf Seiten der Helmholtz-

Gemeinschaft sind neben dem GFZ das GEOMAR, das UFZ und das DLR. Schwerpunkte erster bilateraler Pilotprojekte liegen im Bereich der Kohlenwasserstoff-Forschung, der Entwicklung innovativer Wasserresourcentechnologien und Erneuerbarer Energien.



Der Research Council Oman (The Research Council, TRC) und das International Advisory Board des TRC gemeinsam mit Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des GFZ (Foto: GFZ)

Auf Einladung des Auswärtigen Amtes waren am 18. September 2012 **Experten für Naturkatastrophen und Bevölkerungsschutz** aus Bangladesh, Indien, Indonesien, Pakistan und Thailand Gäste am GFZ. Sie erhielten Gelegenheit, die Anwendungsmöglichkeiten von Ergebnissen aus aktuellen EU-Forschungsprojekten unseres Zentrums zu begutachten und Möglichkeiten für den Transfer in ihre Heimatländer zu erörtern. Hier ging es um die Einschätzung der seismischen Gefährdung auf der Basis der EMS (European Macroseismic Scale) und die Umsetzung der Kennwerte in nationale Baugesetze sowie die neuen Methoden zur Berechnung der Kosten und Risiken im Zusammenhang mit Flut- bzw. Hochwasserkatastrophen. Den Abschluss bildete eine Live-Demonstration des Krisenmanagementsystems TRIDEC, das für Warnzentren im Bereich der Tsunami-Frühwarnung entwickelt wurde und derzeit im Bereich des Mittelmeeres und des Indischen Ozeans getestet wird.

Treffen der europäischen National Labs für Geowissenschaften

Die wissenschaftlich-technologischen Durchbrüche im Verständnis des Systems Erde-Mensch verdeutlichen nachdrücklich, welchen Beitrag die Geowissenschaften zu einem besseren Verständnis der großen gesellschaftlichen Herausforderungen leisten können. Beispiele sind der Klimawandel und seine regionalen Auswirkungen oder die nachhaltige Sicherung der Energieversorgung und lebensnotwendiger Ressourcen. Um diese in der Regel globalen Fragestellungen in der notwendigen Qualität beantworten zu können, ist die Forschung auf die internationale Zusammenarbeit angewiesen. Durch die Kooperation mit ausgewiesenen internationalen Forschungseinrichtungen und dem gezielten Aufbau von Partnernetzwerken kann eine kritische Masse an Kompetenz und Expertise aufgebaut und der Zugang zu gegenseitigen Forschungsressourcen gestärkt werden.

Das GFZ hat im Sommer dieses Jahres die Initiative ergriffen, einen europäischen Diskurs der großen geowissenschaftlichen Forschungseinrichtungen auf den

Weg zu bringen. Auf Einladung des GFZ trafen sich daher am 4. und 5. September 2012 hochrangige Vertreterinnen und Vertreter folgender Forschungsinstitutionen auf dem Telegrafenberg: INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Italien); ETH Zürich (Schweiz), IPGP, L'Institut de Physique du Globe de Paris (Frankreich); NERC-BGS, Natural Environment Research Council – British Geological Survey (Großbritannien); Utrecht University (Niederlande); ICTJA-CSIC, Institute of Earth Sciences „Jaume Almera“ (Spanien); GeoPlanet-Verbund (Polnische Akademie der Wissenschaften) und Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Treffens unterstützten nachdrücklich den Wunsch, in Zukunft enger mit den europäischen „National Labs“ in den Geowissenschaften zusammenzuarbeiten. In einem gemeinsam verabschiedeten und anlässlich eines nachfolgenden Treffens in Paris unterzeichneten *Letter of Intent (LoI)* wurden nicht nur zukünftig gemeinschaftlich anzugehende Forschungsthemen vereinbart. Auch auf operativer Ebene sind konkrete Maßnahmen beschlossen worden, die durch ein gemeinsames Steering Committee koordiniert werden sollen. Dies betrifft u. a.

- Agenda-Setting in zukünftigen EU-Programmen,
- Präsenz in Brüssel, insb. gezielte, gemeinsame Außendarstellung,
- gemeinsame Nutzung von Großgeräten und wissenschaftlichen Infrastrukturen,
- Austausch von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern,
- Aufbau und Nutzung gemeinsamer Datenbanken sowie
- Behandlung der priorisierten Themen Klimawandel, Naturgefahren und Georessourcen. ■

Aktuelle internationale Trainingskurse des GFZ



Eröffnung des Trainingskurses „Regional Cross-Border Early Warning Systems for GeoRisks in Central Asia“ des GFZ-Zentrums für Frühwarnung am 5. November 2012 (Foto: GFZ)

„Seismology and Seismic Hazard Assessment“, Rabat, Marokko

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ führt jährlich internationale Trainingskurse zum Thema „Seismologie und seismische Gefährdungseinschätzung“ durch. Dieses Jahr wurde der Kurs vom 17. September bis 21. Oktober 2012 als Regionalkurs für Afrika in Zusammenarbeit mit der Mohamed V Universität in Rabat ausgerichtet. Aus den über 100 eingegangenen Bewerbungen wurden 28 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus 18 Ländern nach Marokko eingeladen.

Die fünfwöchigen Intensivkurse vermitteln sowohl theoretische Grundausbildung als auch praktisches Training für Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler sowie für Ingenieurinnen und Ingenieure auf dem Gebiet der Seismologie und der seismischen Gefährdungseinschätzung. Sie finden seit der Gründung des GFZ abwechselnd in Potsdam und als Regionalkurs im Ausland statt, u. a. mit dem Ziel der Stärkung der regionalen Zusammenarbeit. Das Ziel der Trainingskurse ist die Verbesserung der Einschätzung der regionalen und globalen Gefährdung durch Erdbeben. Dazu wird das Wissen über die seismologischen Analysemethoden vertieft und die praktische Anwendung trainiert. Ein weiterer zentraler Punkt in diesem Kurs war das GEOFON-Programm des GFZ, das durch die in Potsdam entwickelte Software SeisComp3 und die intensive internationa-

le Zusammenarbeit ein seismologisches Monitoringnetzwerk etabliert hat, das auch zur Tsunami-Warnung im westlichen Mittelmeer ausgebaut werden soll.

Die Lektorinnen und Lektoren des Trainingskurses kamen aus verschiedenen Sektionen des GFZ, der Universität Leipzig, Universität Stuttgart, des Observatoire Grenoble und der Universität Bergen, ergänzt durch Lektorinnen und Lektoren aus Marokko. Unter ihnen sind ehemalige Kursteilnehmerinnen und Kursteilnehmer, die jetzt leitende Funktionen in Forschungseinrichtungen in Marokko haben. Die Finanzierung des fünfwöchigen Trainingskurses erfolgte über das Auswärtige Amt der Bundesrepublik Deutschland, das GFZ und den marokkanischen Partner.

„Regional Cross-Border Early Warning Systems for GeoRisks in Central Asia“, Potsdam

Vom 5. bis 16. November 2012 fand am GFZ der Trainingskurs „Regional Cross-Border Early Warning Systems for GeoRisks in Central Asia“ statt. Die 20 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Afghanistan, Kasachstan, Kirgisistan, Usbekistan, Tadschikistan und Turkmenistan wurden im Rahmen des Seminars auf dem Gebiet der Erdbebengefährdung und der Georisiken bzw. zur Anpassung an den Klimawandel ausgebildet. Der zweiwöchige Trainingskurs des Zentrums für Frühwarnung EWS am GFZ

vermittelte grundlegende Themen und praktische Übungen zu modernen Arbeitsweisen in der Seismologie sowie zur Gefährdungseinschätzung und zur interdisziplinären Risikobewertung.

„Earthquake Monitoring, Tectonic Deformation, Seismic Zoning Methods and Tsunami Early Warning“, Jakarta, Indonesien

Am 19. November 2012 wurde der internationale Trainingskurs zu „Earthquake Monitoring, Tectonic Deformation, Seismic Zoning Methods and Tsunami Early Warning“ durch GFZ Wissenschaftler am indonesischen Tsunami-Frühwarnzentrum in Jakarta eröffnet. Die Ausbildung der 29 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus den ASEAN Staaten, Mauritius, Oman, Indien, Bangladesch und Sri Lanka wird gemeinschaftlich vom GFZ mit der indonesischen Agentur für Meteorologie, Klimatologie und Geophysik (BMKG) und unter Beteiligung von UNESCO, GIZ und DAAD realisiert. Die Veranstaltung wird vom Internationalen Büro des BMBF kofinanziert.

Der Trainingskurs ist ein Beitrag zum „ASEAN-EU-Jahr der Wissenschaft, Technologie und Innovation 2012“ und setzt die gemeinschaftlichen Aktivitäten der vergangenen Jahre zwischen Deutschland und Anrainerstaaten des Indischen Ozeans zu den gesellschaftsrelevanten Themen Erdbebenmonitoring und Tsunami-Frühwarnung fort. Im Rahmen der wissenschaftlich-technologischen Zusammenarbeit zwischen Deutschland und Indonesien wurden und werden hier mit Förderung des BMBF weitreichende Vorhaben z. B. GITEWS, PROTECTS und GEOTHERMIE INDONESIA durchgeführt. Das GFZ hat durch die Entwicklung des Erdbebenmonitoring-Systems SeisComp3, von Tsunami-Frühwarnsystemen sowie seiner Arbeiten zur dezentralen Energieversorgung mit Geothermie hier weltweit Akzente gesetzt. ■

Helmholtz und GFZ

Helmholtz fördert neue Ausgründungen

Mit dem Programm Helmholtz-Enterprise unterstützt die Helmholtz-Gemeinschaft sechs neue Ausgründungsvorhaben mit jeweils 100 000 Euro aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds. Die Mittel werden vor allem in der kritischen Startphase der Ausgründung eingesetzt, um den Gründerinnen und Gründern Freiraum für die Vorbereitung der Gründung zu ermöglichen bzw. betriebswirtschaftliche Kompetenzen in die Spin-off-Projekte einzubinden. Die Förderung ist Teil der Technologietransferstrategie der Helmholtz-Gemeinschaft. Mit der vollen Fördersumme von jeweils 100 000 Euro aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds und mindestens der gleichen Summe aus dem jeweiligen Helmholtz-Zentrum stehen den Ausgründungsprojekten damit für ein Jahr zusätzliche Mittel zur Finanzierung von Personal in der Ausgründungsphase zur Verfügung. Am GFZ wird die Ausgründung „FastLoc – Hochpräzises Mikroseismisches Echtzeit-Monitoring“ gefördert. Die GFZ-Wissenschaftler Prof. Georg Dresen und Prof. Marco Bohnhoff entwickeln eine marktfähige Dienstleistung auf Basis einer innovativen Software, mit der in Echtzeit mikroseismisch die induzierten Brüche beim so genannten Fracking verfolgt werden können. Mit dem Fracking werden gezielt Mikrorisse in geologischen Gesteinsformationen erzeugt, um Schiefergas, Erdwärme oder flüssige Kohlenwasserstoffvorkommen zu erschließen. ■

Mehr Informationen zum GFZ-Technologietransfer:

Dr. Ingo Kapp
(ingo.kapp@gfz-potsdam.de)

GFZ-Forschung am Toten Meer

Die Helmholtz-Gemeinschaft fördert seit 1. Juli 2012 insgesamt elf neue Helmholtz-Virtuelle-Institute mit 30 Mio. Euro. Darin forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Helmholtz-Zentren mit Partnern aus Universitäten und anderen renommierten Forschungsinstituten aus dem In- und Ausland an einem gemeinsamen Thema. Die Virtuellen Ins-

titute werden mit jährlich bis zu 600 000 Euro über drei bis fünf Jahre aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds gefördert, dazu kommen Eigenmittel der Zentren, so dass die Forschungsvorhaben insgesamt mit bis zu 900 000 Euro jährlich finanziert werden können.

Das am 1. September 2012 gestartete Virtuelle Institut „DESERVE (Dead Sea Research Venue): Prozessstudien zum Erdsystem unter den einzigartigen Bedingungen des Toten Meeres“ kombiniert Atmosphären- und Klimaforschung mit Erdwissenschaften und Wasserforschung. Es befasst sich mit drei großen Herausforderungen: Umweltrisiken, Wasserverfügbarkeit und Klimawandel. Zum einen geht es um ein besseres Verständnis der Entstehung geophysikalischer Phänomene und geomorphologischer wie Einsturzlöcher (Sinkholes) oder Wasser- und Stofftransporten in ausgetrockneten Flussläufen (Wadis) mit episodischen Sturzfluten (Flash Floods) nach Gewitter und Starkregen. Zweites großes Thema ist der Landschaftswasserhaushalt der Region, beispielsweise Wasserverfügbarkeit und -versalzung sowie deren Auswirkungen auf die Bodendegradation und Wüstenbildung. Die Untersuchungen sollen Entwicklungsprognosen für die nächsten zehn bis 50 Jahre ermöglichen. Grundlage dafür sind Langzeitmessungen geophysikalischer und hydrologischer Parameter wie Verdunstung, Abflüsse und Erdkrustenbewegung. Detailstudien wechselwirkender Prozesse in Atmosphäre (Luft), Hydrosphäre (Wasser) und Pedo-/Geosphäre (Boden) sowie Simulationen zur Vorhersage und Abwehr geophysikalischer Risiken sollen dabei entwickelt werden.

DESERVE baut auf die Helmholtz-Expertise in den Disziplinen „Atmosphäre und Klima“, „Erdkruste“ und „Wasser“ am KIT (Koordination), dem GFZ und dem UFZ auf. Weiterer Schwerpunkt ist die Förderung und Ausbildung junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, unter anderem mit Mentoring-Programmen sowie der Förderung von Start-Ups.



23. Oktober 2012: Prof. Christoph Kottmeier, DESERVE-Koordinator (KIT); Prof. Michael Weber (GFZ); Prof. Rami Hamdallah, Präsident der An Najah National University sowie Dr. Salam Fayyad, Ministerpräsident von Palästina (v.l.n.r.) (Foto: O. Bens, GFZ)

Beteiligt sind außerdem Partnereinrichtungen aus Israel, Jordanien, palästinensischen Gebieten und Deutschland.

Im Beisein des Ministerpräsidenten von Palästina, Dr. Salam Fayyad, wurde am 23. Oktober 2012 die erste permanente geophysikalische Multi-Parameterstation des DESERVE-Programms in Palästina eingeweiht, ein weiterer Schritt zum Aufbau eines Observatorien-Netzwerks um das Tote Meer, der bereits in einem DFG geförderten Projekt begonnen wurde. Am 21. Oktober wurde bereits die erste Station in Jordanien im Beisein des Direktors des staatlichen geologischen Dienstes NRA, Dr. Mousa Alzyoud, eröffnet. Die erste Station in Israel wird in Kürze eingeweiht. Die Daten der Messinstrumente (u. a. Breitband-Seismometer, Beschleunigungsmesser, GPS, Magnetotellurik) werden via Satellit direkt an das GFZ übertragen, wo sie den Partnern aus der Region, aber auch der internationalen Community, in Echt-Zeit zur Verfügung gestellt werden. ■

Kontakt:

Prof. Michael Weber
(mhw@gfz-potsdam.de)

Neue Helmholtz-Allianz

Die Helmholtz-Gemeinschaft fördert seit Juni 2012 vier neue Helmholtz-Allianzen, in denen Helmholtz-Zentren mit Universitäten und außeruniversitären Partnern ihre gebündelte Kompetenz einsetzen, um in strategisch wichtigen Forschungsfragen rasch Fortschritte und internationale Sichtbarkeit zu erreichen. Das GFZ ist an der Allianz „Remote Sensing and Earth System Dynamics“ beteiligt.

Ziel dieser Helmholtz-Allianz ist die Entwicklung innovativer Satellitenprodukte, wie sie von einer neuen Generation von Fernerkundungs-Satelliten geliefert werden können. Dabei gilt es, dyna-

mische Prozesse in der Geo-, Hydro-, Kryo- und Biosphäre zu quantifizieren, um globale Umweltveränderungen zu beobachten und zu verstehen. Künftige weltraumgestützte Fernerkundungssysteme werden hierfür entscheidende Daten in bisher nicht dagewesener räumlicher und zeitlicher Auflösung liefern. Die vier Forschungsschwerpunkte in der Allianz sind Geosphäre (topographische Veränderungen, Erdbeben und Vulkanismus), Hydrosphäre (Bodenfeuchte, Wasserkreislauf), Kryosphäre (Eisschmelze, Permafrost) und Biosphäre (insbesondere Erfassung der Wälder und Biomasseveränderungen, Kohlenstoffkreislauf).

Die Allianz wird die Kooperation zwischen den Helmholtz-Forschungsbereichen *Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr* und *Erde und Umwelt* ausbauen bzw. stärken sowie den Nukleus eines innovativen Netzwerks von mehr als 60 international anerkannten Forschungszentren und Universitäten bilden. Das GFZ leitet das Arbeitspaket „Geosphäre“ und ist wesentlich am Arbeitspaket „Hydrosphäre“ beteiligt. ■



Unterzeichnung des kanadisch-deutschen Kooperationsabkommens: Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel, kanadischer Minister für Wissenschaft und Technologie Gary Goodyear, Premierminister der Provinz Nova Scotia Darrel Dexter (stehend hinten); GEOMAR-Direktor Prof. Peter Herzig, Vize-Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft und GFZ-Vorstand Prof. Reinhard Hüttl und Vize-Präsidentin der Dalhousie-Universität Prof. Martha Crago (sitzend v.l.n.r.) (Foto: Dalhousie-Universität)

Deutsch-kanadische Kooperation in der Meeres- und Umweltforschung

In Gegenwart der deutschen Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel unterzeichneten das kanadische Halifax Marine Research Institute (HMRI) und die Helmholtz-Gemeinschaft mit den Zentren GFZ, GEOMAR und AWI am 17. August 2012 in Halifax, Kanada, ein Abkommen für eine mehrjährige intensive Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Meeres- und Umwelt-

forschung. In seiner Eigenschaft als Vizepräsident der Helmholtz-Gemeinschaft unterzeichnete Prof. Reinhard Hüttl, Sprecher des Vorstands des GFZ, das Memorandum. Neben der Bundeskanzlerin wohnten der kanadische Minister für Wissenschaft und Technologie, Gary Goodyear, und der Premierminister der Provinz Nova Scotia, Darrell Dexter,

der Zeremonie bei. Zu den anwesenden Gästen und Unterzeichnern der Vereinbarung gehörte auch GEOMAR-Direktor Prof. Peter Herzig. Neue Schwerpunkte der jetzt gestärkten transatlantischen Allianz sind insbesondere die zwei Netzwerke „Marine Environmental Observation, Prediction and Response (MEOPAR)“ und „ArcticNet“. ■



Links: HALO beim Start zur GeoHALO-Mission 2012; rechts: Flug-Magnetometer des GFZ im Einsatz auf HALO (Fotos: F. Barthelmes, GFZ)

Forschungsflugzeug HALO an die Wissenschaft übergeben

Am 20. August 2012 übergab Bundesforschungsministerin Dr. Annette Schavan ein weltweit einzigartiges Forschungsflugzeug an die Wissenschaft. Die feierliche Übergabe von HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) an die Wissenschaft fand im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) am Standort Oberpfaffenhofen statt. Neben ihrer Instrumentierung als Umwelt- und Atmosphärenforschungsflugzeug wird die Maschine auch als geophysikalisch-geodätisches Flugobservatorium eingesetzt. Mit HALO können großflächige Messungen vorgenommen werden, die Grundlage bieten, die Lücke zwischen Satellitenmessungen und Beobachtun-

gen am Boden zu schließen. Insbesondere die Erfassung des Erdschwerefelds und des Erdmagnetfelds werden damit vollständiger und präziser. Ein Beispiel dafür ist die Eisbedeckung der Antarktis. Eine klimabedingte Zu- oder Abnahme der Eismassen äußert sich in einer Änderung der Anziehungskraft vor Ort. Im Vergleich zu Satellitenmessungen kann HALO hier flächendeckend und mit zehnfacher Verbesserung der Genauigkeit messen. Bisher ist die Weltklimamaschine Antarktis aber in ihrem Zentralbereich nur völlig unzureichend vermessen worden. Hier soll HALO Abhilfe schaffen. Während der ersten, vom GFZ koordinierten Erprobungsmission GeoHALO im

italienischen Mittelmeerraum wurde diese verbesserte Messgenauigkeit bereits eindrucksvoll belegt. Diese Messkampagne, die von der TU Dresden, dem GFZ und weiteren Partnern durchgeführt wurde, zeigte, dass die kombinierte Messung von Schwerefeld, Magnetfeld, GPS-Reflektometrie und GPS-Atmosphärensondierung hervorragend zur Erfassung der Geo- und Klimadynamik geeignet ist. Gerade erst in der Kombination der geophysikalisch-geodätischen Flugmessungen ergibt sich das zusammenfassende Bild dieser relevanten Zustandsgrößen. Messungen mit HALO bilden daher das notwendige Verbindungsstück zu den unverzichtbaren Satellitenmessungen. ■

Deutsch-chinesische Forschungsgruppe

Das neue Förderprogramm „Helmholtz-CAS Joint Research Groups“ unterstützt Forschungsprojekte, bei denen deutsche und chinesische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eng kooperieren und dabei für zunächst drei Jahre mit bis zu 155 000 Euro pro Jahr finanziell unterstützt werden. Die Helmholtz-Gemeinschaft fördert jedes Team mit jährlich bis zu 120 000 Euro aus ihrem Impuls- und Vernetzungsfonds; die Chinesische Akademie der Wissenschaften (CAS) steuert jährlich bis zu 35 000 Euro bei. Insgesamt wurden in der ersten Förderrunde insgesamt fünf Projekte zur Förderung ausgewählt.

Eines davon ist die Forschungsgruppe „Space-borne microwave remote sensing for prevention and forensic analysis of natural hazards and extreme events“ von Prof. Stefan Hinz (KIT) und Prof. Doris Dransch (GFZ) sowie Prof. Yun Kai Deng und Prof. Robert Yu Wang vom Institute of Electronics in Peking. Die Forschergruppe zielt darauf, das Potenzial der durch weltraumgestützte Radar-Fernerkundung gewonnenen Daten zu Naturkatastrophen und Extremereignissen noch besser auszuschöpfen. Der Einsatz dieser Technologie erlaubt eine hochgenaue Datengewinnung unabhängig von Wetter- und Beleuchtungsverhältnissen.

Zur effizienten Datenauswertung verfolgen die Forscher den interdisziplinären Ansatz der „Visual Analytics“, der die automatische Datenanalyse mit manueller Interpretation verbindet. Das Projekt ist eng verbunden mit der Arbeit des von KIT und GFZ getragenen CEDIM (Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology).

Mit den Helmholtz-CAS Joint Research Groups stärkt die Helmholtz-Gemeinschaft die deutsche Forschung, indem sie hervorragende Kooperationspartner in China gewinnt. ■

Ausgezeichnet

Neue Berufungen und Ernennungen am GFZ



Seit 1. November 2012 hat das GFZ mit **Prof. Harald Schuh** einen neuen Direktor für das Department *Geodäsie und Fernerkundung*. Zudem übernimmt Herr Schuh die Leitung der Sektion *GPS/Galileo-Erdbeobachtungen*. Er war zuvor der Direktor des Instituts für Geodäsie und Geophysik an der Technischen Universität Wien. Schuh hat eine gemeinsame Berufung mit dem GFZ als Professor für Satelliten-Geodäsie an der TU Berlin. Harald Schuh ist unter anderem Experte für Langbasisinterferometrie (VLBI), Erdrotation, Geodynamik, Bezugssysteme des Erdkörpers sowie der Tropo- und Ionosphäre. Der Empfänger des Descartes-Preis 2003 ist zudem Vize-Präsident der International Association Geodesy (IAG) und Vorstand des International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) der IAG.

Am 31. Mai 2012 wurde **Prof. Gottfried Grünthal** feierlich zum Honorarprofessor an der Bauhaus-Universität Weimar ernannt. Seit 1992 ist Gottfried Grünthal als Leiter der Sektion *Erdbebengefährdung und Spannungsfeld* am GFZ tätig. Er ist einer der international anerkannten Experten auf dem Gebiet der Ingenieurseismologie und der Makroseismologie.

Prof. Niels Hovius wurde zum 1. August 2012 als Leiter der neu eingerichteten Sektion *Geomorphologie* gewonnen. Der international renommierte Geomorphologe wechselte von der Universität Cambridge an das GFZ und ist gemeinsam mit der Universität Potsdam berufen.

Ebenfalls mit der Universität Potsdam wurde **Prof. Michael Kühn** am 27. Sep-

tember 2012 für das Forschungsgebiet Hydrogeologie berufen. Michael Kühn leitet fortan am GFZ die neu eingerichtete Sektion *Hydrogeologie*. Seine bisherige Position, die Leitung des *Zentrums für CO₂-Speicherung*, wird seit 1. Oktober 2012 von **Dr. habil. Axel Liebscher** wahrgenommen.

Die TU Berlin hat zum 1. Oktober 2012 **Prof. Günter Zimmermann** (GFZ-Sektion *Reservoirtechnologien*) in Anerkennung seiner hervorragenden Leistungen in Forschung und Lehre zum Außerplanmäßigen Professor für Geohydraulik und Bohrlochgeophysik ernannt. ■

Wilhelm Heinrich zum Präsidenten der European Mineralogical Union gewählt



Prof. Wilhelm Heinrich, Leiter der GFZ-Sektion *Chemie und Physik der Geomaterialien*, wird als Präsident der European Mineralogical Union (EMU) die Amtsgeschäfte für die Periode 2012 bis 2016 führen. Der Rat der EMU wählte ihn anlässlich der 1. European Mineralogical Conference in Frankfurt, die vom 2. bis 6. September 2012 stattfand. Die EMU ist die Dachorganisation der 26 National Mineralogical Societies und vertritt die Mehrheit der europäischen Mineraloginnen und Mineralogen. ■

Patricius-Plakette und Nachwuchs-Förderpreise des GtV an GFZ-Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

Prof. Ernst Huenges, Leiter der Sektion *Reservoirtechnologien* und des *Internationalen Geothermiezentrums* am GFZ,

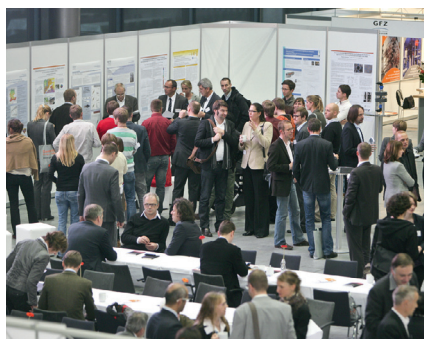
ist diesjähriger Preisträger der Patricius-Plakette des GtV-Bundesverbands Geothermie. Verbandspräsident Waldemar Müller-Ruhe überreichte ihm die Auszeichnung am 14. November 2012 auf dem Geothermiekongress in Karlsruhe. Ernst Huenges wurde insbesondere für die Schaffung eines grundlegenden Verständnisses für gesteinsphysikalische Parameter als Beitrag zum Nutzungskonzept geothermischer Energie gewürdigt sowie für den Aufbau des geothermischen Forschungslabors Groß Schönebeck mit den Möglichkeiten der Entwicklung von Stimulationstechniken in der Tiefen Geothermie sowie neuer Technologien, die dem Langzeitbetrieb geothermischer Anlagen dienen. Mit der Patricius-Plakette zeichnet der GtV-Bundesverband Geothermie seit 1994 Persönlichkeiten aus, die sich um die Entwicklung der Erdwärmennutzung verdient gemacht haben.



Der Präsident des GtV-Bundesverbands Geothermie Waldemar Müller-Ruhe (rechts) überreicht die Patricius-Plakette an Prof. Ernst Huenges (links) (Foto: J. Rösner)

Auf dem Geothermiekongress wurden zudem **Sven Fuchs** für seine Dissertation und **Anna Jentsch** für ihre Bachelorarbeit (beide GFZ/Univ. Potsdam) mit dem „Nachwuchs-Förderpreis für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler 2012“ des GtV ausgezeichnet. Mit dem Nachwuchs-Förderpreis ehrt der GtV-

Bundesverband Geothermie junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die am Anfang ihrer Karriere stehen und mit ihrer Bachelor-, Master-, Diplom- oder Doktorarbeit zur Weiterentwicklung der Geothermie beitragen. ■



An der Science Bar des GtV-Kongresses in Karlsruhe präsentierten junge Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler in ungezwungener Atmosphäre ihre Arbeiten und tauschten sich mit erfahrenen Akteuren der Geothermie aus. (Foto: J. Rösner)

EUSAR 2012 Award für TanDEM-X-Team und Dr. Rolf König

Auf der 9. „European Conference on Synthetic Aperture Radar“ (EUSAR) in Nürnberg wurde die TanDEM-X Mission für ihre „Achievements and Impact“ ausgezeichnet. Diese Auszeichnung geht explizit an alle beteiligten Einrichtungen und schließt auch die Beiträge von Dr. Rolf König sowie seiner Kolleginnen und Kollegen am GFZ-Standort Oberpfaffenhofen zur operationellen Bestimmung und Kalibrierung der Baselines ein. ■

Prof. Monika Koch-Müller zum Fellow der „Mineralogical Society of America“ ernannt

Frau **Prof. Monika Koch-Müller**, GFZ-Sektion *Chemie und Physik der Geomateri-*

alien, ist zum Fellow der „Mineralogical Society of America“ gewählt worden. Die MSA wählt Mitglieder für einen Fellowship aus, wenn sie erheblich zur Förderung der Mineralogie, Kristallographie, Petrologie, Geochemie, oder verwandter Wissenschaften beigetragen haben und deren wissenschaftlicher Beitrag mineralogische Studien oder Daten genutzt haben. Bereits im April dieses Jahres wurde Frau Koch-Müller in das DFG-Fachkollegium Geochemie, Mineralogie und Kristallographie gewählt. ■

Zwei Humboldt-Forschungspreisträger und ein Humboldt-Stipendiat am GFZ



Prof. Catherine Constable vom Institute of Geophysics and Planetary Physics an der Scripps Institution of Oceanography der University of California in San Diego, USA,

ist in diesem Jahr der Forschungspreis der Alexander von Humboldt-Stiftung verliehen worden. Der mit 60 000 Euro dotierte Preis ermöglicht es hochqualifizierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus dem Ausland, ein selbst gewähltes Forschungsvorhaben mit Fachkollegen in Deutschland für einen Zeitraum von bis zu einem Jahr durchzuführen.

Frau Constable ist eine der weltweit renommiertesten Forscherinnen auf dem Gebiet des Erdmagnetismus. Ihre Arbeiten trugen zu großen Fortschritten beim Verständnis der tief im Erdinnern ablaufenden Prozesse bei, die für die Erzeugung und die Änderungen des Erdmagnetfelds verantwortlich sind. Gastgeberin ist Dr. Monika Korte, Sektion *Erdmagnetfeld*. Gemeinsam mit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Sektion *Erdmagnetfeld* arbeitet sie an der Rekonstruktion der Erdmagnetfeldänderungen während

der letzten Jahrtausende, um insbesondere Schwächen unseres magnetischen Schutzschilds, wie im heutigen Gebiet der südatlantischen Anomalie oder während der magnetische Lascham-Exkursion besser zu verstehen.



Prof. Alan Levander von der RICE University, Houston, USA, ist einer der international führenden Wissenschaftler, der seismische Methoden und Geodynamik verbindet. 2012 wurde ihm von der Humboldt-Stiftung eine Wiedereinladung auf seinen 2006 verliehenen Humboldt-Forschungspreis bewilligt. Gastgeber ist Prof. Onno Oncken und die GFZ-Sektion *Dynamik der Lithosphäre*.

Levanders Thema ist die Verbindung methodischer Entwicklungen bei der seismischen Abbildung kontinentaler Lithosphäre mit groß angelegten Feldexperimenten zur Erforschung gebirgsbildender Prozesse und des Aufbaus der Erdkruste in geodynamisch aktiven Regionen. Zentrale Forschungsobjekte sind dabei in den letzten Jahren die nordamerikanische Kordillere und ihre Entwicklung als auch der karibische Plattenrand Südamerikas. Er wird gemeinsam mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am GFZ insbesondere auf den Feldern der Abbildung von Strukturen in der nordamerikanischen Lithosphäre, der Dynamik der Bildung von Hochplateaus und Plattenranderdbeben in Südamerika arbeiten.

Ebenfalls zu Gast in der Sektion *Dynamik der Lithosphäre* ist der Humboldt-Stipendiat Dr. Samuel Angiboust. Der Geodynamiker von der Université de Paris VI forscht zwei Jahre im Rahmen seines Post-Doc-Projekts „Subduction interface processes: the view from ophiolitic belts“. ■

Bücher und Medien

Recarbonization of the Biosphere Ecosystems and the Global Carbon Cycle

Lal, R.; Lorenz, K.; Hüttl, R.F.; Schneider, B.U.; von Braun, J. (Hrsg.)
Springer, 2012, 559 Seiten, engl.
ISBN 978-94-007-4158-4



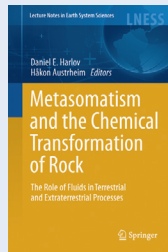
Über dieses Buch:

Das Buch beschreibt im globalen Kontext den Kohlenstoffkreislauf in terrestrischen Ökosystemen und das Potential sowie den Nutzen einer Rekarbonisierung der Biosphäre.

Als Folge der wachsenden Weltbevölkerung werden durch Landnutzung und Veränderungen der Landüberdeckung, aber vor allem durch das Verbrennen fossiler Rohstoffe wachsende Mengen Kohlendioxid in der Atmosphäre angereichert. Dieser Prozess verändert in großem Maß den natürlichen Kohlenstoffkreislauf im globalen Maßstab und damit das System Erde als Ganzes. Die Rekarbonisierung der Biosphäre ist eine mögliche Strategie, hier gegenzusteuern und Ozeane sowie vor allem terrestrische Systeme wieder verstärkt als Kohlenstoffsinken zu nutzen. Der Schutz und der weitere Ausbau landbasierter Kohlenstoffsinken können darüber hinaus einen Beitrag zur Anpassung von Nutzungssystemen an den Klimawandel und damit für eine nachhaltige Nahrungsmittelsicherheit leisten. ■

Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock The Role of Fluids in Terrestrial and Extraterrestrial Processes

Serie: Lecture Notes in Earth System Sciences
Harlov, D. E.; Austrheim, H. (Hrsg.)
Springer, 2012, 806 Seiten, engl.
ISBN 978-3-642-28393-2



Über dieses Buch:

Durch Fluide unterstützter Massentransport und anschließende Wiederherstellung des Mineralgleichgewichts sind zwei wichtige Merkmale der Metasomatose, ohne die sie nicht stattfinden kann. Gemeinsam mit eruptiven und tektonischen Prozessen spielte die Metasomatose bei der Entstehung, weiteren Entwicklung und anschließenden Stabilisierung der kontinentalen und ozeanischen Kruste sowie des lithosphärischen Mantels in der Erdgeschichte eine wichtige Rolle. Das Buch fasst den aktuellen Stand der Forschung zu diesem Themenbereich zusammen. ■

Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel

Grünewald, U.; Bens, O.; Fischer, H.; Hüttl, R. F.; Kaiser, K.; Knierim, A. (Hrsg.)
Schweizerbart, 2012, 299 Seiten
ISBN 978-3-510-65274-7



Über dieses Buch:

Der allgegenwärtige Landschafts- und Klimawandel hat vielfältige Auswirkungen auf unsere Umwelt. Wie beeinflussen "wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen" in Regionen und Flusseinzugsgebieten Deutschlands diese Auswirkungen?

Anhand praktischer Beispiele zeigen die Autoren, dass der Klimawandel real ist und wir auf Jahrzehnte hinaus mit diesem Problem konfrontiert sein werden. Weil die Klimaveränderung nicht beherrschbar ist, muss sich die Gesellschaft anpassen. Notwendige Anpassungsmaßnahmen zur Erhaltung der Ressource Wasser erweisen sich als regionale und lokale Herausforderung. Sie erfordern Handeln auf verschiedenen Ebenen: auf lokaler Ebene und im Bereich der Flüsse und Flusseinzugsgebiete; deshalb bedarf es der Abstimmung zwischen Bund, Land und Kommunen. Die Autoren stellen dar, welche Maßnahmen z. B. in der brandenburgischen Lausitz – durch Braunkohlebergbau wasser- und stoffhaushaltlich nachhaltig beeinträchtigt – umgesetzt werden, und verdeutlichen, dass der Klimawandel weiteren Handlungsbedarf erforderlich macht. Notwendige und optionale Wassermanagement-Maßnahmen werden am Beispiel des Rheins und der Elbe aufgezeigt und anhand der gegenwärtigen und der künftigen Ziel-Situation – u. a. im „wasserreichen“ Freistaat Bayern und im „wasserarmen“ Nordostdeutschland – umfassend diskutiert. Die Autoren erörtern ausführlich neue Ansätze und Instrumente zur gesellschaftlichen Steuerung wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen, z. B. in Form intensiver Öffentlichkeits-