

# System Erde

GFZ-Journal

**GFZ**

Helmholtz-Zentrum  
**POTS DAM**

2015 – Heft 1

SCHWERPUNKT

Geo-Bio-Wechsel-  
wirkungen im  
System Erde





## Titelbild

Krustenflechte (*Placopsis contortuplicata*) mit Grünalgen auf einer Gesteinsoberfläche in der Antarktis (Livingston-Insel, Südliche Shetlandinseln, Westantarktis). Die tieforangefarbenen Stellen beinhalten außerdem Cyanobakterien. Krustenflechten gehören zu den Erstbesiedlern von Extremstandorten wie den eisfreien Gebieten in der Antarktis und spielen daher eine wichtige Rolle für die weitere Entwicklung der Habitate. Aufgrund ihrer extremen Anpassungsfähigkeit und nachgewiesenen Weltraumresistenz sind sie auch für astrobiologische Fragestellungen von Interesse (siehe Beitrag Wagner et al. in diesem Heft).

Foto: Prof. Dirk Wagner, GFZ

## Impressum

### Herausgeber:

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

Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

### Redaktion:

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

### Layout:

Grit Schwalbe, GFZ

### Druck:

Brandenburgische Universitätsdruckerei, Golm

© Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ 2015  
ISSN 2191-8589



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

# Editorial

## Geo-Bio-Wechselwirkungen im System Erde



Die Erde ist bisher der einzige Planet, von dem wir wissen, dass er Leben trägt. Dieses Leben weist zudem eine unglaubliche Vielfalt auf, die uns einzigartig erscheint. Aber lassen wir die Statistik sprechen: Es bedarf zahlloser stochastischer Prozesse, damit Leben sich entwickeln kann, entsprechend gering ist die Wahrscheinlichkeit, dass es entsteht. Nun offenbart uns der Blick ins sichtbare Weltall etwa 100 bis 150 Milliarden Galaxien, von denen jede zwischen 100 und 300 Milliarden Sonnen aufweist. Überlegt man dazu, dass Wasser im Weltall ein ubiquitärer Stoff ist, bringt uns das Gesetz der großen Zahl schnell dazu, dass die statistische Wahrscheinlichkeit von – vielleicht sogar höher entwickeltem – Leben

„dort draußen“ sehr hoch ist, wir haben es nur noch nicht entdeckt. Es uns übrigens wohl auch nicht. Auch unser eigener Planet überrascht uns mit einer noch vor kurzem unbekannt tiefen Biosphäre, und die Quantität an Biomasse, die in Sedimenten und Gesteinen des tiefen Untergrunds lebt, war ebenfalls eine erstaunliche Entdeckung, denn sie umfasst vermutlich die gleiche Größenordnung wie die Biomasse auf der Erdoberfläche.

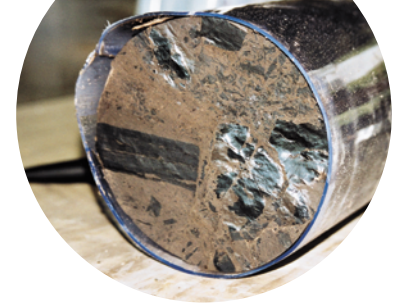
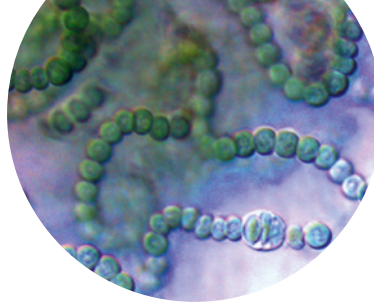
Wir wissen nicht, wie das Leben auf der Erde entstand, exogen durch kosmisches Bombardement oder endogen durch Selbstorganisation im System Erde. Die ersten, sehr einfach aufgebauten Mikroorganismen wurden in Gestein aus Grönland nachgewiesen und hinterließen vor rund 3,8 Milliarden Jahren ihre Kohlenstoff-Signaturen. Damals war die Erde sauerstofffrei, ihre Atmosphäre bestand vor allem aus Methan und Kohlendioxid. Diese Mikrolebewesen hatten einen auf Methan und Schwefelwasserstoff beruhenden Stoffwechsel, der demjenigen ähnelt, den die tiefe Biosphäre heute noch aufweist. Mit der Erfindung der Photosynthese erobert sich das Leben die Oberfläche des Planeten, ohne den Untergrund aufzugeben. Der Sauerstoff veränderte auch die Chemie der Erde und hat die Evolution der Minerale maßgeblich beeinflusst. Von den frühen Spuren über die ersten Vielzeller, etwa 1,7 Milliarden Jahre später, entwickelte sich das Leben auf unserem Planeten so weit, dass es vor 540 Millionen Jahren mit der Kambrischen Explosion schlagartig zu einer gewaltigen Vielfalt an Lebensformen kam.

Die Vielfalt und Dynamik des Subsystems „Biosphäre“ und seine Wechselwirkungen mit den anderen Teilsystemen beginnen wir gerade erst zu begreifen. So nahm man bis vor einigen Jahren an, dass das Gestein im Wesentlichen mechanisch und chemisch verwittert; heute wissen wir, dass biologische Prozesse darin eine bedeutende Rolle spielen. Das Konzept der „Critical Zone“ umfasst die geobiochemischen, geologischen und physikalischen Vorgänge, die im Bereich von der Erdoberfläche bis zum Grundgestein vor sich gehen. Wir haben es hier mit hochkomplizierten Prozess- und Verzweigungsketten zu tun, die das Gesicht der Erde genauso prägen wie die Tektonik. Mehr noch: Tektonik und geobiochemische Abläufe sind durchaus gekoppelt, beispielsweise kontrolliert mikrobielles Leben offenbar den Sauerstoffgehalt des sedimentären Meeresbodens bis in den darunter liegenden Basalt hinein mit entsprechender Relevanz für Ozeanbecken und ozeanische Subduktionszonen. Dazu passt, dass Plattentektonik auch als Voraussetzung für die Entwicklung von Leben auf Planeten diskutiert wird.

Die vorliegende Ausgabe des GFZ-Journals stellt die Forschungsarbeiten des GFZ auf diesem hochkomplexen Gebiet der Geo-Bio-Wechselwirkungen vor, das noch weites Neuland mit vielen Fragen aufweist und die sich nur im Zusammenspiel verschiedener Disziplinen beantworten lassen.

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

Dr. Stefan Schwartze  
Administrativer Vorstand

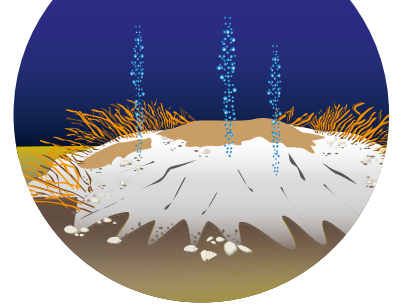


# Inhalt

- 6** Die tiefe Biosphäre  
*Jens Kallmeyer*
- 12** Nahrungsgrundlage für eine tiefe Biosphäre  
*Kai Mangelsdorf*
- 18** Molekulare Indikatoren für die Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe der Erde  
*Dirk Sachse*
- 22** Mehr Moor?  
Zur Treibhausgasdynamik wieder-vernässter Feuchtgebiete  
*Torsten Sachs, Franziska Koebsch, Daniela Franz, Eric Larmanou, Andrei Serafimovich, Katrin Kohnert, Gerald Jurasinski, Jürgen Augustin*

## 48 Netzwerk

- 48 Mikroben im Sediment: wenig Nährstoff, viel Sauerstoff
- 49 Treibhausgase im Ungleichgewicht  
Wie menschliche Eingriffe Feuchtgebiete verändern
- 50 Der Monsun ändert die Tektonik  
Neuer klima-tektonischer Kopplungsmechanismus entdeckt
- 51 Angehobene Insel  
Die Insel Isla Santa María im Süden Zentralchiles dokumentiert einen kompletten seismischen Zyklus
- 52 Aufstieg oder nicht?  
Wie heißes Gestein im Erdmantel gebremst wird
- 53 Erfolgreich: Zement auf Kohlendioxid  
Abschlussphase des Projekts zur geologischen Speicherung von CO<sub>2</sub>
- 54 Klimawandel in Mittelamerika:  
Präkolumbianische Stadt stirbt aus
- 54 Alle GNSS-Satelliten gleichzeitig operationell ausgewertet



28

### Mikrobiologische Prozesse in CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanälen

*Mashal Alawi, Tobias Nickschick, Horst Kämpf*

34

### Die Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Gashydraten

*Manja Luzi-Helbing, Kai Mangelsdorf,  
Dirk Wagner, Judith M. Schicks*

40

### Astrobiologie – dem Leben im Universum auf der Spur

*Dirk Wagner, Jean-Pierre de Vera,  
Jasmin Joshi, Thomas Leya,  
Dirk Schulze-Makuch*

- 55 Hazard and Risk Team des GFZ im Einsatz
- 56 Helmholtz-Enterprise-Ausgründung: TRIDEC Cloud
- 56 Neue Projekte
- 59 Internationale Zusammenarbeit
- 61 Internationale Besuche am GFZ

62 **Ausgezeichnet**

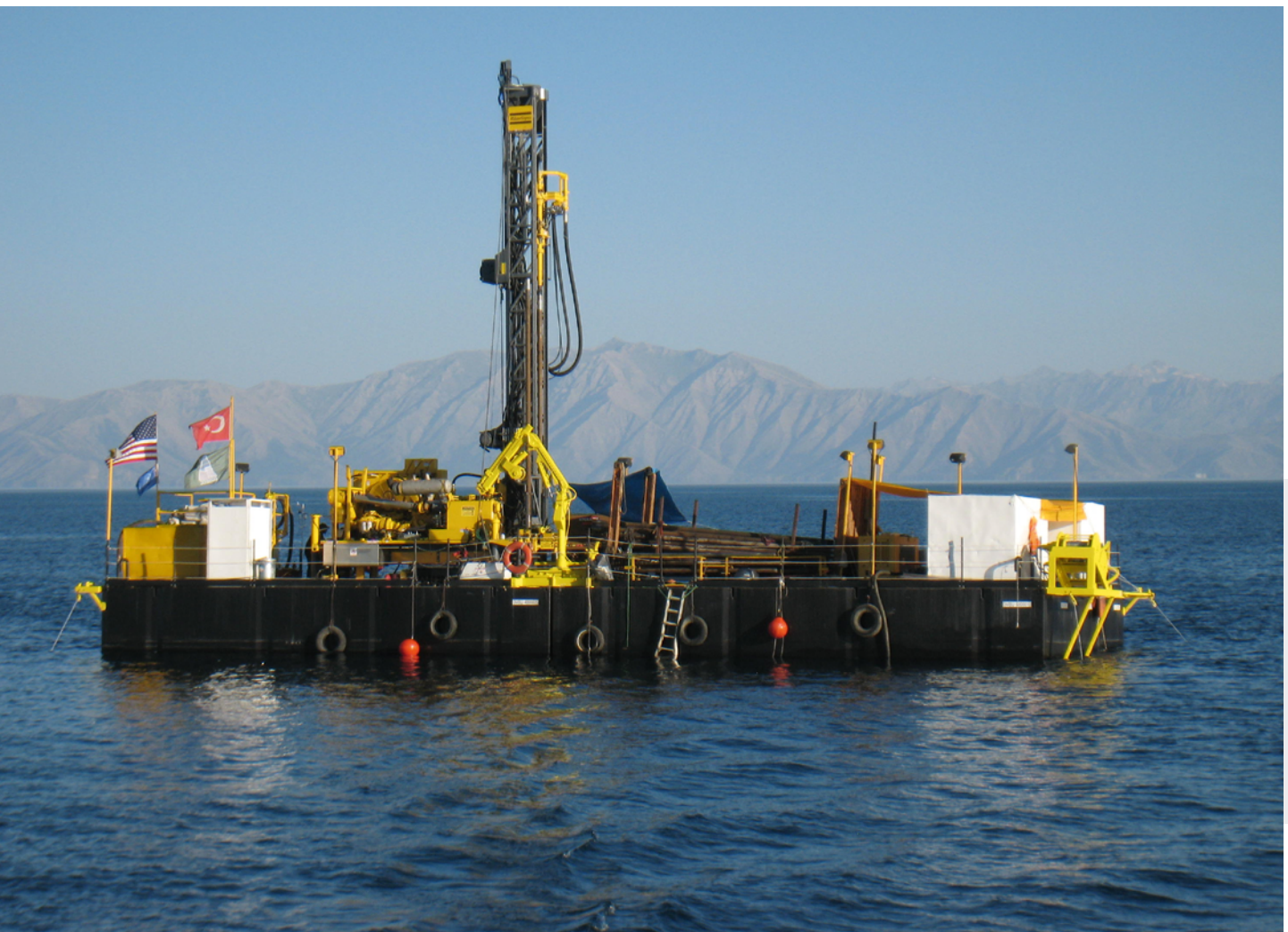
65 **Bücher und Medien**

# Die tiefe Biosphäre

*Jens Kallmeyer*

*Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

*Since the early days of Deep Biosphere research almost 100 years ago, this research field has gained momentum over the last 30 years. Much new information could be gained, some of it challenged our concepts about the limits of life and the mechanisms of global biogeochemical cycles. Besides the scientifically motivated questions, there are many applied aspects that play a major role in this research area. Industrial utilization of the deep subsurface is rapidly increasing, and decisions about utilization concepts require a profound knowledge about the processes that control these environments. Much of this process understanding is still lacking. Additional to research on processes, GFZ cultivates previously unknown microbes from deep biosphere environments. These organisms allow studying the adaptations to the peculiar environmental conditions and isolation of novel biomolecules with potential biotechnological applications.*



## Was ist die tiefe Biosphäre?

Die tiefe Biosphäre stellt das größte zusammenhängende Ökosystem der Erde dar. Ihr Habitat, die Porenräume in Sedimenten sowie Klüfte und Spalten im Festgestein, durchziehen die gesamte Erdkruste mit einem kontinuierlichen Netzwerk.

Über den Anteil der Bewohner der tiefen Biosphäre an der gesamten lebenden Biomasse auf der Erde gibt es verschiedene Schätzungen, die leider aufgrund der zum Teil spärlichen Datenlage mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Im Allgemeinen wird angenommen, dass bis zu 20% des in lebenden Organismen gespeicherten Kohlenstoffs in der tiefen Biosphäre steckt (Kallmeyer *et al.*, 2012).

## Die Erforschung der tiefen Biosphäre

Bereits in den 1920er Jahren ließen sich in den Produktionswässern von schwefelwasserstoffhaltigen Ölfeldern Mikroben nachweisen. Eine weitere Arbeit konnte in den 1950er Jahren zeigen, dass selbst in der Tiefsee bis in mehreren Metern Sedimenttiefe Mikroben vorkommen. Der Begriff „tiefe Biosphäre“ wurde 1994 zum ersten Mal in der Literatur verwendet (Parkes *et al.*, 1994). In den letzten zwanzig Jahren hat sich die Erforschung des Lebens im tiefen Untergrund von einem Nischenthema zu einer wichtigen Forschungsrichtung entwickelt. Auf der wissenschaftlichen Seite beschäftigen sich zwei internationale Programme mit der Erforschung des tiefen Untergrunds durch Bohrungen: das landbasierte Internationale Kontinentale Bohrprogramm (International Continental Scientific Drilling Program, ICDP), welches am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ koordiniert wird, und das Tiefseebohrprogramm Integrated Ocean Discovery Program (IODP),

Links: Bohrprojekt des International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) am Vansee, Türkei. Im Rahmen dieses Projekts wurden neben biogeochemischen Analysen auch mikrobiologische Untersuchungen durchgeführt. (Foto: F. Anselmetti, Universität Bern)

Left: ICDP drilling project at Lake Van, Turkey. As part of this project biogeochemical and microbiological analyses were carried out.



**Kontakt:** J. Kallmeyer  
(jens.kallmeyer@gfz-potsdam.de)

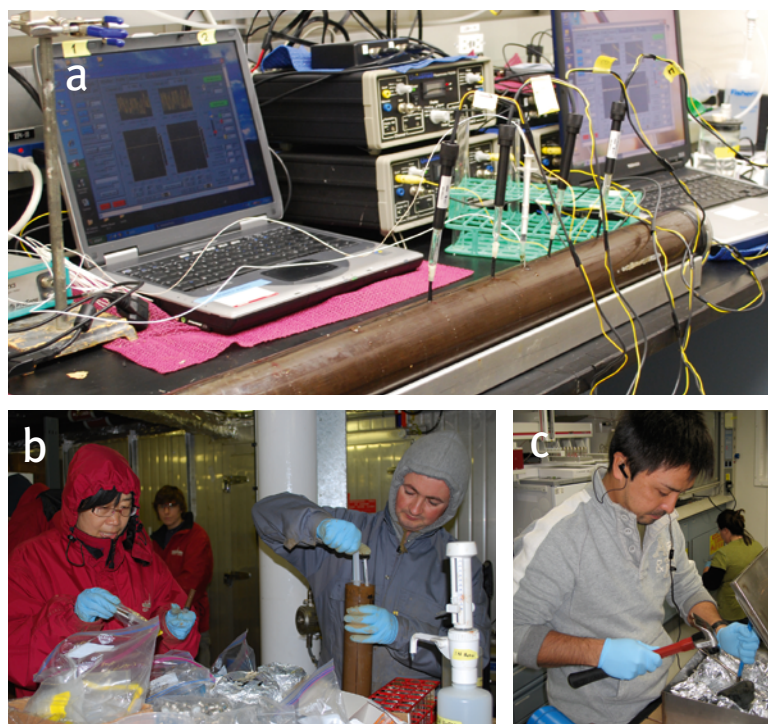


Abb. 1: Die Anzahl und Aktivität der Mikroben des tiefen Untergrunds ist wesentlich niedriger als an der Erdoberfläche, außerdem reagieren sie sehr empfindlich auf eine Veränderung der Lebensbedingungen. Daher ist es sehr wichtig, eine Kontamination mit Mikroben von der Oberfläche auszuschließen und die Proben während der Verarbeitung möglichst wenig zu verändern.

a) Einige wichtige Parameter zum Verständnis der physikalischen und chemischen Bedingungen in der tiefen Biosphäre, wie hier z. B. die Sauerstoffkonzentration in einem Sedimentkern, können auf speziell ausgestatteten Bohrschiffen mit Mikroelektroden direkt nach der Entnahme des Bohrkerns gemessen werden.

b) Da wichtige Messparameter von der Temperatur abhängen, müssen die Arbeiten unter Umgebungstemperatur durchgeführt werden. An Bohrkernen aus der Tiefsee finden die Arbeiten daher im Kühlraum bei 4 °C statt.

c) Dr. Yohei Suzuki von der Universität Tokyo beim Zerlegen eines frisch erbohrten Basaltkerns aus der ozeanischen Kruste. Um an unkontaminiertes Material zu gelangen, muss die äußere Schicht der Probe mit Hammer und Meißel entfernt werden. Beim Sägen würde aufgrund der Wasserkühlung die Kontamination weiter in das Gestein eindringen. (Fotos: J. Kallmeyer, GFZ)

Fig. 1: Numbers and activity of subsurface microbes are much lower than in surficial samples. Moreover, these microbes react sensitively to changes in environmental conditions. It is therefore very important to avoid any contamination with surface microbes and to disturb the samples as little as possible during processing.

a) Some parameters, which are important for our understanding of the physical and chemical conditions in the deep biosphere, like for example oxygen concentration in a sediment core, can be measured immediately after retrieval of the core on board the drill ship.

b) Many important parameters depend on temperature, therefore all processing has to be carried out at in-situ temperature. For drill cores from the deep sea this means that all work has to be carried out at 4 °C in the cold room.

c) Dr. Yohei Suzuki from the University of Tokyo sections a freshly drilled piece of basalt from the oceanic crust. The outer layer has to be removed by hammer and chisel to obtain uncontaminated material. Sawing requires water cooling, which would transport contamination further into the sample.

Abb. 2: Das mobile Geomikrobiologielabor BugLab des GFZ bei der Verladung am Vansee, Türkei. Mit dem BugLab steht auch an abgelegenen Standorten ein komplett ausgestattetes Mikrobiologielabor zur Verfügung. (Foto: J. Kallmeyer, GFZ)

Fig. 2: Offloading the mobile geomicrobiology laboratory BugLab of GFZ at Lake Van, Turkey. The BugLab provides a fully equipped microbiological laboratory even at very remote locations.

welches schon diverse Vorgängerprogramme hatte (DSDP, ODP) und nun seit rund 40 Jahren kontinuierlich betrieben wird. Es handelt sich dabei um eines der weltweit ältesten internationalen Forschungsprojekte. Die erste ODP-Bohrkampagne, die speziell zur Erforschung der tiefen Biosphäre durchgeführt wurde, fand 2002 im Auftriebsgebiet vor Peru statt. Die beiden vom IODP betriebenen Bohrschiffe sind mit geomikrobiologischen Laboratorien ausgestattet (Abb. 1).

Das ICDP als terrestrisches Partnerprogramm fing erst mit gewisser Verzögerung an, die Erforschung der tiefen Biosphäre in sein Forschungsprogramm aufzunehmen. Im Sommer 2015 wurde im Rahmen eines ICDP-Projekts erstmals ein eigener Kern für geomikrobiologische und geochemische Untersuchungen gebohrt. An dieser Bohrkampagne am Towutisee, Indonesien, sind insgesamt fünf geochemisch und geomikrobiologisch arbeitende Gruppen beteiligt, darunter auch das GFZ, welches das mobile Geomikrobiologie-Labor „BugLab“ zur Verfügung stellt (Abb. 2). Weitere Bohrprojekte mit einem starken geomikrobiologischen Schwerpunkt sind derzeit in Planung.

Seit etwa fünfzehn Jahren beteiligt sich das GFZ an Forschungsprojekten zur tiefen Biosphäre: Das Feld reicht von marinen Bohrungen im Rahmen von IODP und seinen Vorläufern (*Horsfield et al., 2006; Mangelsdorf et al., 2011*), über terrestrische

Bohrungen im Rahmen von ICDP (*Bischoff et al., 2013; Glombitza et al., 2013*) und eigenfinanzierten Bohrungen (*Fry et al., 2009*) sowie im Permafrost (*Mangelsdorf et al., 2005*) und in tiefen südafrikanischen Goldminen (*Lippmann et al., 2003*). Neben diesen eher im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelten Forschungsprojekten wird auch anwendungsbezogen geforscht, z. B. im Themenfeld der CO<sub>2</sub>-Untergrundspeicherung (*Wandrey et al., 2010*).

Neben dem rein wissenschaftlichen Interesse an der Erforschung der tiefen Biosphäre zeigt die Industrie ein großes Interesse an dieser Forschungsrichtung, da auch sie den tiefen Untergrund immer stärker nutzt. Die Nutzung ist vielfältig: sie reicht von der Ausbeutung von Lagerstätten, die Nutzung oder Speicherung von Wärme, bis hin zur langfristigen Einlagerung von Abfällen. Alle diese Nutzungen beanspruchen einerseits Platz im Untergrund, so dass möglicherweise Konflikte mit zunehmender Nutzungsintensität entstehen; andererseits können ohne eine genaue Kenntnis der dort ablaufenden Prozesse keine Aussagen über die langfristigen Auswirkungen der Untergrundnutzung gemacht werden. Gerade die langfristige Sicherheit von geotechnischen Eingriffen in den Untergrund ist von großer gesellschaftlicher Relevanz, wie in jüngster Zeit die Diskussionen um die Lagerung von CO<sub>2</sub> und radioaktivem Abfall oder die Nutzung von Fracking und Geothermie zeigen.



## Technische Herausforderungen

Während sich die Biosphäre an der Oberfläche relativ einfach untersuchen und über Satellitendaten und Monitoring-Stationen auch in der Fläche relativ gut erfassen lässt, ist man bei der Erforschung der tiefen Biosphäre immer auf Bohrungen angewiesen (Abb. 3). Diese sind mit einem hohen finanziellen und logistischen Aufwand verbunden und liefern zudem nur Informationen über ein räumlich sehr kleines Gebiet. Eine Erfassung der Heterogenität in der Fläche ist nur schwer möglich. Doch nicht nur die Heterogenität stellt die Wissenschaft vor ein Problem. Im Vergleich zum Leben an der Oberfläche läuft das Leben in der Tiefe in extrem verminderter Geschwindigkeit ab. Zum einen haben die im Untergrund lebenden Mikroben einen deutlich langsameren Stoffwechsel, zum anderen gibt es viel weniger Zellen. Durch diese beiden Faktoren sinken die Umsatzraten pro Sedimentvolumen drastisch ab.

Hier lässt sich z. T. durch Modellierung Abhilfe schaffen. Am Computer ist es möglich, viele Vorgänge zu simulieren und somit ein verbessertes Verständnis der ablaufenden Prozesse zu erzielen. Trotz aller Fortschritte auf diesem Gebiet kann jedoch eine Modellierung nur so gut sein, wie die Messwerte, auf denen sie aufbaut. Darüber hinaus ist es natürlich notwendig, die in der Natur ablaufenden Prozesse erst einmal verstanden zu haben, bevor man sie modellieren kann. Trotz aller Fortschritte bei der Modellierung ist daher die Gewinnung von Proben durch Tiefbohrungen unerlässlich.

## Warum wird die tiefe Biosphäre erforscht?

Wie dargestellt, ist die tiefe Biosphäre nicht nur das größte zusammenhängende Ökosystem der Erde und enthält einen signifikanten Anteil an der globalen lebenden Biomasse und viele wichtige Ressourcen, sondern sie stellt auch unser generelles Verständnis über die Bedingungen für Leben im Allgemeinen auf den Prüfstand. Die Erforschung der tiefen Biosphäre zielt auf Antworten zu den folgenden Fragen:

- Wie verbreitet und divers ist das Leben in der tiefen Biosphäre und was sind die Grenzen des Lebens?
- Welche metabolische Aktivität und Kapazität hat das Leben in der tiefen Biosphäre; welche Formen von Kohlenstoff und Energiequellen werden von den Organismen genutzt?
- Welche evolutiven Anpassungen und Überlebensstrategien haben die Organismen der tiefen Biosphäre?
- Welche natürlichen Ressourcen entstehen durch biologische Aktivität bzw. werden durch sie vernichtet; gibt es biotechnologische Applikationen von Organismen oder Metaboliten aus der tiefen Biosphäre?
- Welche Interaktionen gibt es zwischen der Geosphäre und der tiefen Biosphäre und auf welchen Zeitskalen laufen sie ab? Haben diese Prozesse einen Einfluss auf das Klima?
- Ist die tiefe Biosphäre ein Modell für die frühe Erde und/oder das Leben auf anderen Planeten?

Jede dieser Fragen ist in zahlreichen Studien behandelt worden, und viele neue Erkenntnisse konnten gewonnen werden. Aber dennoch ist auch nach 30 Jahren Forschung das Wissen noch bei Weitem nicht auf dem gleichen Stand wie etwa im Bereich der erdoberflächennahen Systeme. Dieser Mangel ist nicht nur wissenschaftlich unbefriedigend, er erschwert auch die Aussagen über die langfristigen Effekte von menschlichen Eingriffen in den Untergrund und führt deutlich vor Augen, dass es in diesem Forschungsfeld keine scharfe Trennung zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung gibt.

So wurde in einem Kooperationsprojekt des GFZ mit dem norwegischen Explorationskonzern Lundin Petroleum festgestellt, dass die geophysikalischen Daten, die auf massive natürliche Gasaustritte hindeuteten, falsch waren. Nur durch aufwändige biogeochemische Analysen konnte erklärt werden, wie und wann sich die massiven Strukturen am Meeresboden gebildet haben und warum sie momentan inaktiv sind. Neben dem ökonomisch wichtigen Resultat, dass sich wahrscheinlich kein großes Gasfeld im Untergrund befindet, konnten wertvolle Daten für die Interpretation von organisch-geochemischen Parametern gewonnen werden, welche für die generelle Interpretation von tiefen marinen Sedimenten genutzt werden können (Nickel *et al.*, 2013).

## Grenzen für das Leben

Grenzen für das Leben im Untergrund werden nach bisherigem Wissen nur durch die Temperatur gesetzt. Noch für keinen chemischen oder physikalischen Parameter konnte die absolute Grenze für das Leben gefunden werden. Auch bei anderen Parametern wie Druck oder pH-Wert sind wir noch weit davon entfernt, die absoluten Grenzen zu kennen. Im Labor wurden Mikroben bereits Drücken ausgesetzt, die normalerweise in Hunderten von Kilometern Tiefe herrschen – einem Bereich, in dem die Temperatur auf der Erde auf jeden Fall weit außerhalb des biologischen Bereichs liegt. Zumindest einige Zellen überlebten diese Behandlung.

Extreme pH-Werte sind ein anderes, weitgehend unerforschtes Feld. Bisher wurde noch in keinem natürlich vorkommenden Ökosystem ein pH-Wert gefunden, der Leben unmöglich macht. Selbst bei extremen Werten unter pH 1 können einige Mikroben noch gut leben (Schleper *et al.*, 1995); nach oben scheint die Grenze bei ca. pH 12,5 zu liegen (Takai *et al.*, 2005). Es gibt zwar noch höhere pH-Werte, die Skala geht bis 14, aber in der Natur kommen sie nicht vor.

Die tiefe Biosphäre zeichnet sich in den meisten Fällen durch extreme Nährstoffarmut aus. Daher ist eine der zentralen Fragen, wie die Organismen unter diesen Bedingungen überleben können und ob es irgendwo auf bzw. in der Erde Bedingungen

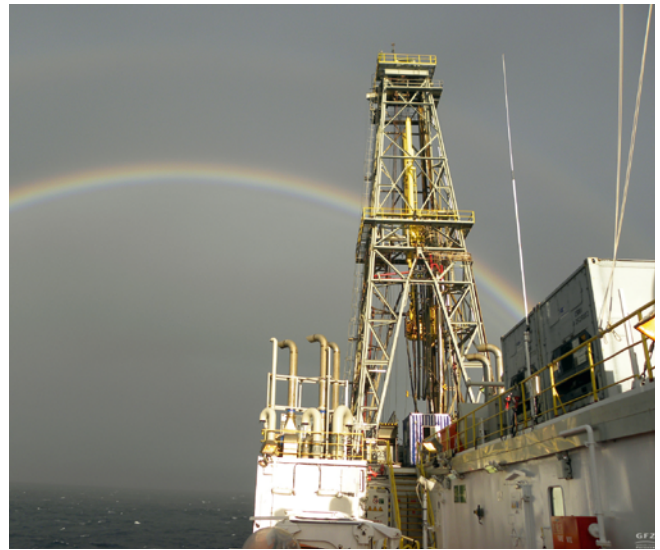
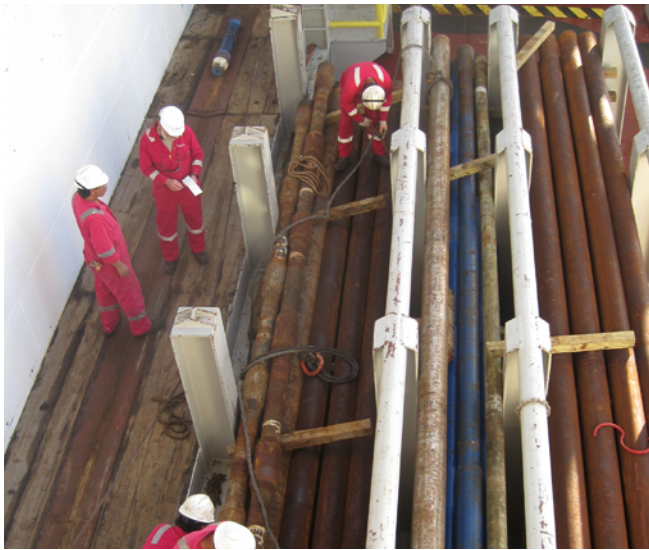


Abb. 3: Unabhängig davon, ob man an Land oder in den Meeresboden bohrt, eine Bohrung erfordert immer einen hohen logistischen, technischen und finanziellen Aufwand. Links: Die Bohrmannschaft des IODP-Bohrschiffs JOIDES Resolution bei der Kontrolle des Bohrgestänges. Das Schiff hat über 12 km Gestänge geladen. Rechts: Bohrturm auf der JOIDES Resolution (Fotos: J. Kallmeyer, GFZ)

Fig. 3: Irrespective of land or at sea, drilling requires great logistical, technical and financial resources. The drilling crew of the IODP drill ship JOIDES Resolution inspects the drill string, the ship has over 12 km of string. Right: The drilling rig of the JOIDES Resolution

gibt, wo die Nährstoffversorgung so minimal ist, dass die mikrobielle Population „ausgehungert“ wird. Selbst in Sedimenten, die bis zu 100 Mio. Jahre alt sind und kontinuierlich unter sauerstoffhaltigen Bedingungen lagerten, fand sich noch Leben (D'Hondt et al., 2015).

## Ausblick

Die tiefe Biosphäre ist ein faszinierendes Forschungsfeld, welches neben vielen neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen auch eine zunehmende gesellschaftliche Relevanz besitzt. Neues Probenmaterial lässt sich dabei nur durch Bohrungen erhalten, was mit einem hohen Aufwand verbunden ist. Während die beiden wissenschaftlichen Bohrprogramme IODP und ICDP eine wichtige Quelle für Proben sind, sollten auch andere Möglichkeiten, wie z. B. Kooperationen mit Industriepartnern genutzt werden. Der immer noch bestehende Mangel an grundlegendem Prozessverständnis erfordert, dass wissenschaftliche und angewandte Fragestellungen gleichermaßen betrachtet werden sollten.

## Literatur

- Bischoff, J., Mangelsdorf, K., Gattinger, A., Schloter, M., Kurchatova, A. N., Herzsuh, U., Wagner, D. (2013): Response of methanogenic archaea to late pleistocene and holocene climate changes in the siberian arctic. - *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 2, p. 305-317.
- D'Hondt, S., Inagaki, F., Zarikian, C. A., Abrams, L. J., Dubois, N., Engelhardt, T., Evans, H., Ferdelman, T., Gribsholt, B., Harris, R. N., Hoppie, B., Hyun, J.-H., Kallmeyer, J., Kim, J., Lynch, J. E., McKinley, C., Mitsunobu, S., Morono, Y., Murray, R. W., Pockalny, R., Sauvage, J., Shimono, T., Shiraishi, F., Smith, D. C., Smith-Duque, C., Spivack, A. J., Steinsbu, B. O., Suzuki, Y., Szpak, M., Toffin, L., Uramoto, G., Yamaguchi, Y. T., Zhang, G.-L., Zhang, X.-H., Ziebis, W. (2015): Presence of oxygen and aerobic communities from sea floor to basement in deep-sea sediments. - *Nature Geoscience*, 8, p. 299-304.
- Fry, J. C., Horsfield, B., Sykes, R., Cragg, B. A., Heywood, C., Tae Kim, G., Mangelsdorf, K., Mildenhall, D. C., Rinna, J., Vieth-Hillebrand [Vieth], A., Zink, K.-G., Sass, H., Weightman, A. J., Parkes, R. J. (2009): Prokaryotic populations and activities in an interbedded coal deposit, including a previously deeply buried section (1.6-2.3 km) above 150 Ma basement rock. - *Geomicrobiology Journal*, 26, 3, p. 163-178.
- Glombitza, C., Stockhecke, M., Schubert, C. J., Vetter, A., Kallmeyer, J. (2013): Sulfate reduction controlled by organic matter availability in deep sediment cores from the saline, alkaline Lake Van (Eastern Anatolia, Turkey). - *Frontiers in Microbiology*, 4, 209.
- Horsfield, B., Schenk, H. J., Zink, K.-G., Ondrak, R., Dieckmann, V., Kallmeyer, J., Mangelsdorf, K., di Primio, R., Wilkes, H., Parkes, R. J., Fry, J., Cragg, B. (2006): Living microbial ecosystems within the active zone of catagenesis: implications for feeding the deep biosphere. - *Earth and Planetary Science Letters*, 246, 1-2, p. 55-69.

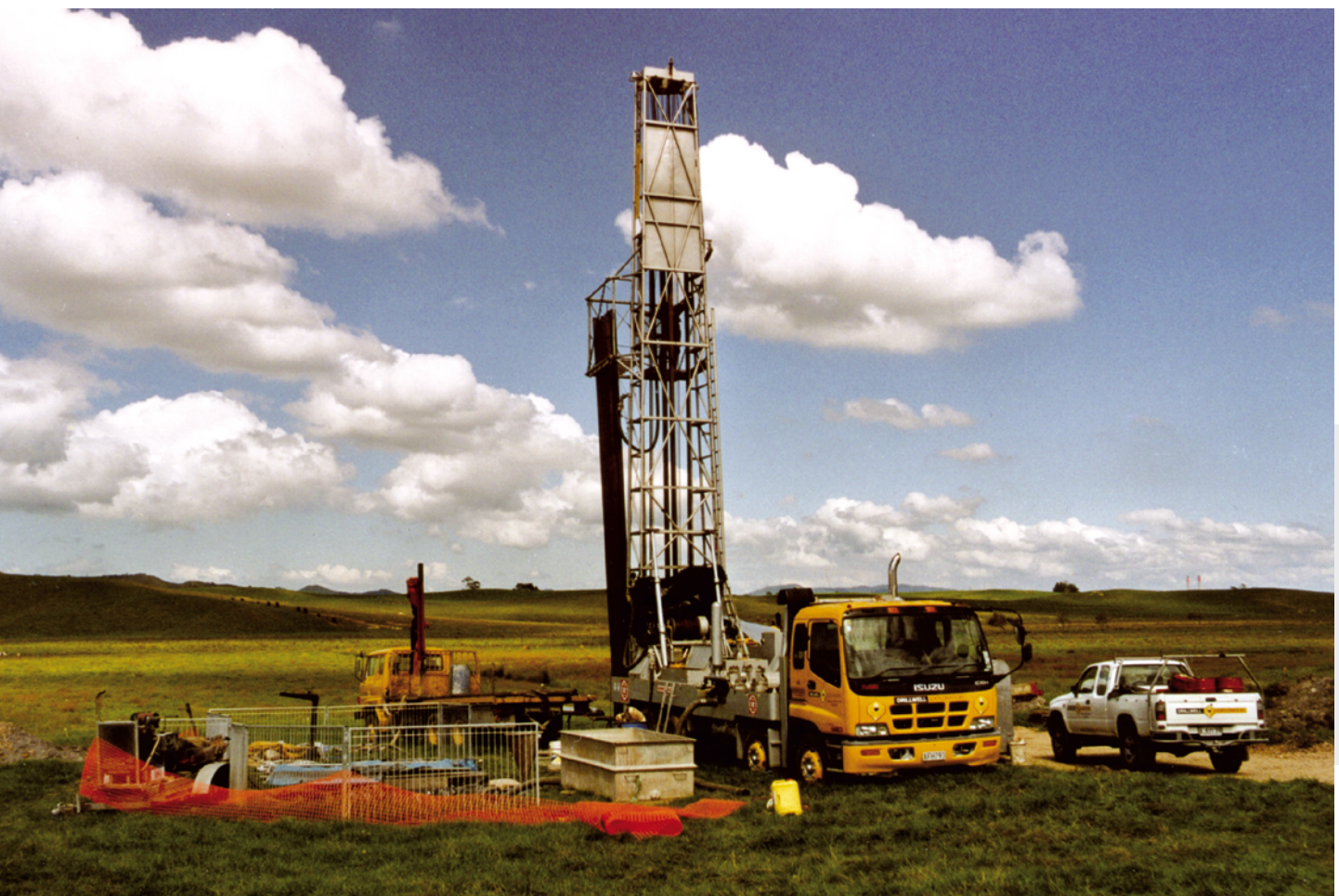
- Kallmeyer, J., Pockalny, R., Adhikari, R. R., Smith, D. C., D'Hondt, S. (2012): Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 109, 40, p. 16213-16216.
- Lippmann, J., Stute, M., Torgersen, T., Moser, D. P., Hall, J. A., Lin, L., Borcsik, M., Bellamy, R. E. S., Onstott, T. C. (2003): Dating ultra-deep mine waters with noble gases and  $^{36}\text{Cl}$ , Witwatersrand Basin, South Africa. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 23, p. 4597-4619.
- Mangelsdorf, K., Haberer, R. M., Zink, K.-G., Dieckmann, V., Wilkes, H., Horsfield, B. (2005): Molecular indicators for the occurrence of deep microbial communities at the JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well. - In: Dallimore, S. R., Collett, T. S. (Eds.), *Scientific Results from Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada*, (GSC Bulletin; 585), Geological Survey of Canada, p. 1-11.
- Mangelsdorf, K., Zink, K.-G., di Primio, R., Horsfield, B. (2011): Microbial lipid markers within and adjacent to Challenger Mound in the Belgica carbonate mound province, Porcupine Basin, offshore Ireland (IODP Expedition 307). - *Marine Geology*, 282, 1-2, p. 91-101.
- Nickel, J., di Primio, R., Kallmeyer, J., Hammer, Ø., Horsfield, B., Stoddart, D., Brunstad, H., Mangelsdorf, K. (2013): Tracing the origin of thermogenic hydrocarbon signals in pockmarks from the southwestern Barents Sea. - *Organic Geochemistry*, 63, p. 73-84.
- Parkes, R. J., Cragg, B. A., 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, p. 410-413.  
DOI: <http://doi.org/10.1038/371410a0>
- Schleper, C., Puehler, G., Holz, I., Gambacorta, A., Janekovic, D., Santarius, U., Klenk, H. P., Zillig, W. (1995): *Picrophilus* gen. nov., fam. nov.: a novel aerobic, heterotrophic, thermoacidophilic genus and family comprising archaea capable of growth around pH 0. - *Journal of Bacteriology*, 177, 24, p. 7050-7059.
- Takai, K., Moyer, C. L., Miyazaki, M., Nogi, Y., Hirayama, H., Nealson, K. H., Horikoshi, K. (2005): *Marinobacter alkaliphilus* sp. nov., a novel alkaliphilic bacterium isolated from subseafloor alkaline serpentine mud from Ocean Drilling Program Site 1200 at South Chamorro Seamount, Mariana Forearc. - *Extremophiles*, 9, 1, p. 17-27.
- Wandrey, M., Morozova, D., Zettlitzer, M., Würdemann, H., CO<sub>2</sub>SINK Group (2010): Assessing drilling mud and technical fluid contamination in rock core and brine samples intended for microbiological monitoring at the CO<sub>2</sub> storage site in Ketzin using fluorescent dye tracers. - *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 6, p. 972-980.

# Nahrungsgrundlage für eine tiefe Biosphäre

*Kai Mangelsdorf*

*Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

*In recent years a widely disseminated microbial deep biosphere was discovered in the subsurface of the Earth. This finding opens the view to a fascinating new world under our feet and forms a new topic in modern microbiology and geoscience research. With its recognition the curiosity arises how these deeply buried microorganisms are able to survive in the deep subsurface. Important questions concerning these survivalists are: what are the carbon and energy resources of these microbial ecosystems, what are the biotic and abiotic processes of substrate provision and what is the role of the deep biosphere in the organic matter transformation in the geological subsurface carbon cycle? The topic concerning the feedstock for deep microbial life forms the core of the deep biosphere research in Section Organic Geochemistry at GFZ German Research Centre for Geosciences.*



Für lange Zeit bestand die wissenschaftliche Meinung, dass das Leben auf der Erde nur auf das Meer, die Erdoberfläche und die oberen Meter von Sedimenten beschränkt ist. In den letzten beiden Jahrzehnten kam man jedoch vor allem durch die Verbesserung von Nachweistechiken einem mikrobiellen Leben im tiefen Untergrund unserer Erde auf die Spur (*Parkes et al., 1994*), auf das man zuvor nur indirekte Hinweise erhalten hatte. Diese Entdeckung öffnete den Blick der Wissenschaft auf eine neue faszinierende Welt tief unterhalb der Erdoberfläche. An Land konnten Mikroorganismen in 3000 m tiefen Goldminen gefunden werden und in marinen Sedimenten bis zu einer Tiefe von etwa 1600 m, neuerdings sogar bis zu 2000 m. Hochrechnungen der Biomasse der tiefen Biosphäre ergaben, dass sie sich in den gleichen Mengendimensionen bewegt, wie die überall sichtbare Oberflächenbiosphäre. Allein schon diese Größe weist darauf hin, dass die tiefe Biosphäre einen großen Einfluss auf den globalen Kohlenstoffzyklus haben muss. Ihre spezifische Rolle ist aber bisher größtenteils unbekannt und deshalb Gegenstand der aktuellen Forschung (vgl. Beitrag von Kallmeyer „Die tiefe Biosphäre“ in diesem Heft).

Neben der Herausforderung, ein bisher unbekanntes Ökosystem zu erforschen, bestehen auch ökonomische Interessen bei der Untersuchung der tiefen mikrobiellen Gemeinschaften (*Horsfield et al., 2007*). Sie besitzen das Potenzial, biogene Energiereserven in Form von mikrobiell produziertem Methan zu bilden. Mikroorganismen sind aber auch in der Lage, durch Biodegradation von Erdöl in tiefen Lagerstätten Energiereserven zu zerstören. Zudem können diese mikrobiellen Gemeinschaften helfen, einen mit Öl kontaminierten Untergrund zu sanieren. Darüber hinaus tragen bisher unbekannte mikrobielle Gemeinschaften auch das Potenzial für neuartige biomedizinische Anwendungen, in dem sie z. B. Enzyme mit entsprechendem Potenzial in sich tragen. Ein anderer interessanter Forschungsansatz ist die tiefe Biosphäre als ein Modellsystem für ein Leben im tieferen Untergrund auf anderen Planeten. Die Oberflächen der anderen

Planeten unterscheiden sich zwar drastisch von der der Erde, doch im Untergrund könnten Bedingungen vorherrschen, die denen im Untergrund unseres Planeten entsprechen. Somit könnte ein vergleichbares Leben auch tief unterhalb der Oberfläche auf anderen Planeten existieren (vgl. Beitrag von Wagner et al. „Astrobiologie – dem Leben im Universum auf der Spur“ in diesem Heft).

Der tiefe Untergrund stellt als Lebensraum eine Herausforderung für Mikroorganismen dar und diese müssen dabei zu wahren Anpassungskünstlern werden. Im Vergleich zu den Lebensbedingungen an der Oberfläche muss sich das mikrobielle Leben mit zunehmender Tiefe immer extremeren Bedingungen stellen. So nehmen Druck und Temperatur mit der Tiefe zu, die Nährstoffe werden immer weniger, der Porenraum immer kleiner und die Verbindung zwischen den Poren, die Permeabilität, geringer und letztlich wird es für die Mikroorganismen immer schwieriger, an notwendige Energie- und Kohlenstoffressourcen zu gelangen, da das sedimentäre organische Material mit zunehmendem Abbau immer weniger angreifbar wird.

### Substrate für die tiefe Biosphäre

Mit der weiten Verbreitung von mikrobiellem Leben im tiefen Untergrund stellt sich somit die Frage nach den Energie- und Kohlenstoffquellen für dieses mikrobielle Ökosystem. In vulkanischen Gesteinen, wie Basalten und Graniten, die nie mit photosynthetisch produzierter Biomasse in Kontakt gekommen sind, wurden Mikroorganismen gefunden, die in der Lage sind, notwendige Substrate aus anorganischen Geofluiden (z. B. Kohlendioxid, Wasserstoff und Stickstoff) zu synthetisieren, von denen dann wieder andere Mikroorganismen leben können. Diese Mikroorganismen werden als „Slimes“ bezeichnet, abgeleitet aus dem englischen Ausdruck „subsurface lithoautotrophic microbial ecosystems“.

Im Gegensatz dazu ist in marinen und terrestrischen Sedimentablagerungen das sedimentäre, ehemals photosynthetisch produzierte organische Material die offensichtliche Energie- und Kohlenstoffquelle. Da in der Tiefe kein Sauerstoff für Atmungsprozesse zur Verfügung steht, geht das organische Material durch anaerobe Prozesse mit Hilfe von z. B. Sulfat, Nitrat, Eisen (III) usw. in den Stoffwechsel ein. Das sedimentäre organische Material unterliegt während seiner Absenkungsgeschichte einer großen strukturellen Umwandlung und es wird vermutet, dass die tiefe Biosphäre stark an der Transformation und damit an der Reifung des organischen Materials in den tieferen Sedimenten beteiligt ist.

Neben dem in den Sedimenten feinverteilten organischen Material bieten insbesondere Akkumulationen von organischer

*Links: Bohrung auf der Nordinsel Neuseelands im Rahmen des DEBITS-Projekts (Deep Biosphere in Terrestrial Systems) nach terrestrischen Schichten, die reich an organischem Kohlenstoff sind und daher als Nahrungslieferant für eine tiefe Biosphäre dienen können. (Foto: K. Mangelsdorf, GFZ)*

*Left: Drill site of terrestrial organic carbon rich layers forming potential feeder lithologies to sustain a deep biosphere conducted on the North Island of New Zealand in the scope of the DEBITS project (Deep Biosphere in Terrestrial Systems)*



**Kontakt:** K. Mangelsdorf  
(k.mangelsdorf@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Kern aus der DEBITS-1 Bohrung (Nordinsel Neuseeland) mit Kohlefragmenten als Beispiel für eine Tonablagerung, die reich an organischem Material ist. (Foto: K. Mangeldorf, GFZ)

Fig. 1: Core from the DEBITS-1 well (North Island New Zealand) with coal fragments, representing organic carbon rich clay lithology.

Matrix einen besonderen Lebensraum für die Mikroorganismen im tiefen Untergrund, da hier ausreichend Nahrung zur Verfügung steht. Solche Akkumulationen können z. B. Öllagerstätten, Kohleablagerungen und Gashydratschichten sein (vgl. Beitrag Luzi-Helbing et al. „Die Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Gashydraten“ in diesem Heft). Die überwiegende Menge an bekannten Ölreserven ist häufig stark biodegradiertes Öl, wie z. B. im Orinoco-Teergürtel in Venezuela oder in den Athabasca-Ölsanden in Kanada. Bei der Biodegradation von Erdölen werden insbesondere die auch für die anthropogene Nutzung wichtigen n-Alkane (Kerosin, Benzin und Diesel) abgebaut. Das verbleibende Öl weist eine zunehmend schlechtere Qualität auf. Die Biodegradation von Erdöllagerstätten ist in der Regel ein Prozess, der bereits über geologische Zeiträume hinweg abgelaufen ist. Öl steigt vom sehr heißen Ort seiner Entstehung, wo nach heutigem Wissensstand kein mikrobielles Leben möglich ist (Erdölmuttergestein mit Temperaturen zwischen 100 bis 150 °C), in kühlere Reservoirsteine (< etwa 80 °C) auf, in denen sich bereits Mikroorganismen befinden. Es wird vermutet, dass sich einige dieser Mikroorganismen dann an die Bedingungen in einer Erdöllagerstätte anpassen und das Erdöl in einem oftmals über Jahrmillionen andauernden Prozess als Nahrungsquelle nutzen können.

Kohlelagen stellen ebenfalls eine natürliche Akkumulation von Nahrungssubstraten für eine tiefe Biosphäre dar. Die Untersuchungen von kohlehaltigen Schichten aus Neuseeland (Abb. 1) durch das GFZ haben gezeigt, dass eine lebende mikrobielle Gemeinschaft an die Kohleschichten assoziiert ist. In unmittelbarer Nähe an die Kohlen angrenzenden Sandschichten, die ihrerseits arm an organischem Material sind, lassen sich erhöhte Mengen an speziellen mikrobiellen Biomolekülen finden. Diese Bio-

moleküle sind nur in lebenden Mikroorganismen über längere Zeiträume stabil und eignen sich daher als Anzeiger für lebende mikrobielle Gemeinschaften. Unsere Untersuchungen zeigen, dass der Anteil an Substraten, wie Format und Acetat, in den Kohleschichten recht hoch ist, diese Substrate in der angrenzenden Silt- und Sandschicht aber nahezu nicht vorkommen (Vieth et al., 2008). Dies legt den Schluss nahe, dass die Kohleschichten die assoziierten mikrobiellen Gemeinschaften mit ausreichend Substraten versorgen (Abb. 2).

Die Kohle erfährt über geologische Zeiten hinweg im Zuge zunehmender Absenkung und der damit einhergehenden Zunahme von Druck und Temperatur eine Reifung, die sich in einer strukturellen Transformation des organischen Materials widerspiegelt. Die Untersuchungen von Substratmengen in Kohlen unterschiedlicher Reifung haben gezeigt, dass die Anteile von Substraten wie z. B. Acetat mit zunehmender Reife abnehmen (Abb. 3). Die stärkste Abnahme liegt dabei in einem Reifebereich, der einem Temperaturbereich entspricht, in dem mikrobielles Leben möglich ist. Dies zeigt an, dass während der Reifung Substrate aus den Kohlen freigesetzt werden, die eine hervorragende Nahrungsgrundlage für eine tiefe Biosphäre darstellen (Glombitza et al., 2009). Ob diese aktiv durch mikrobielle Einflussnahme oder durch rein abiotische Prozesse freigesetzt werden, ist bisher nicht bekannt und wird Gegenstand zukünftiger Forschung sein. Erste Kalkulationen der Substratmengen deuten an, dass die bei der Transformation des organischen Materials während der Reifung freigesetzten Substrate ausreichen, eine tiefe Biosphäre über geologische Zeiträume hinweg zu versorgen. Ähnliche Ergebnisse erbrachten Untersuchungen des GFZ von Kohlen, die in einer Sedimenttiefe von 2000 m vor der Halbinsel Shimokita vor der Küste Japans während der

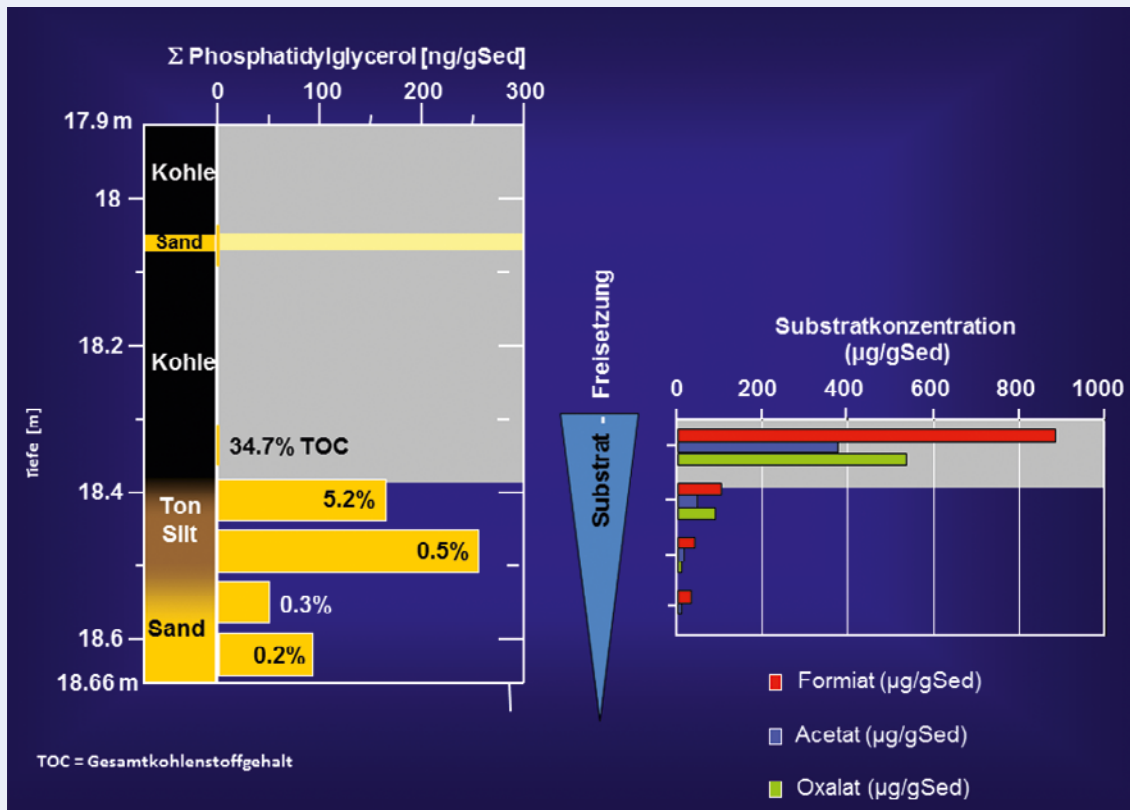


Abb. 2: Kernabschnitt aus der Bohrung DEBITS-1 mit einer Wechsellagerung aus Kohleschichten, die reich an organischem Material, und angrenzenden Silt- und Sandschichten, die arm an organischem Material sind. Die Lebendbiomarker (Phosphatidylglycerole, Bestandteile mikrobieller Zellmembranen) weisen auf eine an die Kohle assoziierte tiefe mikrobielle Gemeinschaft hin. Messungen von mikrobiellen Substratkonzentrationen deuten auf eine Versorgung der mikrobiellen Gemeinschaft durch Substratfreisetzung aus der Kohle. (Abb.: K. Mangelsdorf, GFZ)

Fig. 2: Core segment from the DEBITS-1 well with organic carbon rich coal layers adjacent to organic carbon poor silt- and sandstone layers. The lifemarker (phosphatidylglyceroles, constituents of microbial cell membranes) profile indicates deep microbial community associated to the coal layer. Measurements of the microbial substrates point to a substrate release from the coals to sustain the microbial community in the adjacent lithologies.

IODP-Expedition 337 erbohrt wurden. Das sedimentäre organische Material stellt damit eine nachhaltige Nahrungsgrundlage für die tiefe Biosphäre dar.

Bei dem mikrobiellen Abbau des organischen Materials werden zunächst die schwächeren Bindungen in der organischen Matrix aufgebrochen, da für deren Spaltung weniger Energie aufgewandt werden muss. Nach und nach bleiben in der Matrix die stabileren Verbindungen zurück und das Material wird für einen mikrobiellen Abbau immer weniger angreifbar. Neue Untersuchungen deuten allerdings an, dass das organische Material durch zunehmende Absenkung und den damit steigenden Umgebungstemperaturen wieder aktiviert werden kann. Inerte Bindungen werden durch die höhere Energie im System wieder angreifbar. Somit bleibt das sedimentäre organische Material

auch in tieferen Zonen durch die zunehmende Temperatur für den mikrobiellen Stoffwechsel zugänglich.

In noch tieferen Zonen kommt man in einen Übergangsbereich, wo mikrobielles Leben aufgrund der erhöhten Temperaturen (< 80 bis 90 °C) gerade noch möglich ist, und wo erste thermisch induzierte Bindungsspaltungen der Kohlenwasserstoffgenese im organischen Material stattfinden können, wenn auch auf sehr niedrigem Level. In diesen Zonen kann es dennoch zu einer direkten geothermisch induzierten Substratfreisetzung für sehr tiefe mikrobielle Gemeinschaften kommen – also zu einer direkten Kopplung zwischen geothermischen und mikrobiologischen Prozessen (Horsfield et al., 2006). Untersuchungen der Kohlereifesequenzen haben gezeigt, dass genau in dieser Übergangsphase erhöhte Werte an Fettsäuren auftreten, die

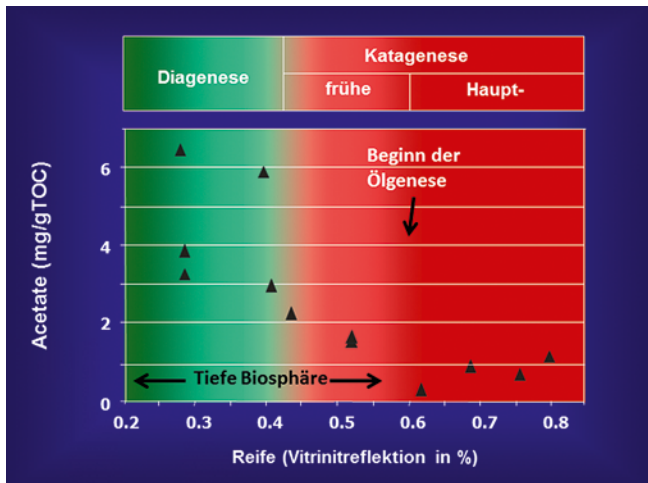


Abb. 3: Abnahme der Acetatkonzentration mit zunehmender Reife von Kohlen einer neuseeländischen Kohlereifesequenz. Die Hauptabnahme liegt in einem Reifebereich (Temperaturen  $<80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in dem eine tiefe Biosphäre existieren kann. Somit setzen Kohlen während der Reifung Substrate frei, die eine Nahrungsgrundlage für tiefe mikrobielle Gemeinschaften bilden. (Abb.: K. Mangelsdorf, GFZ)

Fig. 3: Decrease of acetate concentration with increasing maturity of the coals from a New Zealand maturity sequence. The main decrease overlaps with a maturity interval (temperatures lower  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), where a deep biosphere can exist. Therefore, coals release substrates forming a feedstock for deep microbial communities.

auch Bestandteile von mikrobiellen Zellmembranen sind. Die erhöhten Werte zeigen an, dass hier eine tiefe Biosphäre durch thermische Substratfreisetzung stimuliert worden sein könnte. In noch tieferen Zonen mit Temperaturen weit über  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist nach heutigem Kenntnisstand vermutlich kein mikrobielles Leben mehr möglich. Allerdings beginnt ab  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  die Zone, in der in Ablagerungen, die reich an organischem Kohlenstoff sind, eine intensive Kohlenwasserstoffgenese durch thermisch induzierte Spaltungsprozesse einsetzt. Diese Kohlenwasserstoffe wandern dann, wie oben bereits beschrieben, aus den sogenannten Muttergesteinen wieder in die darüber liegenden Sedimente. Somit können die aus dem sedimentären organischen Material in den tiefen und heißen Zonen generierten Kohlenwasserstoffe wiederum eine Nahrungsgrundlage für eine tiefe Biosphäre in höheren Erdschichten darstellen.

## Methoden der Probenahme

Eine Voraussetzung für die Untersuchung der tiefen Biosphäre ist Probenmaterial, das nicht während der Bohrung, bei der in der Regel eine Bohrspülung zum Einsatz kommt, kontaminiert



Abb. 4: Entnahme von Probenmaterial für die Untersuchung tiefer mikrobieller Ökosysteme: a) Entnahme von Unterproben zur Bestimmung der Eindringtiefe der Bohrspülung, b) Einschweißen der Kerne in eine Kunststoffolie und Entnahme von Sauerstoff sowie Begasung mit Stickstoff, c) Probenahme in einer Probenahmebox unter Stickstoffatmosphäre und d) Probeentnahme aus dem inneren Bereich des Kerns („inner coring“) (Fotos: K. Mangelsdorf, GFZ)

Fig. 4: Sampling of sample material for deep biosphere research: a) sampling of subsample to determine the penetration depth of the drilling fluid into the core material, b) sealing of the cores into a plastic foil with subsequent removal of oxygen and filling with nitrogen, c) sampling in a glove box under nitrogen atmosphere and d) sampling of the central part of the core (inner coring)

wird. Da die mikrobiellen Zellzahlen von der Oberfläche (rund  $10^9$  Zellen pro  $\text{cm}^3$ ) in die Tiefe stark abnehmen (etwa  $10^5$  bis  $10^6$  Zellen pro  $\text{cm}^3$  in  $1000\text{ m}$  Tiefe) können die tiefen Sedimente sehr leicht mit Mikroorganismen von der Oberfläche kontaminiert werden. Bei einer Bohrung mit Bohrspülung lässt sich eine Kontamination nicht vermeiden, allerdings lässt sie sich kontrollieren (Mangelsdorf und Kallmeyer, 2010). Zu diesem Zweck werden der Bohrspülung chemische Tracer oder fluoreszierende Partikel zugefügt. Die fluoreszierenden Partikel haben dabei ungefähr die Größe eines Mikroorganismus. Anhand der Tracer kann dann am Bohrkern festgestellt werden, wie weit die Bohrspülung und damit die potentielle Kontamination in den Kern eingedrungen ist. Dafür werden aus dem Kernquerschnitt Unterproben aus der Mitte und aus dem Randbereich entnommen und hinsichtlich der Kontaminationstracer untersucht (Abb. 4). Kernmaterial, das bis in die Kernmitte Spuren der Tracer aufweist, kann für weitere Untersuchungen nicht verwendet werden und muss verworfen werden.

Da Sauerstoff oftmals schädlich für die Mikroorganismen der tiefen Biosphäre ist, werden die erbohrten Kerne direkt nach der Bohrung in Kunststoffolien eingeschweißt, der verbliebene



Sauerstoff wird durch eine Stickstoffatmosphäre ersetzt. Die Probenahme der Kerne findet dann häufig in Probenahmeboxen mit einer Stickstoffatmosphäre statt. Dies ist insbesondere für mikrobiologische Arbeiten wichtig, bei denen es um die Kultivierung der Mikroorganismen geht. Da der äußere Teil des Kerns grundsätzlich mit der Bohrspülung in Kontakt kommt, wird immer nur der innere Teil des Kerns beprobt („inner coring“). An den so gewonnenen Proben lassen sich sowohl die mikrobiologischen Methoden und die biogeochemischen Biomarkeruntersuchungen, als auch die geochemischen Untersuchungen bezüglich unterschiedlicher Substratquellen durchführen.

## Fazit und Ausblick

Die Untersuchung der tiefen Biosphäre stellt eine relativ junge Disziplin in den modernen Geobiowissenschaften dar. Über die Prozesse der Substratgewinnung im tiefen Untergrund, also den direkten Wechselwirkungen zwischen der tiefen Biosphäre und dem sedimentären organischen Material, ist bisher nur wenig bekannt. Es stellt sich die Frage, inwieweit die tiefe Biosphäre an der über geologische Zeiträume ablaufenden Transformation des sedimentären organischen Materials beteiligt ist und welche Rolle die tiefe Biosphäre im geologischen und letztlich auch im globalen Kohlenstoffkreislauf spielt. Aus diesen Fragen eröffnet sich ein weites Feld für die zukünftige Forschung, in dem nicht nur die Erforschung der Lebensweise von Mikroorganismen unter den extremen Bedingungen des Untergrunds im Mittelpunkt stehen wird, sondern auch anwendungsbezogene Themen bezüglich der Gewinnung von Ressourcen, der Nutzung des tiefen Untergrunds, der mikrobiellen Umweltsanierung und der medizintechnischen Anwendung.

## Zitierte und weiterführende Literatur

- Glombitza, C., Mangelsdorf, K., Horsfield, B. (2009): A novel procedure to detect low molecular weight compounds released by alkaline ester cleavage from low maturity coals to assess its feedstock potential for deep microbial life. - *Organic Geochemistry*, 40, 2, p. 175-183.
- Horsfield, B., Kieft, T. L., Amann, H., Franks, S. G., Kallmeyer, J., Mangelsdorf, K., Parkes, R. J., Wagner, D., Wilkes, H., Zink, K.-G. (2007): The Geobiosphere. - In: Harms, U., Koeberl, C., Zoback, M. D. (Eds.), *Continental Scientific Drilling: A Decade of Progress, and Challenges for the Future*, Springer, p. 163-212.
- Horsfield, B., Schenk, H. J., Zink, K.-G., Ondrak, R., Dieckmann, V., Kallmeyer, J., Mangelsdorf, K., di Primio, R., Wilkes, H., Parkes, R. J., Fry, J., Cragg, B. (2006): Living microbial ecosystems within the active zone of catagenesis: implications for feeding the deep biosphere. - *Earth and Planetary Science Letters*, 246, 1-2, p. 55-69.
- Mangelsdorf, K., Kallmeyer, J. (2010): Integration of Deep Biosphere Research into the International Continental Scientific Drilling Program. - *Scientific drilling: reports on deep earth sampling and monitoring*, 10, p. 46-55.
- Parkes, R. J., Cragg, B. A., 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, p. 410-413.
- Vieth-Hillebrand [Vieth], A., Mangelsdorf, K., Sykes, R., Horsfield, B. (2008): Water extraction of coals – potential for estimating low molecular weight organic acids as carbon feedstock for the deep terrestrial biosphere. - *Organic Geochemistry*, 39, 8, p. 985-991.

# Molekulare Indikatoren für die Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe der Erde

Dirk Sachse

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The water cycle is of paramount importance to human society: shortage of water and intensive droughts have been linked to the downfall of ancient civilizations. At the same time water is an important agent of change on the Earth's surface, removing and transporting vast amounts of sediments from their source to marine sinks. As such, water is the basis of life as well as a pacemaker of the biogeochemical cycles, such as the carbon cycle. Short-term, abrupt changes ( $10^1$  to  $10^3$  years) in the water cycle have the potential to threaten human societies directly, while long-term changes can affect the global biogeochemical cycles, in particular the carbon cycle. In the Organic Surface Geochemistry Lab (Section Geomorphology) of GFZ we are using biomarker based molecular methods a) to understand the drivers of change in the short-term water cycle during past, abrupt climatic changes; and b) to investigate processes that determine the erosion, transport and burial of organic carbon into long-term geological sinks – processes which are responsible for the relatively stable climatic conditions which have allowed the sustainment of life on Earth. By combining paleoclimatic, geomorphological and organic-geochemical approaches we gain new insights into the stabilizing and destabilizing factors, that control the water and the carbon cycles over various geological timescales.*



Der Wasserkreislauf ist von entscheidender Bedeutung für die menschliche Zivilisation. Die Verfügbarkeit von Wasser war seit jeher die Grundvoraussetzung für die Besiedlung von Regionen. Der Niedergang ganzer Gesellschaften, z. B. der Maya in Mittelamerika, wird in Verbindung mit ausgedehnten Dürreperioden gebracht. Zugleich formt Wasser die Erdoberfläche über geologische Zeiträume: es transportiert große Mengen an Sediment und ist somit ein Antreiber der Erosion und der globalen Kreisläufe. Beispielsweise bewegen die Flusssysteme der Erde große Mengen an organischem Kohlenstoff von ihrer Quelle (Pflanzen und Böden) in geologische Senken (marine Sedimente), wo dieser Kohlenstoff unter Umständen für Millionen von Jahren festgelegt werden kann. Das Gleichgewicht zwischen Kohlenstoffproduktion, z. B. in der Biosphäre oder durch die Emission von Kohlendioxid bei Vulkanausbrüchen, und Kohlenstoffspeicherung während der Gesteinsverwitterung und in marinen Senken ist letztlich dafür verantwortlich, dass die Temperatur auf der Erde stabil genug für die Entstehung und Etablierung von Leben war. Aus diesen Beispielen wird deutlich, dass Veränderungen im Wasserkreislauf der Erde sowohl unsere direkten Lebensgrundlagen auf kurzen Zeitskalen ( $10^1$  bis  $10^3$  Jahre) als auch die globalen Kreisläufe auf langen Zeitskalen ( $10^6$  Jahre) verändern können.

Trotz dieser immensen Bedeutung des Wasserkreislaufs sind Vorhersagen über mögliche Veränderungen in Niederschlagsmustern als Konsequenz des globalen Klimawandels noch recht ungenau. Aufgrund der steigenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen wird die Temperatur auf der Erde steigen. Wenn es um den Wasserkreislauf geht, speziell regionale Veränderungen aufgrund der Temperaturveränderungen, sind die Modelle in vielen Regionen noch zu unsicher, um klare Empfehlungen für vorbeugende Maßnahmen auszusprechen. Dies bedeutet, dass wichtige Mechanismen noch nicht komplett verstanden sind, die den Wasserkreislauf über geologische Zeitperioden bestimmen. Im organischen Geochemielabor der Sektion „Geomorphologie“ am GFZ arbeiten wir zum einen daran, ein besseres Verständnis der kurzzeitigen Mechanismen von Veränderungen im Wasserkreislauf anhand abrupten, vergangener Klimawechsel zu erreichen. Zum anderen erforschen wir die Prozesse, die die Erosion, den Transport und die Einlagerung von organischem Kohlenstoff in geologische Senken bestimmen und damit eine gewisse Stabilität des Erdklimas über geologische Zeiträume gewährleisten.

*Links: Beprobung von Wasser und Sedimenten eines aktiven Mäanders des Rio Bermejo in Nordwestargentinien (Foto: N. Hovius, GFZ)*

*Left: Sampling sediment and water in an active meander of the Rio Bermejo in northwestern Argentina*



**Kontakt:** D. Sachse  
(dirk.sachse@gfz-potsdam.de)



*Abb 1: Blätter der auf der Pazifikinsel Hawaii endemischen Pflanze Metrosideros Polymorpha mit ausgeprägter Wachsschicht (Foto: D. Sachse, GFZ)*

*Fig. 1: Leaves of the hawaiian native plant Metrosideros Polymorpha with a thick wax layer*

Dazu verwenden wir neue, molekulare Methoden, um das in Sedimenten von Seen und Flüssen abgelagerte organische Material zu charakterisieren. Die substanzspezifische Messung stabiler Isotope an organischen Substanzen, z. B. den Blattwachsen höherer Pflanzen, erlauben uns paläohydrologische Veränderungen aus Seesedimenten zu rekonstruieren und den Ursprung terrestrischen organischen Materials in Flusssedimenten zu bestimmen.

## Molekulare Fossilien als Regenmesser

Durch die Analyse polarer Eiskerne, mariner und terrestrischer Sedimentarchive ist die generelle und langfristige Klimageschichte der Erde gut bekannt. Hingegen ist unsere Kenntnis der regionalen Auswirkungen globaler Klimaveränderungen lückenhaft. Durch die Analyse verschiedenster Parameter an Seesedimenten, der sogenannten „Proxies“, können Informationen über Veränderungen in der Vegetation oder der Temperatur im Einzugsgebiet eines Sees rekonstruiert werden. Aufgrund fehlender direkter Niederschlagsproxies werden hydrologische Veränderungen oft indirekt rekonstruiert: beispielsweise liefern in Sedimenten enthaltene Pollen von Landpflanzen indirekte Informationen über trockenere oder feuchtere Bedingungen. Allerdings können speziell bei abrupten Klimaveränderungen Jahrzehnte vergehen, bis die Vegetation auf solche Änderungen reagiert. Am GFZ nutzen wir Biomarker als direkten hydrologischen Proxy, also organische Substanzen von Algen und Landpflanzen, die im Sediment über geologische Zeiträume erhalten bleiben. Diese „molekularen Fossilien“ können aufgrund ihrer Struktur auf bestimmte Organismengruppen zurückgeführt werden. Beispielsweise sind langkettige Kohlenwasserstoffe, sog. n-Alkane, Hauptbestandteile der Blattwaxse höherer Landpflanzen (Abb. 1).

Das Isotopenverhältnis der stabilen Wasserstoffe ( $^1\text{H}$  und  $^2\text{H}$  oder D, als  $\delta\text{D}$ -Wert angegeben) dieser aus Wasserstoff und Kohlenstoff bestehenden n-Alkane spiegelt die Wasserstoffisotopie des Niederschlagswassers wider, welches die Pflanze aufgenommen hat wie auch den Einfluss der Evapotranspiration (Abb. 2). Das Wasserstoffisotopenverhältnis im Niederschlag ist wiederum ein direkter Indikator für die Prozesse und Flüsse des Wasserkreislaufs. In enger Zusammenarbeit mit Pflanzenphysiologen konnten die pflanzenphysiologischen und biochemischen Prozesse beim Einbau des Wasserstoffs in die organischen Substanzen besser bestimmt werden und bilden nun die Grundlage für eine robuste Interpretation sedimentärer Proxies. Als solches können Biomarker  $\delta\text{D}$ -Werte aus Seesedimenten als direkter Proxy für hydrologische Veränderungen im Seeinzugsgebiet herangezogen werden.

### Verzögerte Reaktion des hydrologischen Kreislaufs auf Abkühlung während Kaltphase der Jüngeren Dryas vor 12 700 Jahren

Mit dieser oben vorgestellten Methode konnte erstmals gezeigt werden, dass eine Abkühlung und die hydrologische Veränderung am Ende der letzten Eiszeit vor 12 700 Jahren nicht zeitgleich abliefen. In den Isotopenverhältnissen grönländischer Eiskerne ist diese Abkühlung aufgezeichnet. Die  $\delta\text{D}$ -Werte von Biomarkern aus jahreszeitlich geschichteten und somit exzellent datierbaren Seesedimenten des Meerfelder Maars in der Eifel (Abb. 3) lieferten Hinweise darauf, dass erst 170 Jahre nach Beginn der Abkühlung eine starke Trockenheit in Westeuropa einsetzte (Rach et al. 2014). Aufgrund der Abkühlung dehnte sich die Packeisbedeckung im Nordatlantik weiter südwärts

aus, wodurch sich atmosphärische Zirkulationsmuster veränderten. Die resultierende Trockenheit bedingte letztlich die in der Vegetationsbedeckung nachweisbaren, massiven Umweltveränderungen, die als Jüngere Dryas in West- und Mitteleuropa bekannt sind. Dieses Beispiel macht deutlich, dass signifikante zeitliche und räumliche Unterschiede auch für zukünftige Klimawandelszenarien in der Reaktion des Klimasystems auf eine externe Einwirkung zu erwarten sind. Genaue zeitliche und räumliche Vorhersagen dieser Szenarien sind immens wichtig, um vorhandene Ressourcen optimal zur Vorbeugung einzusetzen. Am GFZ werden wir in den kommenden fünf Jahren im Rahmen des vom Europäischen Forschungsrat (European Research Council, ERC) finanzierten Projekts STEEPclim regionale hydrologische Unterschiede während der letzten abrupten Klimawechsel am Ende der Eiszeit, vor 15 000 bis 11 000 Jahren, über den gesamten europäischen Kontinent quantifizieren, um Mechanismen hydrologischer Veränderungen besser zu verstehen und bestimmte, besonders gefährdete Regionen zu identifizieren.

### Blattwache und deren Isotopenzusammensetzung als Tracer für globale Kohlenstoffflüsse

Die stabile Wasserstoffisotopenzusammensetzung dieser Biomarker für terrestrische Organik kann nicht nur als Paläohydrologieproxy eingesetzt werden. In hydrologisch sehr heterogenen Einzugsgebieten oder entlang hydrologischer Gradienten, wie z. B. an den Rändern großer Gebirge, erlauben diese Analysen auch die Bestimmung der Herkunft der Substanzen innerhalb des Gebiets.

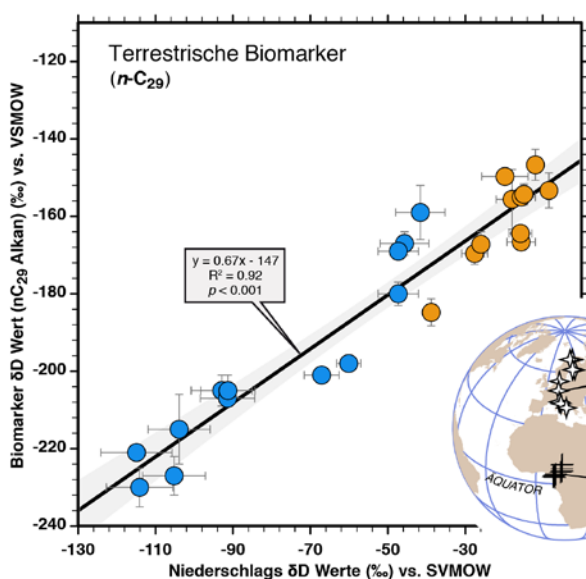


Abb. 2: Wasserstoffisotopenverhältnisse ( $\delta\text{D}$ -Wert) eines langkettigen n-Alkanes ( $n\text{C}_{29}$ ) in Seesedimenten aus verschiedenen Klimazonen. Der  $\delta\text{D}$ -Wert des aus den Blattwachsen höherer Pflanzen stammenden Kohlenwasserstoffs ist linear mit dem  $\delta\text{D}$ -Wert des Wassers, welches die Pflanze aufgenommen hat, korreliert und ermöglicht somit paläohydrologische Rekonstruktionen. (Abb.: GFZ; Daten aus Sachse et al., 2004 (Europäischer Transekt) und Garcin et al., 2012 (Kamerun-Transekt))

Fig. 2: Hydrogen isotope ratios (expressed as  $\delta\text{D}$  values) of a long-chain n-alkane ( $n\text{C}_{29}$ ) in modern lake sediments from different climate zones. The  $\delta\text{D}$  values of these compounds, originating from the leaf waxes of higher terrestrial plants, are linearly correlated to the  $\delta\text{D}$  value of plant source water (i. e. rain) and as such enable paleohydrological reconstructions. (Data from Sachse et al., 2004 (European transect) and Garcin et al., 2014 (Cameroon transect))

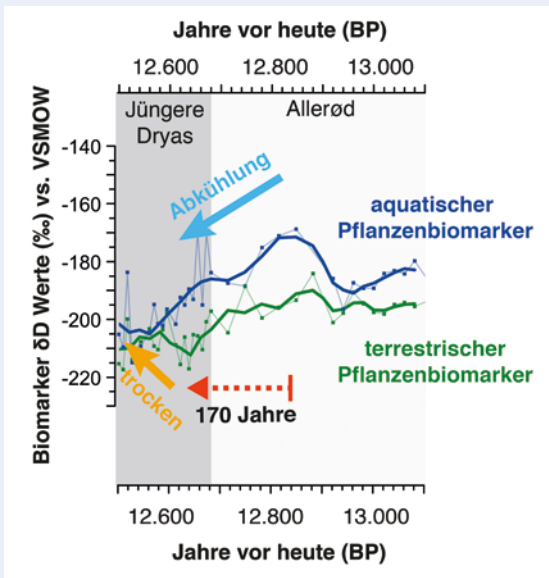


Abb. 3: Verlauf der  $\delta D$ -Werte verschiedener Biomarker zu Beginn der Kaltperiode der Jüngeren Dryas aus jahreszeitlich geschichteten (varvierten) Sedimenten des Meerfelder Maars in der Eifel. Die einsetzende Trockenheit, etwa 170 Jahre nach Beginn der Abkühlung, war für massive Veränderungen im terrestrischen Ökosystem verantwortlich. (Abb.: GFZ; Daten aus Rach et al., 2014)

Fig. 3:  $\delta D$  values of aquatic and terrestrial biomarkers during the onset of the Younger Dryas cold period from annually laminated (varved) sediments of lake Meerfelder Maar in the Eifel region, Western Germany. The onset of dryer conditions occurred ca. 170 years after the onset of cooling and was responsible for massive changes in terrestrial ecosystems. (Dwata from Rach et al., 2014)

Bedingt durch die niedrigere Temperatur, die trockeneren Bedingungen und die unterschiedliche Vegetationsbedeckung in den hochgelegenen Gebieten der Anden oder des Himalaya, haben dort biosynthetisierte Blattwaxe eine andere Wasserstoff- und Kohlenstoff-Isotopensignatur als in den oft feuchten und warmen Gebieten am Fuße der Gebirge. Die Analyse der  $\delta D$ -Werte der terrestrischen Biomarker in vom Fluss abgelagerten Sedimenten am Fuße der Berge erlaubt, unter Kenntnis der modernen Isotopenmuster-Verteilung, Rückschlüsse auf den räumlichen Ursprung der Substanzen. In der Sektion „Geomorphologie“ am GFZ setzen wir klassische und neue geomorphologische Analysen, Fernerkundungsdaten in Kombination mit Biomarker-Isotopenanalysen sowie weitere organisch-geochemische Analysemethoden ein, um die Herkunft des terrestrischen organischen Materials in den großen Flusssystemen der Anden und des Himalaya zu klären (Abb. 4). Zugleich analysieren wir saisonale Unterschiede und versuchen sie mit wechselnden meteorologischen und klimatologischen Bedingungen (z.B. Regen- und Trockenzeit, Schneeschmelze etc.) in Beziehung zu setzen. In weiteren Studien untersuchen wir, ob und wie sich organisches Material während des Transports in diese Flusssystemen verändert, ob beispielsweise unter bestimmten Klimabedingungen die mikrobielle Degradation ein relevanter Prozess ist.

Diese Untersuchungen liefern neue Erkenntnisse über die Prozesse und deren Steuerungsfaktoren, die organischen Kohlenstoff von der Quelle (Vegetation, Boden) in ihre geologische Sen-



Abb 4: Schräggestellte Ablagerungen eines Flusssystemes, das im Miozän (vor etwa 6 bis 7 Mio. Jahren) die sich hebenden nordwest-argentinischen Anden entwässerte (Foto: D. Sachse, GFZ)

Fig. 4: Tilted sedimentary deposits of a river system that drained the northwest Argentinian Andes during the Miocene (6-7 Ma years ago)

ke (marine Sedimente) überführen. Das resultierende moderne Prozessverständnis kann dann genutzt werden, Veränderungen im Budget und in den Flüssen des Kohlenstoffkreislaufs über geologische Zeiträume zu quantifizieren, beispielsweise durch Untersuchung fluvialer Ablagerungen aus der geologischen Vergangenheit während der Hebung eines Gebirges (Abb. 4). In Kombination mit paläohydrologischen und anderen paläoklimatologischen Rekonstruktionen, z. B. an lakustrinen Archiven, können dann die steuernden klimatologischen Faktoren identifiziert werden. Durch die Kombination von paläoklimatischen, geomorphologischen und organisch-geochemischen Daten gewinnen wir neue Erkenntnisse sowohl zu den stabilisierenden als auch zu den destabilisierenden Faktoren, die den globalen Kohlenstoffkreislauf über geologische Zeiträume bestimmen können.

## Literatur

- Garcin, Y., Schwab, V. F., Gleixner, G., Kahmen, A., Todou, G., Séné, O., Onana, J.-M., Achoundong, G., Sachse, D. (2012): Hydrogen isotope ratios of lacustrine sedimentary n-alkanes as proxies of tropical African hydrology: Insights from a calibration transect across Cameroon. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 79, p. 106–126.
- Rach, O., Brauer, A., Wilkes, H., Sachse, D. (2014): Delayed hydrological response to Greenland cooling at the onset of the Younger Dryas in western Europe. - *Nature Geoscience*, 7, 2, p. 109–112.
- Sachse, D., Radke, J., Gleixner, G. (2004): Hydrogen isotope ratios of recent lacustrine sedimentary n-alkanes record modern climate variability. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 23, p. 4877–4889.
- Sachse, D., Billault, I., Bowen, G. J., Chikaraishi, Y., Dawson, T. E., Feakins, S. J., Freeman, K. H., Magill, C. R., McInerney, F. A., van der Meer, M. T. J., Polissar, P., Robins, R. J., Sachs, J. P., Schmidt, H.-L., Sessions, A. L., White, J. W. C., West, J. B., Kahmen, A. (2012): Molecular Paleohydrology: Interpreting the Hydrogen-Isotopic Composition of Lipid Biomarkers from Photosynthesizing Organisms. - *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, p. 221–249.

# Mehr Moor?

## Zur Treibhausgasdynamik wiedervernässter Feuchtgebiete

Torsten Sachs<sup>1</sup>, Franziska Koebsch<sup>1</sup>, Daniela Franz<sup>1</sup>, Eric Larmanou<sup>1</sup>, Andrei Serafimovich<sup>1</sup>, Katrin Kohnert<sup>1</sup>, Gerald Jurasinski<sup>2</sup>, Jürgen Augustin<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Universität Rostock, Rostock

<sup>3</sup> Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg

*The Earth and its surface are tightly linked to the global climate system by turbulent exchange fluxes of energy and matter, e. g. greenhouse gases. This is true both for “deep Earth” geologically generated heat or gases reaching the surface and those of biogenic origin in the near-surface environment. For a better understanding of Earth-atmosphere interactions and in particular their feedbacks, the Helmholtz Young Investigators Group TEAM at GFZ studies the surface-atmosphere exchange of heat, water vapor, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) on a range of temporal and spatial scales – from hours to years and from < 1m<sup>2</sup> to more than 10 000 km<sup>2</sup>. A regional focus is on degraded peatlands. While natural peatlands play a central role in the climate system as major carbon sink storing twice the amount of carbon that is contained in the Earth’s forests, a large fraction of the world’s peatlands has been drained for agriculture and subsequently lost that carbon storage capacity. Drained and degraded peatlands are significant and longterm carbon dioxide sources and thus contribute to further climate warming. In NE Germany, up to 20 % of the overall carbon dioxide emissions are from drained peat and a tool in reducing national greenhouse gas emission is therefore the re-wetting of peatlands to restore their natural carbon sink capacity. TEAM monitors the long-term greenhouse gas dynamics in such re-wetted sites and investigates the underlying processes and spatiotemporal drivers of the dynamics.*



Die voraussichtlich auf 9 Mrd. Menschen anwachsende Weltbevölkerung greift so massiv in natürliche Prozesse ein, dass anthropogen verursachte Umweltänderungen die Größenordnung natürlicher Variabilität im Erdsystem erreichen. Vor diesem Hintergrund gehört die Entwicklung von Anpassungs- und Minderungsstrategien und dazu ein umfassendes Verständnis der die Menschheit betreffenden natürlichen Prozesse und Dynamiken im Erdsystem zu den zentralen Herausforderungen („Grand Challenges“) der Gesellschaft. Schwerpunkte sind unter anderem Klimawandel, Ökosystemdynamik und Biodiversität sowie die Frage, wie die Erdoberfläche, unser Lebensraum, auf natürliche und anthropogene Veränderungen reagiert.

Moore spielen im Erdsystem eine signifikante Rolle als Stoffsenken ihrer jeweiligen Einzugsgebiete und erfüllen wichtige Funktionen in Landschaftswasserhaushalt, Mikro- und Regional Klima, Bodenschutz und Biodiversität. Aber selbst für das globale Klima stellen Moore erdgeschichtlich eine bedeutende Senke für Kohlenstoff (C) dar. Obwohl sie nur 3% der terrestrischen Erdoberfläche einnehmen, speichern Moore 25% des organischen Boden-C – dies entspricht 75% des gesamten in der Atmosphäre enthaltenen Kohlenstoffs und dem Doppelten dessen, was global in Wäldern gespeichert ist.

Im glazial geprägten Norddeutschland nahmen überwiegend grundwassergespeiste und gewässerbegleitende Niedermoore 10% (Brandenburg) bis 13% (Mecklenburg-Vorpommern) der Landfläche ein, bevor im Zuge immer intensiverer Landnutzung mehr als 95% dieser Flächen entwässert wurden. Entwässerung und Umwandlung in landwirtschaftliche Nutzflächen führt immer zum Verlust der Stoff- und Wasserspeicherfunktion der Moore und verwandelt effektive Senken für das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in starke Quellen, die signifikant und langfristig zum Strahlungsantrieb der Erde beitragen können – und dies, obwohl mit der Entwässerung auch der natürliche Ausstoß des (bezogen auf 100 Jahre) 28 mal wirksameren Treibhausgases Methan (CH<sub>4</sub>) abnimmt (Petrescu et al., 2015). Die CO<sub>2</sub>-Emission aus landwirtschaftlich genutzten ehemaligen Moorflächen wird auf

bis zu 4,5% der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emission Deutschlands geschätzt, für Mecklenburg-Vorpommern sogar auf 20%. Im Rahmen des Klima- und Gewässerschutzes werden national wie international Moore u. a. zur Wiederherstellung ihrer Stoff- und Wasserretentionsfähigkeit wiedervernässt, vor dem Hintergrund des CO<sub>2</sub>-Emissionshandels teilweise auch im großen Maßstab. So ist in Mecklenburg-Vorpommern die Renaturierung von 37000 ha geplant oder bereits umgesetzt. Speziell im initialen Wiedervernässungsstadium treten jedoch hohe Emissionen biogenen Methans auf. In welchem Zeitraum und Umfang die Wiedervernässung dazu beitragen kann, degradierte Moore von einer anthropogenen Treibhausgasquelle wieder in eine klimakühlende Treibhausgassenke zu verwandeln, hängt daher wesentlich davon ab, wie lang die Phase erhöhter CH<sub>4</sub>-Freisetzung anhält. Dieses ist Teil der Fragen, die die Nachwuchsgruppe TEAM am Deutschen GeoForschungszentrum GFZ gemeinsam mit Partnern im TERENO-Verbund, weiteren Helmholtz-Zentren, Universitäten, Leibniz-Instituten und Wirtschaft an mehreren Standorten in Nordostdeutschland auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen untersucht.

## Moor und Meer

Einer dieser Untersuchungsstandorte ist der Polder Zarnekow bei Dargun (Abb. 1). Hier wurde das die Peene begleitende Durchströmungsmoor bereits seit dem 18. Jahrhundert entwässert, aber erst mit der Intensivierung der Landwirtschaft zwischen 1960 und 1980 kam es zu massiver Degradation des Moorkörpers. Sackung (etwa 1 m) und Mineralisierung der oberen 0,3 m des bis zu 10 m mächtigen Torfkörpers führten teilweise zum Absinken der Geländeoberkante unter den Pegel der Peene und erforderten Eindeichung und Schöpfwerke zur weiteren Entwässerung. Der Schöpfwerksbetrieb wurde nach der Wende eingestellt; im Winter 2004/2005 wurde die Wiedervernässung eines 421 ha großen Areal durch Öffnung der Deiche forciert. Es bildete sich zunächst ein Flachwassersee, der nun über einen längeren Zeitraum verlanden muss, bevor sich wieder moortypische Vegetation einstellen kann. Begleitet wurde die Wiedervernässung seit 2004 durch intensive Studien zu Biogeochemie und Treibhausgasemissionen der Leibniz-Einrichtungen ZALF und IGB. Nach kurzer Unterbrechung wurde 2013 unter Führung des GFZ die Instrumentierung des Standorts im Rahmen der TERENO-Ausbauinvestitionen rund erneuert und intensiviert.

Eine in den letzten Dekaden ähnliche Landnutzung hat das bei Rostock gelegene Hütelmoor (Abb. 1) erfahren, die Genese und Geochemie dieses Standorts hingegen unterscheiden sich vom Peenetalmoor. Das Hütelmoor ist ein rund 490 ha großes Küstenversumpfungsmoor und bildete sich vor etwa 5400 Jahren auf den

*Links: Messsysteme am Polder Zarnekow: im Vordergrund automatische Messhauben des Kooperationspartners ZALF, im Hintergrund der mikrometeorologische Eddy Kovarianz-Messturm der Nachwuchsgruppe TEAM am GFZ (Foto: D. Franz, GFZ)*

*Left: Measurement systems at Polder Zarnekow: automatic chambers of collaborators at ZALF in the foreground and a micrometeorological eddy covariance tower of the Young Investigators Group TEAM at GFZ*



**Kontakt:** T. Sachs  
(torsten.sachs@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Moor und Meer – links der Polder Zarnekow im Peenetal bei Dargun (Foto: T. Sachs, GFZ), rechts das an die Ostsee grenzende Küstenverumpfungsmoor Hütelmoor bei Rostock (Foto: L. Tiepolt, Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg, Rostock)

Fig. 1: Left: Polder Zarnekow in the Peene valley near Dargun (Photo: T. Sachs); right: coastal fen Hütelmoor near Rostock with the Baltic Sea in the background

weichselspätglazialen Becken-Feinsanden des Urrecknitz-Deltas. Der Torfkörper ist hier nur 0,5 bis 3 m mächtig, wobei speziell die oberen 0,3 bis 0,5 m stark vererdet bis schwach vermulmt sind. Auch das Hütelmoor wurde bereits seit dem 16. Jahrhundert extensiv genutzt und seit den 1970er Jahren mit Hilfe von Gräben und Schöpfwerken als Intensivgrünland bewirtschaftet. Die Wiedervernässung erfolgte 2010 und wie der Polder Zarnekow ist das Hütelmoor seitdem dauerhaft überstaut. Durch episodisches Eindringen von Ostseewasser bei Sturmfluten (zuletzt 1995) weist das Hütelmoor hohe Salinitäten auf. Seit 2009 untersucht die Universität Rostock den Austausch der Treibhausgase  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  zwischen Moor und Atmosphäre, seit 2014 wird das Hütelmoor als TERENO-Standort in Kooperation mit dem GFZ untersucht.

## Wechselwirkungen zwischen Erdoberfläche und Klimasystem

Zu den unmittelbarsten und schnellsten Wechselwirkungen zwischen Geo-, Bio-, und Hydrosphäre mit der Atmosphäre und somit dem Klimasystem gehören die turbulenten Wärme- und Stoffströme zwischen der Erdoberfläche und der sogenannten planetarischen Grenzschicht, den unteren etwa 2 km der Troposphäre. Diese Wärme- und Stoffströme (hier: sensible Wärme, latente Wärme (Verdunstung),  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Flüsse) sind mit Laserspektroskopie und hochfrequent messenden meteorologischen Sensoren je nach Trägerplattform kontinuierlich bzw. großflächig quantifizierbar (Abb. 2).

Am GFZ wird dazu an Messtürmen und auf verschiedenen Fluggeräten vor allem die mikrometeorologische Eddy-Kovarianz-Methode eingesetzt, die auf der schnellen und zeitgleichen Messung des 3D-Windvektors und skalarer Größen wie Feuchte, Temperatur,  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Konzentration beruht. So lässt sich

der Masse- und Energieaustausch zwischen Ökosystem und Atmosphäre kontinuierlich und integriert über ein Einzugsgebiet von mehreren Hektar quantifizieren. Grundsätzlich lässt sich die Methode auf eine Vielzahl von Fragestellungen anwenden, wie etwa den Aufstieg geogener Gase bei rezenter Tektonik, Gasaustritte aus Hydraten und flachliegenden Lagerstätten oder Emissionen im Umfeld aktiver oder stillgelegter Rohstoffextraktionsflächen. Ergänzt werden diese mikro- bis mesoskaligen Untersuchungen durch kleinräumige Messungen diffusiver Stoffströme (Abb. 2). Durch die Erfassung der Gasemissionen auf verschiedenen räumlichen Ebenen und die Anwendung von Up- und Downscaling-Modellierungen können wir Skaleneffekte besser verstehen und so z. B. Regionalisierungsansätze zur Prognose der Rolle von Geoökosystemen für den Klimawandel entwickeln.

Die Festlegung von Kohlenstoff im Moor bzw. die C-Freisetzung in die Atmosphäre wird im Wesentlichen durch die geochemischen Bedingungen im Torf und damit verbundene mikrobielle Umsetzungsprozesse gesteuert. Nach Jahrzehnten der Entwässerung haben sich Vegetation und Bodenmikrobiologie in degradierten Mooren auf die trockeneren Bedingungen eingestellt. Ein rapider Anstieg des Wasserspiegels im Zuge der Wiedervernässung kann dann wie eine Störung wirken (Koebsch *et al.*, 2013); die so entstandenen eutrophen Flachwasserseen werden zu regelrechten „Schleudern“ für klimarelevante Gase und Nährstoffe (Zak *et al.* 2009). Neben den Treibhausgasbilanzen erforschen wir die Steuergrößen für die spezielle Stoffdynamik in der initialen Phase der Moorwiedervernässung. Mit quantitativen Analysen und stabilen Isotopen untersuchen wir Umsetzungsprozesse und versuchen z. B. die Herkunft bestimmter Stoffgruppen im Torf zu klären. Die Ergänzung der Gasemissionsmessungen mit biogeochemischen Untersuchungen wird mittelfristig zur besseren Generalisierbarkeit der Ergebnisse und zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger führen.



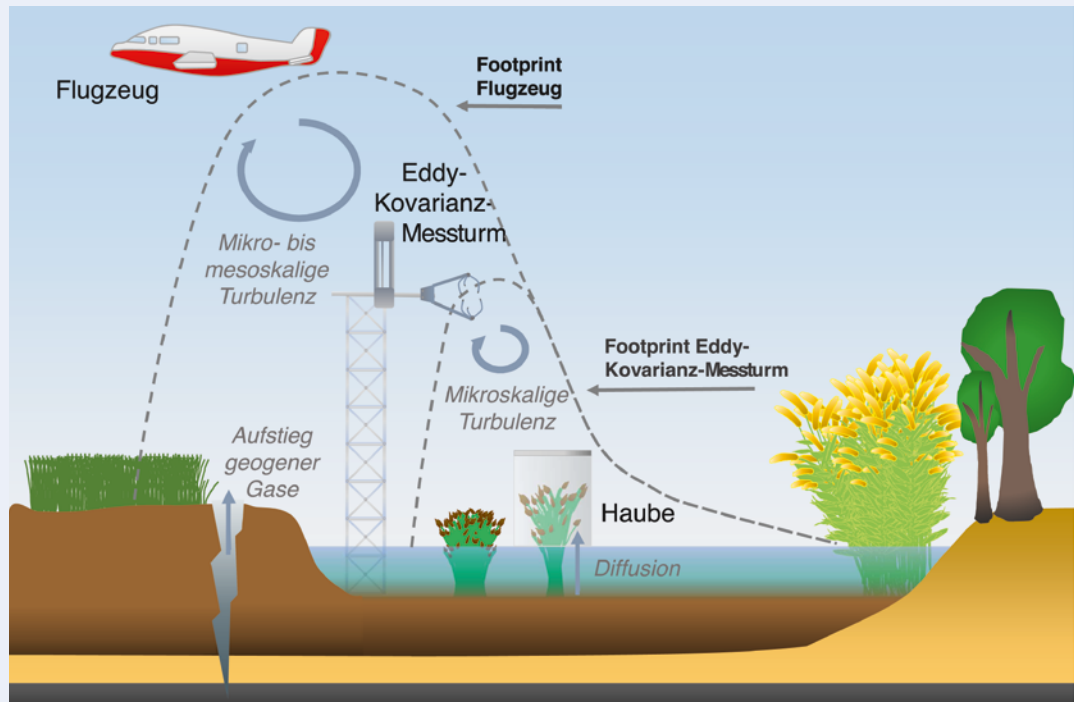


Abb. 2: Methoden zur Messung des Gasaustauschs zwischen Oberfläche und Atmosphäre auf verschiedenen räumlichen Skalen. Bei der Haubenmethode wird der diffusive Fluss über einer definierten Fläche ( $< 1 \text{ m}^2$ ) gemessen und kann direkt dem eingeschlossenen Geoökosystemelement zugeordnet werden. Mit einem fest installierten Eddy-Kovarianz-Messturm wird kontinuierlich der turbulente Energie- und Stoffaustausch über einer Fläche von mehreren Hektar quantifiziert. Mit einem Flugzeug als Trägerplattform ist zwar keine zeitlich kontinuierliche Messung mehr möglich, dafür kann aber regional die räumliche Variabilität bestimmt werden. Die gestrichelten Linien symbolisieren die von der Messung „gesehene“ Fläche (sog. Footprint; Abb.: GFZ).

Fig. 2: Methods to determine the gas exchange between surface and atmosphere on different spatial scales. The closed chamber method is suitable for quantifying the diffusive flux from small defined surfaces ( $< 1 \text{ m}^2$ ) and relate that flux directly to the enclosed element of the geocosystem. With a stationary eddy covariance tower, energy and gas exchange are continuously measured from an area of several hectares. Airborne eddy covariance does not allow for continuous measurements but is suited for quantifying regional spatial variability. The dotted lines symbolize the area “seen” by the measurement (so-called footprint).

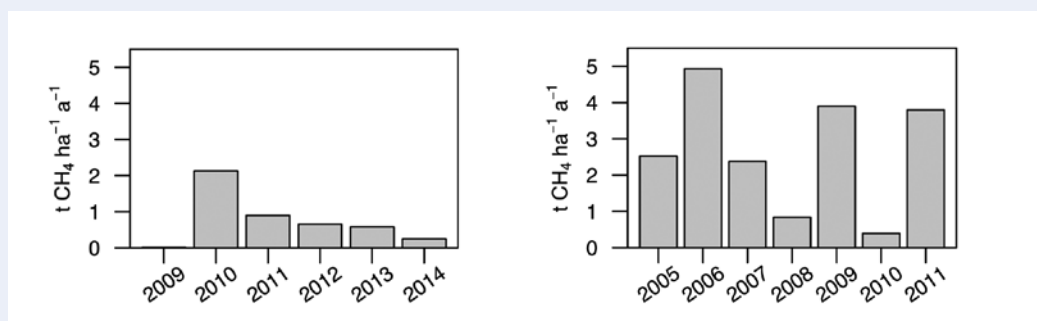


Abb. 3: Methanemissionen vor (2009) und nach (ab 2010) der Wiedervernässung des Hütelmoors (links) und nach der Wiedervernässung des Polders Zarnekow (rechts, Abb.: GFZ)

Fig. 3: Methane emissions before (2009) and after (starting 2010) re-wetting of the Hütelmoor (left) and after re-wetting of the Polder Zarnekow (right)

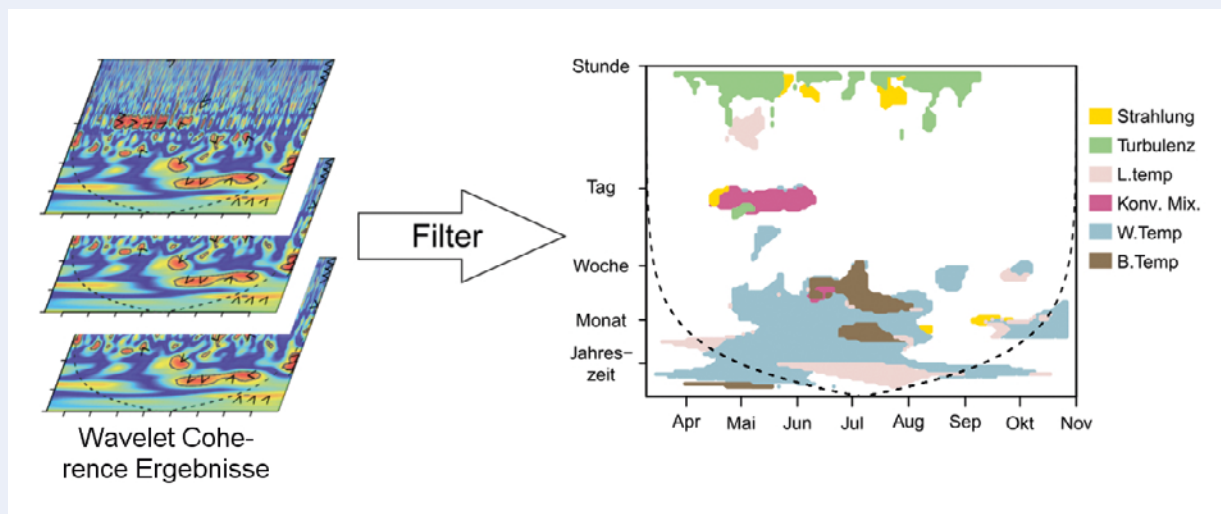


Abb. 4: Übersicht über das Zusammenwirken verschiedener Steuergrößen für die CH<sub>4</sub>-Emission auf verschiedenen Zeitskalen und im Jahresverlauf. Beispielsweise erzeugt die konvektive Durchmischung der Wassersäule (Konv. Mix.) – zumindest zeitweise – einen Tagesgang der CH<sub>4</sub>-Emissionen. (Abb.: GFZ)

Fig. 4: Overview of the interaction of different drivers for CH<sub>4</sub> emissions on various temporal scales within the course of a year. For example, convective mixing within the water column (Konv.Mix.) results – at least temporarily – in a diurnal cycle of CH<sub>4</sub> emissions.

## Wiedervernässte Küstenmoore als unterschätzte Methanquelle

Im Hütelmoor zeigt sich, dass auch Küstenmoore entgegen der allgemeinen Vorstellung extrem hohe Mengen an CH<sub>4</sub> emittieren können. Während die CH<sub>4</sub>-Emissionen im entwässerten Zustand vernachlässigbar gering waren, erhöhten sie sich im ersten Jahr nach Wiedervernässung um den Faktor 100 auf 2,1 t ha<sup>-1</sup> (Abb. 3) – ein Wert, der in natürlichen Feuchtgebieten bisher kaum gemessen wurde. Großflächiges Absterben der Vegetation bietet leicht zersetzbares Substrat für CH<sub>4</sub>-bildende Mikroorganismen (Hahn-Schöfl et al., 2011). In den Folgejahren sinken die CH<sub>4</sub>-Emissionen im Hütelmoor kontinuierlich, bleiben aber weiterhin auf einem für natürliche Feuchtgebiete hohen Niveau.

Küstenmoore weisen aufgrund ihres brackigen Charakters in der Regel hohe Sulfatgehalte auf, die die mikrobielle CH<sub>4</sub>-Produktion limitieren (Lovley und Klug, 1983). Obwohl die letzte Intrusion von Ostseewasser ins Hütelmoor bereits 1995 stattfand, messen wir noch heute hohe Salinitäten. Allerdings wurde das ostseebürtige Sulfat insbesondere in den obersten Torfschichten nahezu komplett mikrobiell abgebaut. In den obersten Torfschichten kann also effektiv CH<sub>4</sub> produziert werden. Das CH<sub>4</sub>-Emissionspotential von degradierten Küstenmooren hängt wesentlich von der Mobilität bzw. der Nachlieferung von Sulfat im Torf ab.

## Kein Ende in Sicht – hohe Treibhausgasemissionen im Polder Zarnekow

Die konsistente Abnahme der CH<sub>4</sub>-Emissionen im Hütelmoor in den Jahren nach der Wiedervernässung entspricht der gängigen Vorstellung über zunehmende Stofffestlegung in einem sich allmählich stabilisierenden System. Die Ergebnisse im Polder Zarnekow hingegen weichen deutlich von diesem Grundverständnis ab: auch zehn Jahre nach Wiedervernässung treten noch extrem hohe CH<sub>4</sub>-Flüsse auf, die zudem stark von Jahr zu Jahr schwanken und von ebenfalls weiterhin hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen begleitet werden – hier wird der Bedarf für langjährige Beobachtungsreihen besonders deutlich. Während im Allgemeinen angenommen wird, dass der Klimaeffekt der hohen CH<sub>4</sub>-Emissionen nach Wiedervernässung langfristig durch C-Festlegung im Torfkörper kompensiert wird, müssen wir für den Polder Zarnekow auch mehrere Jahre nach Wiedervernässung noch von einer stark positiven Klimabilanz ausgehen, die zu einem wesentlichen Teil von hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen bestimmt wird.

## Von Stunden zu Jahren – zeitliche Variationen der Methanflüsse

Globale Modelle zur Abschätzung von CH<sub>4</sub>-Emissionen aus Mooren sind noch immer mit hohen Unsicherheiten behaftet. CH<sub>4</sub> gelangt durch verschiedene Freisetzungsmechanismen

in die Atmosphäre, die sich gegenseitig überlagern und so zu komplexen zeitlichen Mustern führen. Mit Zeitreihenanalysen kann man die hohe Gesamtvariation der CH<sub>4</sub>-Emissionen spektral zerlegen und Korrelationen mit potentiellen Einflussfaktoren auf spezifischen Zeitskalen von Stunden bis Jahren untersuchen (Koebsch *et al.*, 2015) (Abb. 4).

So konnte in beiden untersuchten Mooren der Einfluss der konvektiven Durchmischung der Wassersäule als wichtige Steuergröße für hohe nächtliche CH<sub>4</sub>-Emissionen identifiziert werden – ein Prozess, der als saisonale Zirkulation aus Seen bekannt ist, in Flachwasserseen aber auch innerhalb des Tagesverlaufs zu beobachten ist und als solcher bisher kaum detailliert beschrieben wurde.

## Von Mecklenburg zum Polarkreis – und zurück

Die bisherigen Arbeiten in den Mooren Nordostdeutschlands konzentrierten sich auf die lokale Quantifizierung des Stoffhaushalts und Untersuchungen zum Prozessverständnis – für beide Aufgaben sind Langzeitmessungen unerlässlich und das TERENO-Konzept daher bestens geeignet. Künftig sollen diese Untersuchungen um eine flugzeugbasierte räumliche Komponente erweitert werden, so dass eine Einordnung und Bewertung der Standorte im regionalen Kontext möglich wird.

Die Mess- und Analysemethoden dazu wurden in den letzten drei Jahren im Rahmen zahlreicher Kampagnen in den arktischen Permafrostgebieten entwickelt. Neben wissenschaftlichem Interesse an Treibhausgasemissionen aus den hier weit verbreiteten permafrostbedingten Feuchtgebieten, aber auch Gashydraten und oberflächennahen Kohlenwasserstofflagerstätten eignete sich die Region insbesondere auch zur Etablierung und Perfektionierung der Methode. Dünne Besiedelung, weite Flächen und das Fehlen jeglicher Hindernisse wie Bäume, Mobilfunkmasten, Windkraftanlagen und Stromleitungen ermöglichten Messungen unter Idealbedingungen entlang tausender Kilometer in niedriger Flughöhe (<50 m). Die nunmehr ausgereifte Methode lässt sich leichter in unsere heimischen Gebiete übertragen, als wenn sie hier unter weniger idealen Bedingungen und bei entsprechend geringerer Datenausbeute hätte entwickelt werden müssen.

Diese regionalen Untersuchungen von Wärmequellen, Verdunstung und Treibhausgasemissionen in Nordostdeutschland sind für 2015/2016 an Bord des Do-128-Forschungsflugzeugs D-IBUF der Technischen Universität Braunschweig geplant.

## Literatur

- Hahn-Schöfl, M., Zak, D., Minke, M., Gelbrecht, J., Augustin, J., Freibauer, A. (2011): Organic sediment formed during inundation of a degraded fen grassland emits large fluxes of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>. - *Biogeosciences*, 8, 6, p. 1539-1550.
- Koebsch, F., Glatzel, S., Hofmann, J., Forbrich, I., Jurasinski, G. (2013): CO<sub>2</sub> exchange of a temperate fen during the conversion from moderately rewetting to flooding. - *Journal of Geophysical Research*, 118, 2, p. 940-950.
- Koebsch, F., Jurasinski, G., Koch, M., Hofmann, J., Glatzel, S. (2015): Controls for multi-scale temporal variation in ecosystem methane exchange during the growing season of a permanently inundated fen. - *Agricultural and Forest Meteorology*, 204, p. 94-105.
- Lovley, D. R., Klug, M. J. (1983): Sulfate reducers can outcompete methanogens at freshwater sulfate concentrations. - *Applied and Environmental Microbiology*, 45, 1, p. 187-192.
- Petrescu, A. M. R., Lohila, A., Tuovinen, J.-P., Baldocchi, D. D., Desai, A. R., Roulet, N. T., Vesala, T., Dolman, A. J., Oechel, W. C., Marcolla, B., Friborg, T., Rinne, J., Matthes, J. H., Merbold, L., Meijide, A., Kiely, G., Sottocornola, M., Sachs, T., Zona, D., Varlagin, A., Lai, D. Y. F., Veenendaal, E., Parmentier, F.-J.-W., Skiba, U., Lund, M., Hensen, A., van Huissteden, J., Flanagan, L. B., Shurpali, N. J., Grünwald, T., Humphreys, E. R., Jackowicz-Korczyński, M., Aurela, M. A., Laurila, T., Grüning, C., Corradi, C. A. R., Schrier-Uijl, A. P., Christensen, T. R., Tamstorf, M. P., Mastepanov, M., Martikainen, P. J., Verma, S. B., Bernhofer, C., Cescatti, A. (2015): The uncertain climate footprint of wetlands under human pressure. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 112, 15, p. 4594-4599.
- Zak, D., Wagner, C., Payer, B., Augustin, J., Gelbrecht, J. (2010): Phosphorus mobilization in rewetted fens: the effect of altered peat properties and implications for their restoration. - *Ecological Applications*, 20, 5, p. 1336-1349.

# Mikrobiologische Prozesse in CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanälen

Mashal Alawi, Tobias Nickschick, Horst Kämpf  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Microbial processes in the so-called 'Deep Biosphere' and the link to geological processes are not well understood. We hypothesize that in active fault zones and especially in CO<sub>2</sub>-conduits, due to an intensified substrate support, microbial processes are significantly accelerated compared to other continental Deep Biosphere ecosystems. Therefore active fault zones could be seen as 'Hot Spots' of microbial life in the deep subsurface. The Cheb Basin (Czech Republic) is a shallow Neogene, intracontinental basin filled with fluvial and lacustrine sediments. The intersection area of the north-south striking Počátky-Plesná Fault zone with the northwest-southeast directed Mariánské Lázně Fault Zone is nearly permanently seismically active (earthquake swarms up to M 4.5). South of the epicentral area two CO<sub>2</sub>-diffuse degassing structures are visible on a decameter scale. The CO<sub>2</sub>-conduits are considered as important structures for the understanding of lithospheric mantle-crust interaction processes via mantle fluids, however rock-fluid and geo-bio interactions are barely understood in this system. Moreover, there are hints that the microbial turnover in this region, e.g. CH<sub>4</sub> production, is significantly accelerated after earthquakes. In the frame of a DFG project a pre-examination study to a planned international ICDP-drilling campaign started, which includes a 120 m deep drilling at the Hartoušov mofette field. The aim of the study is to get first insights into the microbial community structure by applying modern high-throughput DNA sequencing techniques and geochemical analysis.*



Für die Erforschung des Systems Erde haben die Prozesse im tiefen Untergrund eine ähnliche Bedeutung wie die oberflächennahen Prozesse. Betrachtet man die globalen Stoffkreisläufe, wird deutlich, dass beide Bereiche eng verknüpft sind (vgl. Beitrag von Kallmeyer „Die tiefe Biosphäre“ in diesem Heft). Auch in der Tiefe katalysieren Mikroorganismen die Interaktionen zwischen den Fluiden und dem Gestein. Von besonderem Interesse sind dabei Bruchstörungszonen, weil dort aktive Energie- und Stoffaustauschprozesse (Erdbeben, Fluidtransport) stattfinden, die sich auf die Entstehung von Biomolekülen und die Aktivität der Mikroorganismen auswirken. Das hierzu verfügbare Wissen ist jedoch noch sehr gering (z. B. Bräuer et al., 2005a; Schreiber et al., 2012).

Im Rahmen des am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ koordinierten DFG-Projekts „Mikrobielle Prozesse in der Tiefen Biosphäre der CO<sub>2</sub>-dominierten aktiven Störungszone in NW-Böhmen“ wird die Wechselwirkung zwischen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-gesättigten Fluiden, Gesteinen und mikrobiellen Prozessen in einem seismisch- und mantelfluid-aktiven Gebiet untersucht. Die gewonnenen Daten bilden eine wichtige Grundlage für das im Rahmen des International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) beantragte internationale Bohrprojekt „Drilling the Eger Rift: an observatory for study of fluid flow through the crust, non-volcanic, mid-crustal earthquake swarms and the deep biosphere“ (Dahm et al., 2013).

## Magmen-/Fluidaufstieg und Erdbebenschwärme

Die Region Vogtland-Nordwest-Böhmen-Nordost-Bayern (westlicher Ohře-/Eger-Graben), Teil eines etwa 150 km langen und rund 40 km breiten Gebiets zwischen Mariánské Lázně/Marienbad und Leipzig, ist bekannt für ihre Erdbebenschwärme und

tektonischen Beben. Bei Erdbebenschwärmen handelt es sich um eine besondere Art von Seismizität, die weltweit typisch ist für aktive ozeanische bzw. kontinentale Grabenzonen (Rifts) mit magmatischem und/oder vulkanischem Geschehen. Erdbebenschwärme haben kein herausragendes seismisches Ereignis wie tektonische Beben. Große Schwärme können bis zu mehreren Monaten andauern. Sie setzen sich aus einer Vielzahl von nahezu gleichstarken Beben zusammen, die häufig eine ähnliche Wellenform aufweisen.

Unser Studiengebiet, das Cheb-Becken (Tschechien), ist ein kleines intrakontinentales Sedimentbecken, das mit Sedimenten aus dem Tertiär und Quartär gefüllt ist. Das Cheb-Becken liegt im Zentrum des Kreuzungsbereichs des Eger-Grabens und der Regensburg-Leipzig-Rostock-Zone. Bisher sind aus dem Quartär nur zwei kleine Schlackenkegel und ein Maar bekannt (Altersbereich: 0,12 bis 0,78 Mio. Jahre). Neben dem Rio Grande-Rift und dem Bereich des Ostafrikanischen Tiefenbruchs in Kenia zählt die Region mit dem Cheb-Becken zu den seismisch aktivsten kontinentalen Erdbebenschwarmgebieten ohne aktiven Vulkanismus weltweit (Fischer et al., 2014).

Charakteristisch sind zahlreiche Mineralquellen und CO<sub>2</sub>-Austritte (Mofetten), die zum Teil als Kurbäder und Mineralwasser-Produktionsstätten wirtschaftlich intensiv genutzt werden (Bädereinrichtungen im Bereich der Tschechischen Republik: Františkovy Lázně/Franzensbad, Karlovy Vary/Karlsbad, Mariánské Lázně/Marienbad; in Deutschland: Bad Elster, Bad Brambach, Sybillenbad). Grundsätzlich wird zwischen trockenen und nassen Mofetten unterschieden, beide Typen kommen im Untersuchungsgebiet vor (Abb. 1).

Im Ergebnis einer regionalen gas- und isotopengeochemischen Kartierung von CO<sub>2</sub>-Austrittsstellen im westlichen Eger-Graben konnte mittels Helium- und Kohlenstoffisotopie nachgewiesen werden, dass das CO<sub>2</sub>-dominierte Quellgas magmatischen Ursprungs ist und aus dem lithosphärischen Mantel stammt (Weinlich et al., 1999). Im Vergleich zu diesen Ergebnissen aus den Jahren 1992 bis 1996 wurden im Ostteil des Cheb-Beckens ab 2000 deutlich höhere <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-Verhältnisse gemessen, während sich im Entgasungsgebiet von Marienbad und Umgebung kein Anstieg zeigte (Bräuer et al., 2005b). Der Anstieg an Mantelhelium erfolgte nach 2000 progressiv zuerst an der Mofette Bublák (Abb. 1a und 2). Unter diesem Gebiet wird eine aktive magmatische Quelle mit räumlich-zeitlicher Dynamik vermutet. Im Frühjahr 2006 wurde an Entgasungsstellen im Ostteil des Cheb-Beckens ein etwa drei Monate andauernder, weiterer Anstieg von Mantelhelium beobachtet. Es wird angenommen, dass für diesen Anstieg die Zufuhr von frischem, weniger entgastem Magma aus einem tieferen Re-

Links: Transekt der Vegetation und des CO<sub>2</sub>-Gehalts im Bublák-Mofettenfeld, nördlich von Hartoušov (Tschechien).

Der unterschiedliche Bewuchs ist indikativ für die Stärke der CO<sub>2</sub>-Entgasung. Es wurden, ausgehend vom Zentrum der CO<sub>2</sub>-Entgasungsstelle (Vordergrund), drei Flachbohrungen durchgeführt. Dargestellt am linken Bildrand ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration in ca. 80 cm Tiefe. (Foto: M. Alawi, GFZ)

Left: Transect of vegetation and CO<sub>2</sub> content in the Bublák mofette field, north of Hartoušov (Czech Republic). Differences in the vegetation are indicative for the strength of CO<sub>2</sub> degassing. Beginning from the center of the CO<sub>2</sub>-degassing (foreground), three drillings were sunk. On the left of the picture the CO<sub>2</sub> concentration in a depth of around 80 cm is indicated.



Kontakt: M. Alawi  
(mashal.alawi@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: a) Nasse, stark entgasende Mofette (etwa 3 m Durchmesser) in Bublák, b) trockene Mofette (etwa 0,6 m Durchmesser) in der Nähe von Hartoušov (Foto: M. Alawi, GFZ)

Fig. 1: a) A wet, strongly CO<sub>2</sub>-degassing mofette (ca. 3 m in diameter) at Bublák; b) a dry mofette (0.6 m in diameter) near Hartoušov

servoird verantwortlich ist. Dieses Reservoir wird an der Basis des lithosphärischen Mantels in 65 km Tiefe vermutet (Abb. 2).

Als Ursache für die Seismizität im Untersuchungsgebiet wird angenommen, dass es beim Aufstieg der Fluide durch den lithosphärischen Mantel und die Erdkruste in manchen Bereichen zu Fluidporenüberdruck kommt, der zu Spannungs- und Entspannungsreaktionen (Seismizität, seismisch hervorgerufenem Fluidtransport) führt. In den vergangenen drei Jahrzehnten gab es sechs Erdbebenperioden, die sich durch Ereignisse mit einer Lokalmagnitude über Stärke 3 auszeichnen haben (Fischer et al., 2014). Diese Erdbeben treten gewöhnlich in einer Tiefe von 6,6 bis 11 km im Gebiet um Nový Kostel auf, wobei jedoch an der Oberfläche keine größeren Entgasungserscheinungen, wie z. B. Mofetten oder Mineralquellen, beobachtet werden können.

Ganz anders dagegen im etwa 10 km südlich davon gelegenen Bereich um den Ort Hartoušov: Während hier keine seismische

Aktivität registriert wird, zeichnet sich das Gebiet durch starke, CO<sub>2</sub>-dominierte Entgasungen im Oberflächenbereich aus. An einigen Stellen entlang der Počátky-Plesná-Störungszone (eine Bruchstörung innerhalb der Regensburg-Leipzig-Rostock-Zone) lassen sich tägliche Entgasungsmengen von bis zu 100 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> messen. Diese starken Entgasungen treten jedoch nur im Zentrum des Tals des Flusses Plesná auf. Dies deutet auf den ungefähren Verlauf der Bruchstörungszone hin (Abb. 3).

### Mikrobielle Prozesse in CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanälen

Im Vergleich zu vielen oberflächennahen Ökosystemen ist die Verfügbarkeit von organischen Kohlenstoffquellen innerhalb der von Mikroorganismen besiedelten Bereiche der Oberkruste zwischen etwa 1 und 5 km Tiefe stark eingeschränkt. Die geringe Wasserverfügbarkeit und Diffusion bedingen den geringen Austausch von Nährstoffen und weiteren lebenswichtigen Elementen. Daher laufen mikrobielle Prozesse und Zellteilungs-raten im Bereich der tiefen Biosphäre normalerweise nur sehr langsam ab. Ein besonderes Merkmal von Mikroorganismen ist ihre Fähigkeit, einerseits extrem lange Perioden ohne Substrate unter widrigen Umweltbedingungen zu überdauern und andererseits unverzüglich auf bessere Bedingungen durch Wachstum zu reagieren.

So gibt es Hinweise darauf, dass die mikrobielle Methanbildung nach Schwarmbeben im Eger-Graben beschleunigt wird (Bräuer et al., 2005a). Etwa acht Wochen nach einem Schwarmbeben im Jahr 2000 konnte ein deutlicher Anstieg der Methankonzentration des mikrobiell gebildeten Methans in der Gasphase von Fluiden der Wettin-Quelle bei Bad Brambach beobachtet werden. Aufgrund von Kohlenstoffisotopenmessungen am Methan stellte sich heraus, dass der Anstieg der Methankonzentration durch Zufuhr von mikrobiell gebildetem Methan verursacht worden ist. Eine Erklärung für den Zusammenhang zwischen beschleunigter mikrobieller Methanbildung und der Erdbebenaktivität könnte eine durch das Beben begünstigte Freisetzung von Wasserstoff aus dem Granit sein. Wasserstoff und CO<sub>2</sub> sind die Schlüssel-moleküle der mikrobiellen Methanbildung durch sogenannte methanogene Archaeen. Während CO<sub>2</sub> durch den Transport von CO<sub>2</sub>-reichen Fluiden aus dem lithosphärischen Mantel in ausreichender Konzentration in der Oberkruste vorliegt, könnte Wasserstoff in diesem System ein Minimumfaktor sein, der letztlich die Prozessgeschwindigkeit bestimmt. Der durch seismische Aktivität freigesetzte Wasserstoff dient den methanbildenden Mikroorganismen als primäres Reduktionsmittel. Offen ist hierbei, in welchen Tiefen diese Geo-Bio-Kopplung stattfindet. Aus mikrobiologischer Sicht könnten die CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanäle „Hot Spots“ der mikrobiellen Aktivität sein. Während die Nährstoffzufuhr in großen Tiefen häufig eingeschränkt ist und somit die mikrobielle Aktivität im Vergleich zu oberflächennahen Ökosystemen viel geringer ist, könnten die durchströmenden CO<sub>2</sub>-reichen Fluide Nährstoffe mobilisieren. Ein wichtiger Mechanismus, der die Nährstoffzufuhr

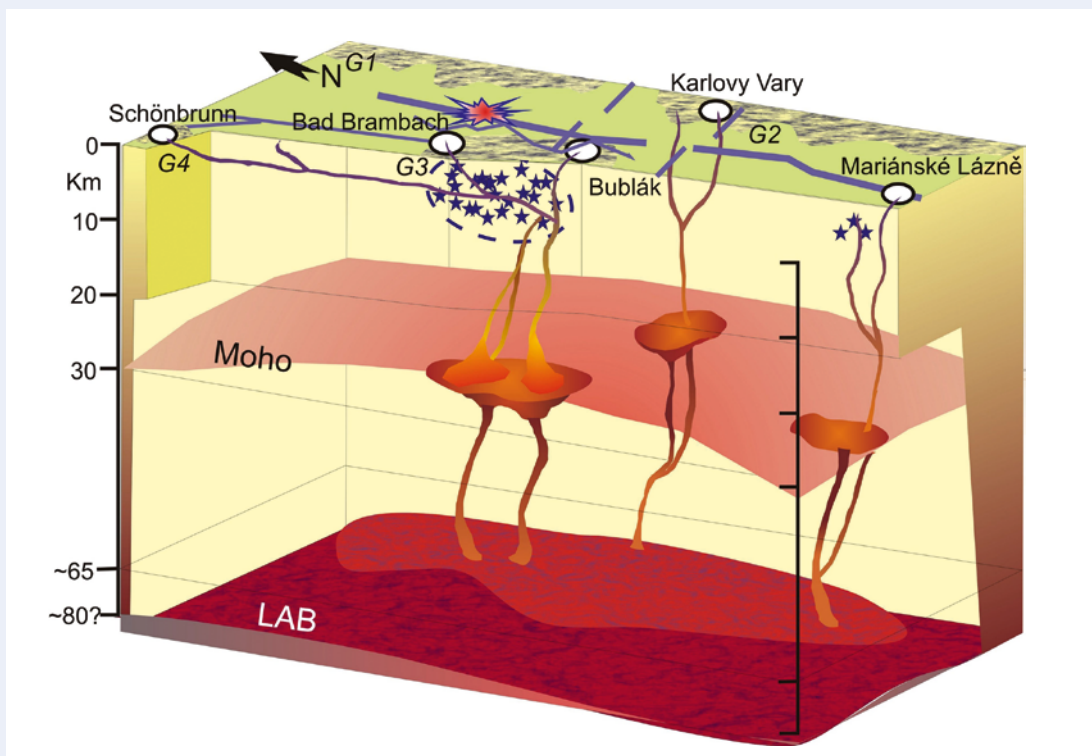


Abb. 2: Schematisches 3D-Modell des CO<sub>2</sub>-reichen Schmelz- und Fluidtransports, der von der Lithosphäre-Asthenosphäre-Grenze (LAB) durch den oberen lithosphärischen Mantel, die Moho und die Erdkruste bis zur Oberfläche reicht. Helium- und Kohlenstoffisotopensignaturen deuten auf verschiedene Magmenkammern in Moho-Tiefe, aber auf ein gemeinsames Reservoir im oberen Mantel hin. Erdbebenaktivität mit Herdtiefen zwischen 6,6 und 11 km sind im Gebiet um Nový Kostel konzentriert (markiert mit rotem Stern), während oberflächennahe CO<sub>2</sub>-Entgasung überwiegend in der Nähe des Bublák- und des Hartoušov-Mofettenfelds zu beobachten ist (verändert nach Bräuer et al., 2011).

Fig. 2: 3D conceptual model of melt and fluid ascent (CO<sub>2</sub>-dominated) from the bulged lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) through the upper lithospheric mantle, Moho and the Earth's crust to the surface. Different isotopic signatures (He, C) hint at multiple magma chambers at Moho depths, but one common, deep reservoir in the Upper Mantle. While earthquakes occur between 6.6 and 11 km depth beneath the Nový Kostel focal zone (reddish star), surface CO<sub>2</sub> degassing occurs mainly at the Bublák and the nearby Hartoušov mofette area (modified after Bräuer et al., 2011).

und Wassermobilität in den CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanälen verbessert, ist wahrscheinlich die CO<sub>2</sub>-bedingte Ausspülung und Lösung organischer Moleküle aus dem Sediment und Gestein. Daher ist die Untersuchung dieser Fluid-Gestein-Interaktionen von besonderer Bedeutung.

Um diese Geo-Bio-Interaktionen weiter aufzuklären, wird mittels quantitativer Polymerase-Kettenreaktion (qPCR) und DNA-Hochdurchsatzsequenzierung die Zellzahl sowie die Struktur der mikrobiellen Gemeinschaft sehr hoch aufgelöst. Als Vorarbeiten wurden zunächst Wässer von Mineralquellen und nassen Mofetten über einen Zeitraum von anderthalb Jahren beprobt. Hinzu kommen Sedimente aus bis zu 8 m Tiefe, die während einer Bohrkampagne im August 2014 in den Mofetten-

Gebieten Hartoušov und Bublák entnommen wurden. Diese Voruntersuchungen an oberflächennahen Fluiden sollen einen Einblick in die Anpassungsmechanismen und die Diversität der Mikroorganismen liefern. Ferner soll beobachtet werden, ob sich die mikrobielle Gemeinschaft nach einer Erdbebenaktivität hinsichtlich der Quantität oder Diversität verändert. In den Mineralwässern und nassen Mofetten wurde eine beachtliche Anzahl an Mikroorganismen nachgewiesen. Die Zellzahlen liegen je nach Standort zwischen 10<sup>3</sup> bis 10<sup>8</sup> Zellen pro Liter Fluid. Bislang wurden etwa 10 Mio. DNA-Sequenzen aus Brunnenwässern und nassen Mofetten erhalten und durch Datenbankanalysen ausgewertet. Es konnten in großen Anteilen sogenannte chemolithoautotrophe Mikroorganismen nachgewiesen werden. Diese Organismen gewinnen ihre Energie durch die Oxidation

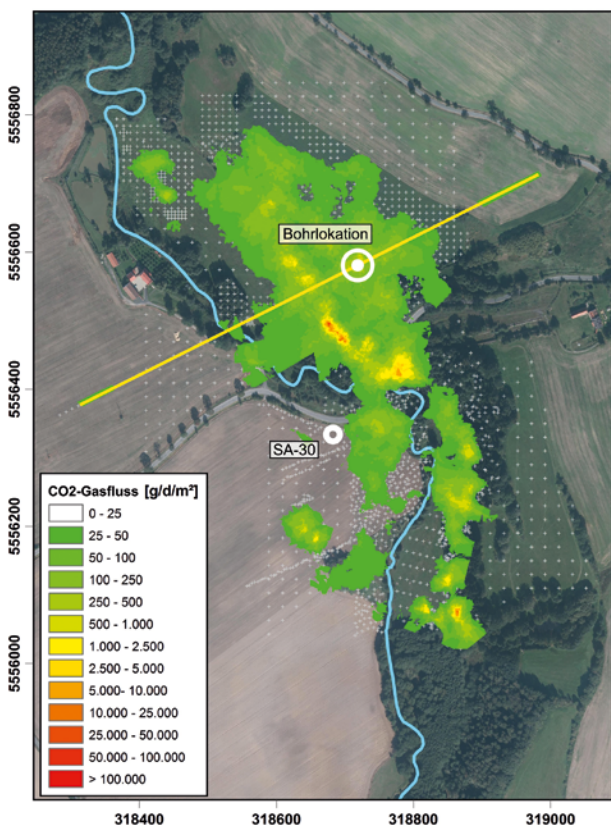


Abb. 3: Dargestellt ist die Entgasung von CO<sub>2</sub> und die Lage der geplanten 120 m tiefen Bohrung im Hartoušov-Mofettenfeld; „SA-30“ zeigt eine Bohrung aus dem Jahr 1957 an. Die orange Linie markiert ein geoelektrisches Profil und Schweremessungen (verändert nach Nickschick et al., 2015).

Fig. 3: Map showing measured CO<sub>2</sub> gas fluxes and the location of the planned 120 m deep drilling in the Hartoušov mofette field. 'SA-30' indicates the position of a geological drilling done in 1957. The orange line marks the location of a geoelectrical profile and gravity measurements (modified after Nickschick et al., 2015).

von anorganischen Molekülen wie Wasserstoff, Schwefel-, Stickstoff- und Eisenverbindungen. Den für das Zellwachstum notwendigen Kohlenstoff beziehen sie aus dem CO<sub>2</sub>. Die nachgewiesenen Bakterien und Archaeen sind anaerob oder mikroaerophil, benötigen also zum Wachstum keinen oder nur Spuren von Sauerstoff. Neben den methanbildenden Archaeen wurde auch eine hohe Anzahl bakterieller Gattungen wie *Sulfurimonas*, *Sulfuricurvum* und *Gallionella*, die am Schwefel- und Eisenkreislauf beteiligt sind, nachgewiesen. Anscheinend sind die autochthonen Mikroorganismen bestens an die erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen angepasst.

Parallel zu den molekularbiologischen Untersuchungen wurden Anreicherungskulturen auf selektiven flüssigen Medien für sulfatreduzierende Bakterien und methanbildende Archaeen angesetzt. Ziel ist es, Reinkulturen von diesen Organismen zu erhalten, um diese im Detail physiologisch und phylogenetisch charakterisieren zu können. In weiterführenden Laborversuchen können dann ausgewählte Umweltparameter, wie beispielsweise die CO<sub>2</sub>- und Wasserstoffkonzentration, variiert werden, um den Einfluss auf die mikrobielle Aktivität zu untersuchen.

## Ausblick

Es zeigt sich, dass die Aufschlüsselung der komplexen Interaktionen zwischen geologischen und biologischen Prozessen in aktiven Bruchstörungszonen ein wichtiger Aspekt bei der Erforschung des Systems Erde darstellt. Nur eine ganzheitliche Erforschung der Prozesse unter Einbeziehung verschiedener Forschungsdisziplinen ermöglicht es uns, den globalen Wandel zu verstehen und Ressourcen nachhaltig zu nutzen. Derzeit plant das GFZ einen solchen interdisziplinären Forschungsansatz im Rahmen einer 120 m tiefen Bohrung, die im Herbst 2015 im Gebiet des Hartoušov-Mofettenfelds niedergebracht werden soll. Ziel ist es, die Geo-Bio-Kopplung im Untergrund besser zu verstehen und detaillierte Einblicke in die strukturelle und stoffwechselphysiologische Diversität der tiefen Biosphäre zu erlangen. Da die Bohrung bis in das Kristallin reichen wird, spielen hierbei auch die biologische Gesteinsverwitterung und Gestein-Fluid-Wechselwirkungen eine wichtige Rolle. Eine Besonderheit dieser Bohrung ist es, neben der Lage im Entgasungsgebiet, dass sie den Ansprüchen kombinierter mikrobiologischer und geochemischer Untersuchungen gerecht wird. Dies beinhaltet das Kernchen über das gesamte Bohrprofil unter Einsatz von Linern sowie eine Kontaminationskontrolle mittels Tracern, die der anorganischen Bohrspülung zugesetzt werden.



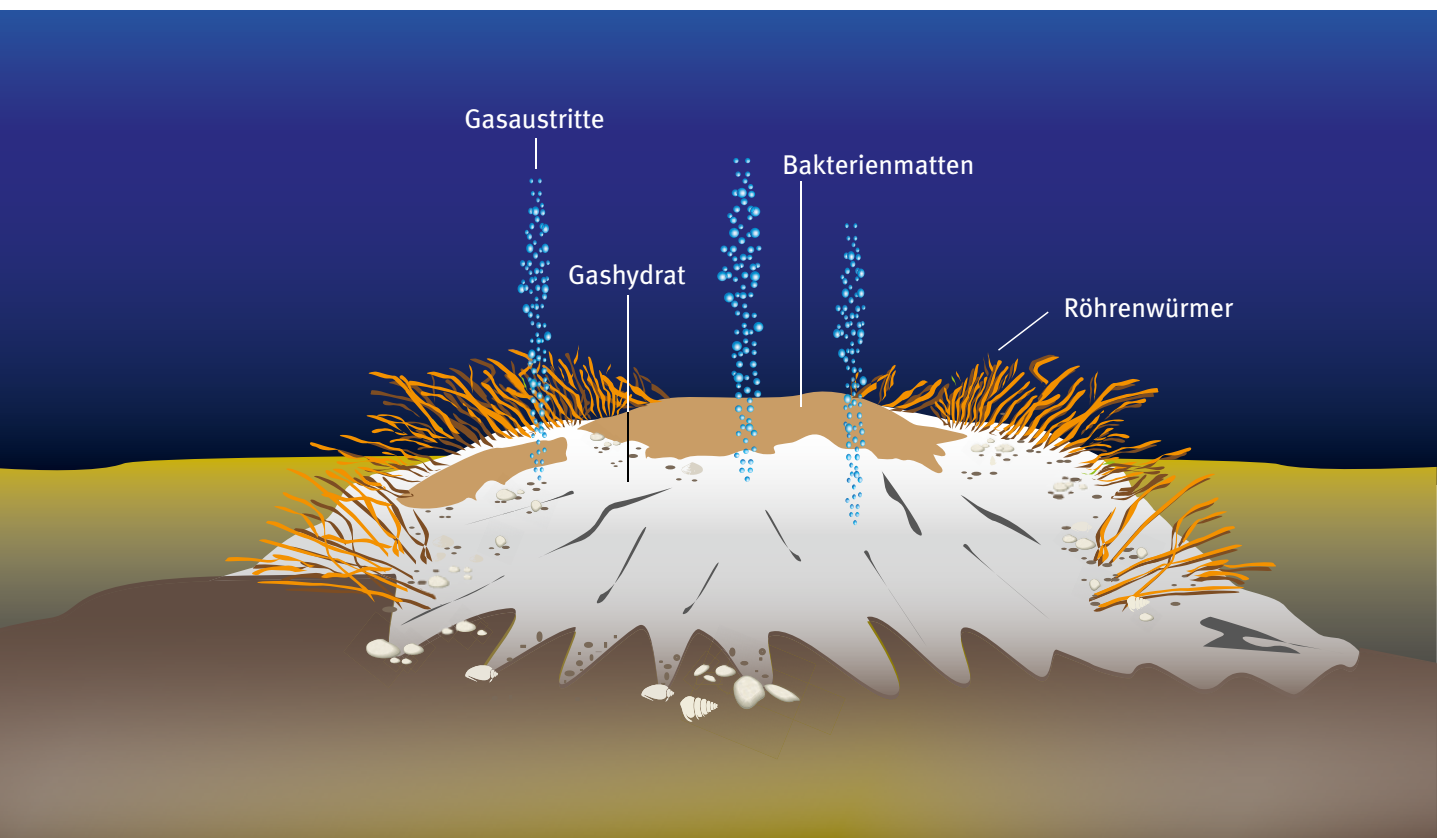
## Literatur

- Bräuer, K., Kämpf, H., Faber, E., Koch, U., Nitzsche, H. M., Strauch, G. (2005a): Seismically triggered microbial methane production relating to the Vogtland - NW Bohemia earthquake swarm period 2000, Central Europe. - *Geochemical Journal*, 39, 5, p. 441-450.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Niedermann, S., Strauch, G. (2005b): Evidence for ascending upper mantle-derived melt beneath the Cheb basin, central Europe. - *Geophysical Research Letters*, 32, 8, p. L08303.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Koch, U., Strauch, G. (2011): Monthly monitoring of gas and isotope compositions in the free gas phase at degassing locations close to the Novy Kostel focal zone in the western Eger Rift, Czech Republic. - *Chemical Geology*, 290, 3-4, p. 163-176.
- Dahm, T., Hrubcová, P., Fischer, T., Horálek, J., Korn, M., Buske, S., Wagner, D. (2013): Eger Rift ICDP: an observatory for study of non-volcanic, mid-crustal earthquake swarms and accompanying phenomena. - *Scientific drilling: reports on deep earth sampling and monitoring*, 16, p. 93-99.
- Fischer, T., Horálek, J., Hrubcová, P., Vavryuk, V., Bräuer, K., Kämpf, H. (2014): Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review. - *Tectonophysics*, 611, p. 1-27.
- Schreiber, U., Locker-Grütjen, O., Mayer, C. (2012): Hypothesis: origin of life in the deep-reaching tectonic faults. – *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 42, 1, p. 47-54.
- Nickschick, T., Kämpf, H., Flechsig, C., Mrlina, J., Heinicke, J. (2015 online): CO<sub>2</sub> degassing in the Hartoušov mofette area, western Eger Rift, imaged by CO<sub>2</sub> mapping and geoelectrical and gravity surveys. - *International Journal of Earth Sciences*.
- Weinlich, F., Bräuer, K., Kämpf, H., Strauch, G., Tesar, J., Weise, S. M. (1999): An active subcontinental mantle volatile system in the western Eger rift, Central Europe: Gas flux, isotopic (He, C, and N) and compositional fingerprints. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 21, p. 3653-3671.

# Die Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Gashydraten

Manja Luzi-Helbing, Kai Mangelsdorf, Dirk Wagner, Judith M. Schicks  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The relationship between gas hydrates, microorganisms and the surrounding sediment is extremely complex. Microorganisms can either act as producer or consumer of organic compounds. By converting organic matter microorganisms produce methane and therefore provide the prerequisite for gas hydrate formation. In natural environment clay minerals immobilize the substrates feeding the methane producing microorganisms. As a result of microbial activity gas hydrates are surrounded by a great variety of organic compounds which are not incorporated into the hydrate structure but influence the formation process. Through anaerobic metabolic activity special bacteria produce biosurfactants which were found to enhance the hydrate formation process significantly and act as nucleation centres. Another source of organic compounds is sediment organic matter (SOM) originating from plant material or animal remains which may also enhance hydrate growth. On the other hand methane is an energy source for special microbial methanotroph communities growing either aerobically or anaerobically. In sediments containing oxygen this methane will be oxidized into carbon dioxide. In the lower parts of the sediment methane originating from gas hydrates is oxidized anaerobically into bicarbonate by methanogenic archaea and sulphur reducing bacteria. In presence of dissolved calcium bicarbonate precipitates as calcium carbonate and forms carbonate crusts within the upper sediment layers of the sea floor.*



Gashydrate sind kristalline, eisähnliche Feststoffe, die aus einem dreidimensionalen Netzwerk aus Wassermolekülen bestehen. Die Wassermoleküle sind über Wasserstoffbrückenbindungen verbunden und können verschiedene Käfigstrukturen ausbilden. Diese Käfigstrukturen werden durch den Einbau von Gastmolekülen stabilisiert. Gashydrate entstehen bei niedrigen Temperaturen unter erhöhten Drücken in Anwesenheit von ausreichenden Mengen an Gas und Wasser. In der Natur kommen sie daher an passiven und aktiven Kontinentalrändern, aber auch in tiefen Seen und in Permafrostgebieten vor. In natürlichen Gashydraten wird überwiegend Methan als Gastmolekül in die Hydratstrukturen eingebaut. In den globalen Hydratvorkommen werden enorme Mengen Methangas vermutet, was die natürlichen Gashydrate als Energieträger interessant macht, sie aber auch als eine potentielle Gefahrenquelle für eine unkontrollierte Freisetzung dieses Treibhausgases erscheinen lässt. Es ist daher von großer Bedeutung, die Entstehung und das Verhalten natürlicher Gashydrate in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung zu verstehen. Diese Wechselwirkungen können physikalischer, chemischer und biologischer Natur sein. Im Rahmen der Grundlagenforschung befassen sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ mit dem Verständnis dieser Wechselwirkungen, um basierend auf diesen Erkenntnissen auch angewandte Fragestellungen, wie z. B. die Gewinnung von Energie aus natürlichen Hydratlagerstätten zu erforschen.

Neben dem Hauptbestandteil Methan können auch andere Gase wie Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff oder höhere Kohlenwasserstoffe in die Käfigstrukturen des Hydrats eingelagert werden. So konnte in Proben vom Cascadia margin vor der Küste Kanadas *n*-Hexan und Methylcyclohexan im Hydrat nachgewiesen werden (Lu *et al.*, 2007). Die in der Natur in den Hydratkäfigen eingebauten Gasmoleküle stammen aus biogenen und/oder thermogenen Quellen. Biogenes Gas entsteht durch den mikrobiellen Abbau von organischem Material und enthält über 99% Methan. Thermogenes Gas stammt aus tieferen Schichten und entsteht bei der thermischen Zersetzung von organischem Material in sogenannten Muttergesteinen, die reich an organischem Kohlenstoff sind, bei Temperaturen über 373 K. Bei diesem Prozess werden auch höhere verzweig-

te und unverzweigte Kohlenwasserstoffe gebildet (Kvenvolden, 1995). Die Zusammensetzung des hydratgebundenen Gases gibt somit einen Hinweis auf seine Herkunft: enthält das Hydrat neben Methan auch höhere Kohlenwasserstoffe, kommt das eingeschlossene Gas aus thermogenen Quellen. Aber auch wenn das hydratgebundene Gas ausschließlich aus Methan besteht, kann anhand des Isotopenverhältnisses der stabilen Kohlenstoffisotope  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  des eingeschlossenen Methans zwischen biogener und thermogener Gasquelle unterschieden werden, da im Vergleich zu thermogenem Methan bei biogenem Methan der Anteil der  $^{13}\text{C}$ -Isotope geringer ist. Viele marine Gashydratvorkommen enthalten mikrobiell erzeugtes Methan.

### Der Einfluss organischer Komponenten auf das Gashydratwachstum

Das Vorkommen natürlicher Gashydrate wird im Wesentlichen durch drei Faktoren bestimmt: erhöhter Druck, niedrige Temperaturen und ausreichende Mengen an Wasser und Gas. Die Stabilität und die Bildungsgeschwindigkeit werden jedoch durch eine Reihe weiterer Größen wie beispielsweise die Zusammensetzung des hydratgebundenen Gases, den Salzgehalt oder die Beschaffenheit des Sediments beeinflusst. In der Natur sind Gashydrate zudem von einer Fülle organischen Materials als Folge mikrobieller Aktivität umgeben. Dazu zählen sogenannte Biotenside und sedimentäres organisches Material. Es wird vermutet, dass Mikroorganismen, die im Meeresboden in der Gashydratstabilitätszone leben, Biotenside unter anaeroben Bedingungen produzieren und das Gashydratwachstum beeinflussen können (Rogers *et al.*, 2007). Unter sedimentärem organischem Material versteht man organische Verbindungen, die aus pflanzlichen oder tierischen Überresten stammen. Es ist der Oberbegriff für eine Vielzahl organischer Verbindungen, die sich im Wesentlichen drei biochemischen Stoffklassen zuordnen lassen: Kohlenhydrate, Lipide und Proteine (Kelleher *et al.*, 2007). In Laborexperimenten wurde der Einfluss organischen Materials auf die Induktionszeit (Zeitraum bis zum Einsetzen der Hydratkristallbildung) und die Geschwindigkeit des Hydratwachstums untersucht. Einige der Ergebnisse sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Tenside einschließlich Biotenside bestehen aus einem hydrophoben („wasserabweisenden“) Ende (meist ein längerer Kohlenwasserstoffrest) und einer hydrophilen („wasserliebenden“) Endgruppe. Ein einfaches Beispiel ist Natriumdodecylsulfat (Abb. 1), ein synthetisches anionisches Tensid, welches als Detergens Verwendung in Reinigungsmitteln findet. Das hydrophobe Ende ist der Kohlenwasserstoffrest (rot markiert) und das hydrophile Ende die Sulfatgruppe (blau markiert).

Links: Schematische Darstellung eines Gashydrathügels am Meeresboden mit der umgebenden Biosphäre (Grafik: G. Schwalbe, GFZ)

Left: Sketch of gas hydrate mound at the seafloor with associated biosphere



Kontakt: J. M. Schicks  
(schick@gfz-potsdam.de)

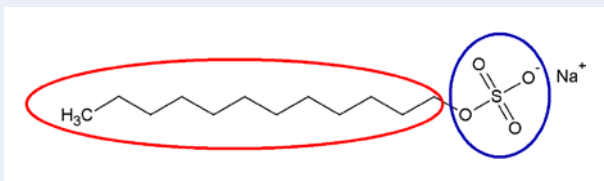


Abb. 1: Natriumdodecylsulfat (rot: hydrophobes Ende; blau: hydrophiles Ende)

Fig. 1: Sodium dodecylsulfate (red hydrophobic end, blue: hydrophilic end)

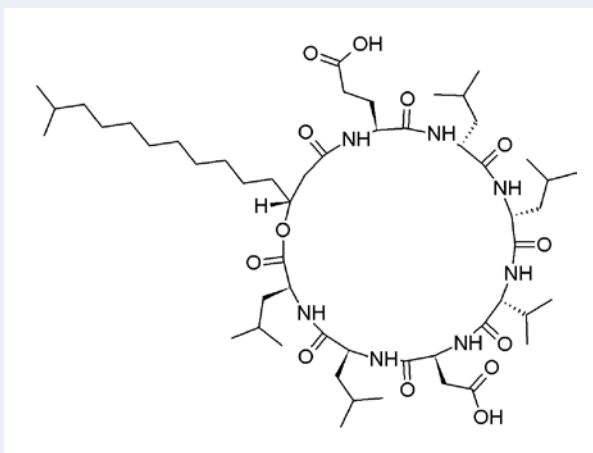


Abb. 2: Surfactin

Fig. 2: Surfactin

Für die Gashydratbildung sind Tenside interessant, da ihnen eine Funktion als Keimbildungszentrum zugeschrieben wird. Bereits 1993 führten Kalogerakis et al. Versuche mit synthetischen Tensiden wie Natriumdodecylsulfat durch, die zeigten, dass die Geschwindigkeit des Gashydratwachstums durch den Zusatz von Tensiden um mehrere Größenordnungen erhöht werden kann (Kalogerakis et al., 1993).

In gashydratführenden Sedimenten wurden Bakterien nachgewiesen, die als Folge von Stoffwechselprozessen Biotenside ausscheiden. So enthielten beispielsweise Sedimentkerne aus der Nähe eines Hydrathügels im Golf von Mexiko die Bakterien *Bacillus subtilis* und *Pseudomonas aeruginosa* (Lanoil et al., 2001). Das Bakterium *Bacillus subtilis* produziert ein Tensid namens Surfactin (Abb. 2). Surfactin ist das stärkste bekannte Biotensid und wird als Antibiotikum verwendet (Rogers et al., 2007). Dabei stellt sich die Frage, ob mit Gashydraten assoziierte Mikroorganismen durch von ihnen produzierte Biotenside in der Lage sind, das Hydratwachstum in ähnlicher Weise zu beeinflussen wie synthetische Tenside.

Rogers et al. (2003) haben in einer Studie untersucht, wie sich Surfactin auf das Wachstum eines Gashydrats mit einer Zusammensetzung, wie es typischerweise im Golf von Mexiko vorkommt, auswirkt (Rogers et al., 2003). Dazu wurde eine Sand/Bentonit-Probe mit surfactinhaltigem Wasser gesättigt und mit einer Gasmischung aus 90% Methan, 6% Ethan und 4% Propan beaufschlagt. Es stellte sich heraus, dass die Induktionszeit im Vergleich zu einer Probe ohne Biotensid um 71% gesenkt werden konnte. Die Hydratwachstumsrate wurde um 288% gesteigert (Rogers et al., 2003). Das bedeutet, dass Biotenside ebenso wie synthetische Tenside in der Lage sind, das Gashydratwachstum zu fördern. In einer natürlichen Umgebung werden die Zusammenhänge jedoch komplexer, da das Hydrat von Sedimenten unterschiedlicher Zusammensetzung umgeben ist. Hier können insbesondere quellfähige Tonminerale in Verbindung mit adsorbierten Biotensiden die Wechselwirkung potentieller Gastmoleküle wie Methan und Wasser fördern und somit Keimbildungszentren für Gashydratkristalle ausbilden.

Auf Grundlage der Erkenntnisse zum Einfluss von Biotensiden auf das Hydratwachstum führten Kelleher et al. (2007) Untersuchungen zum Einfluss von sedimentärem organischem Material durch. Es zeigte sich, dass das in den Sedimentkernen enthaltene organische Material überwiegend mit Smektiten assoziiert ist. Smektite gehören zu den Tonmineralen und bestehen überwiegend aus Montmorillonit. Die gefundenen organischen Verbindungen konnten im Wesentlichen in proteinhaltiges und lipidartiges Material sowie Kohlehydrate und aliphatische Verbindungen eingeteilt werden, wobei sich ihre Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe unterschied. Sie synthetisierten außerdem mit einer aus 90% Methan, 6% Ethan und 4% Propan bestehenden Gasmischung Mischhydrate, wobei jedem Experiment ein Teil der Probe des Bohrkerns beigefügt wurde. Es stellte sich heraus, dass das Hydratwachstum (Senkung der Induktionszeit und Erhöhung der Wachstumsgeschwindigkeit) im Vergleich durch die Präsenz von proteinhaltigem Material gehindert, aber durch die Anwesenheit von lipidartigem Material in Verbindung mit eisenhaltigen Mineraloberflächen gefördert wird. Die Autoren gehen davon aus, dass das Hydratwachstum ebenso wie bei den Biotensiden generell durch die Anwesenheit von Tonmineralen und anhaftendes sedimentäres organisches Material gefördert werden kann. Die Tone können darüber hinaus möglicherweise Substrate immobilisieren, die von methanbildenden Mikroorganismen (methanogenen Archaeen) zur Produktion von Methan benötigt werden, und gleichzeitig Bedingungen für eine Wechselwirkung von Wasser und Methan schaffen. Dies wird auch als „clay-organo complex“ bezeichnet, der Methanproduktion und Hydratbildung ermöglicht (Kelleher et al., 2007).

Mikroorganismen können also durch die Bereitstellung von Methan eine Voraussetzung für die Bildung von Gashydraten schaffen oder durch die Bildung von Biotensiden die Hyd-

ratbildung unterstützen. Für andere, spezielle mikrobielle Gemeinschaften stellt Methan aus Gashydraten dagegen eine Kohlenstoff- und Energiequelle dar, wie der nachfolgende Abschnitt zeigt.

### Methan aus Gashydraten als Kohlenstoff- und Energiequelle für Mikroorganismen

In dem noch sauerstoffreichen Oberflächensediment des Meeresbodens oxidieren methanotrophe Bakterien Methan mit Hilfe des noch verfügbaren Sauerstoffs zu Kohlendioxid. In den tieferen, sauerstofffreien Sedimenten wird das Methan durch Mikroorganismen in einem Prozess, der sich anaerobe Methanoxidation (AOM) nennt, verstoffwechselt (Abb. 3). Diese Prozesse kontrollieren die Abgabe von Methan aus dem Sediment in die darüber liegende Wassersäule und letztendlich auch in die Atmosphäre. Das Methan steigt dabei aus tiefer liegenden Schichten auf und kann bei geeigneten Rahmenbe-

dingungen (ausreichend hoher Druck, niedrige Temperatur) in Gashydrate eingebaut werden. Das oberhalb der Gashydrate durch langsame Hydratzersetzung freiwerdende Methan bildet dann zusammen mit dem Porenwassersulfat die Substrate für die AOM. Der Prozess der anaeroben Methanoxidation wird durch ein Konsortium aus methanotrophen Archaeen und sulfatreduzierenden Bakterien durchgeführt (Boetius *et al.*, 2000). Während dieses Prozesses wird Porenwassersulfat zu Sulfid reduziert und Methan zu Hydrogencarbonat oxidiert. Das Hydrogencarbonat kann mit gelöstem Calcium als Calciumcarbonat ausfallen und Karbonatkrusten in den Oberflächensedimenten des Meeresbodens bilden (Abb. 4).

Methan ist im Vergleich zur normalen uns umgebenden Biomasse eine isotopisch sehr leichte Kohlenstoffquelle (abgereichert am  $^{13}\text{C}$ -Kohlenstoff). Da ein Teil des Methankohlenstoffs in die Biomasse der an der anaeroben Methanoxidation beteiligten Mikroorganismen eingebaut wird, sind deren Biomoleküle kohlenstoffisotopisch ebenfalls  $^{13}\text{C}$ -abgereichert

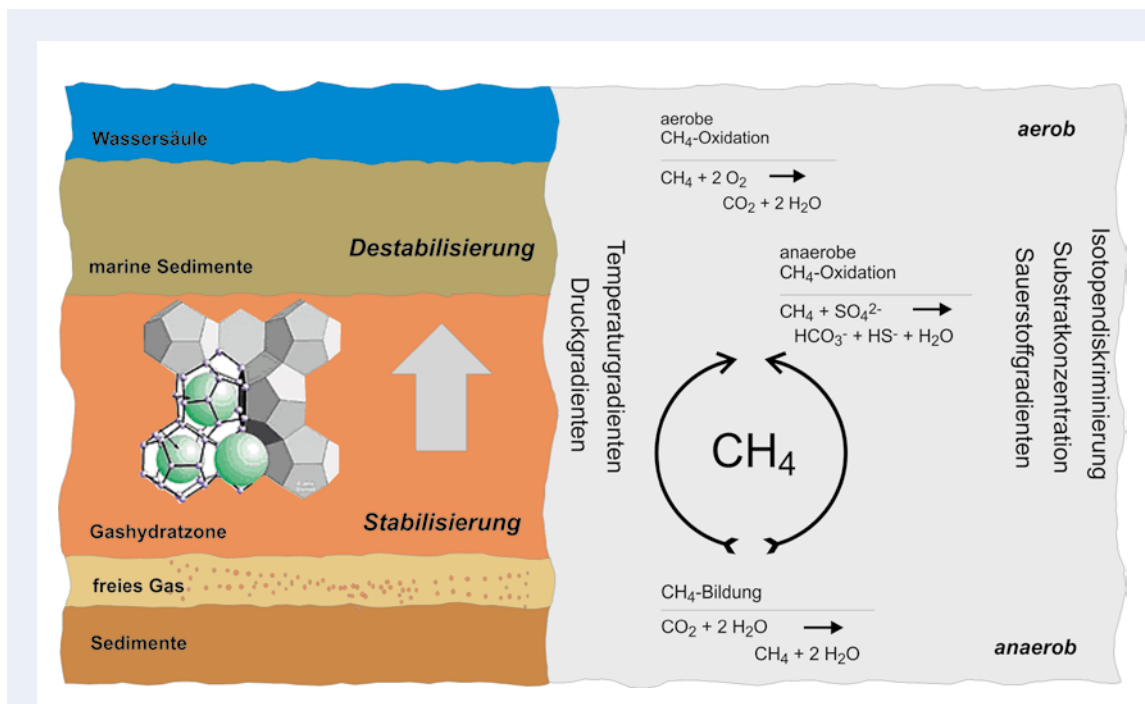


Abb. 3: Mikrobielle Prozesse und Regulationsmechanismen in Verbindung mit Gashydraten in marinen Sedimenten. Linke Seite: Abfolge mariner Sedimente mit der Zone, in der in Abhängigkeit von Temperatur und Druck stabile Gashydrate vorliegen. Rechte Seite: Unter anaeroben Bedingungen wird die organische Substanz in den Sedimenten zu Methan abgebaut. Ein Teil dieses Methans wird anaerob durch ein Konsortium von Methan bildenden und Sulphat abbauenden Mikroorganismen zu Hydrogencarbonat umgewandelt. In den oberen Sedimentschichten kann das Methan durch entsprechende Bakterien aerob zu Kohlendioxid oxidiert werden. (Graphik: D. Wagner, GFZ)

Fig. 3: Microbial processes and regulation mechanisms associated with gas hydrates in marine sediments. Left panel: Sequence of marine sediments with the zone in which gas hydrates are stable in dependence of the temperature and pressure conditions. Right panel: Under anaerobic conditions in the sediments, the organic matter is microbially decomposed into methane. A part of this methane is anaerobically converted into hydrogen carbonate by a consortium of methane producing and sulphatedegrading microorganisms. In the upper sediments the methane can be oxidized by specific aerobic bacteria to carbon dioxide.

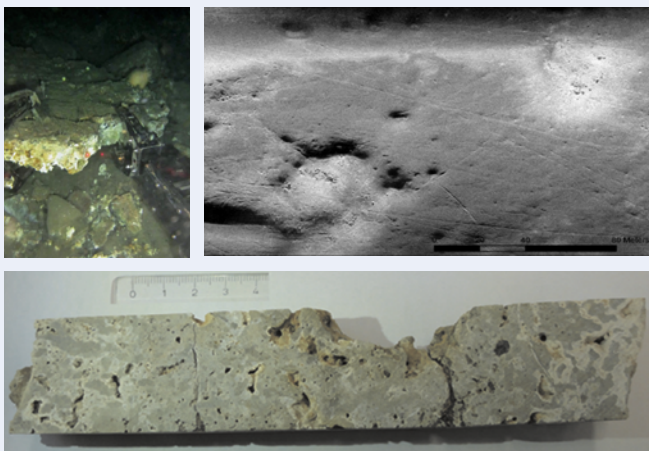


Abb. 4: Probenahme einer Karbonatkruste auf dem Meeresboden (oben links). Bild von Karbonatkrusten auf dem Meeresboden der Barentssee (oben rechts; High resolution interferometric synthetic aperture sonar (HIAS) image; beide Fotos: A. Lepland, NGU Norwegen im Auftrag von Lundin Petroleum Norway). Unten: Karbonatkruste im Labor (Foto: J. Nickel, GFZ)

Fig. 4: Sampling of a carbonate crust on the seafloor (top left). High resolution interferometric synthetic aperture sonar (HIAS) image from a carbonate crust area on the seafloor of the Barents Sea (top right) and carbonate crust in the laboratory (below)

und somit extrem leicht. Die Untersuchungen der mikrobiellen Biomarker lassen also Rückschlüsse auf die in den Sedimenten ablaufenden mikrobiellen Prozesse zu.

In einer Studie des GFZ in der Barentssee nördlich von Norwegen wurden in einem definierten Gebiet unterschiedliche Gasaustrittsstrukturen untersucht (Nickel *et al.*, 2013; Nickel *et al.*, 2012). Hierbei handelte es sich um Gebiete mit Karbonatkrusten an der Oberfläche und großen Feldern mit sogenannten Pockmark-Strukturen in hoher Dichte (etwa 100 pro km<sup>2</sup>). Pockmarks sind kraterähnliche Strukturen, die durch austretendes Gas oder Fluide gebildet werden, die aus tieferen Schichten aufsteigen.

Das mikrobielle Biomarkerinventar im Karbonatkrustenmaterial und in den Sedimentkernen aus dem Karbonatkrustengebiet wurde mit dem aus den Pockmarkkernen verglichen. Es zeigte sich, dass die Karbonatkruste und die Sedimente aus dem Karbonatkrustengebiet große Mengen an mikrobiellen Zellmembranbiomarkern für Archaeen enthalten. Auch andere Biomarker, die sulfatreduzierende Bakterien anzeigen, konnten nachgewiesen werden. Sowohl die Biomarker für die Archaeen als auch für die Sulfatreduzierer waren extrem an <sup>13</sup>C-Kohlenstoff angereichert. Archaeen konnten mit Zellzahlen von bis zu 10<sup>8</sup> Zellen pro Gramm Sediment nachgewiesen werden, während die Zahlen für die sulfatreduzierenden Bakterien mit bis zu 10<sup>7</sup> Zellen pro Gramm Sediment etwas darunter lagen. Ferner konnte mittels genetischer Fingerprintanalysen eine große Vielfalt an Organismen aus den beteiligten Gruppen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse legen also nahe, dass in den Sedimenten des Karbonatkrustengebiets aufsteigendes Methan mittels der anaeroben Methanoxidation verstoffwechselt wird und dass die Karbonatkrusten in dieser Gegend Ausfällungsprodukte dieses Prozesses sind. Seismische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Karbonatkrustengebiete oberhalb von Störungszonen liegen, die Wegbarkeiten für Methan aus der Tiefe an die

Oberflächen bieten. Im oberflächennahen Bereich bilden sich in der Seismik Gashydrate ab. In den Karbonatkrustengebieten kann also Methan aus tieferen Kohlenwasserstofflagerstätten an die Oberfläche aufsteigen, dort Gashydrate bilden und in den Oberflächensedimenten die anaerobe Methanoxidation stimulieren.

In den Pockmarksedimenten ließen sich die beschriebenen Biomarker nicht finden. Zudem haben mikrobiologische Untersuchungen gezeigt, dass die aktuelle mikrobielle Aktivität in diesem Gebiet sehr niedrig ist. Seismische Untersuchungen zeigten, dass sich die Pockmarks erst im Zuge des Rückgangs des norwegischen Eisschildes nach der letzten Eiszeit gebildet haben. Pockmarkstrukturen in Eisbergkratzspuren auf dem Meeresboden scheinen dies zu bestätigen. Die Bildung der Pockmarks mit dem Rückgang des Eisschildes legt nahe, dass sich die riesigen Pockmarkfelder aus darunterliegenden Gashydratschichten gebildet haben, die sich aufgrund der veränderten Druck- und Temperaturbedingungen mit dem Rückzug des Eisschildes vermutlich sehr schnell und massiv zersetzt haben. Krater mit einem Durchmesser von bis zu 150 m deuten darauf hin. Die ausgedehnten Gashydratschichten konnten sich während der Eiszeit aus aufsteigendem Methan bilden, das wegen des darüber liegenden glazialen Eispanzers nicht entweichen konnte (Nickel *et al.*, 2012). Mit dem Rückzug des Eisschildes setzte ein vermutlich recht schneller Zersetzungsprozess der Gashydrate ein, der zur Ausbildung der Pockmarkstrukturen führte. Nach dem Entweichen des Gases, das in einem solchen Szenario durchaus Klimarelevanz besitzt, beruhigte sich das System wieder und die nunmehr inaktiven Pockmarkstrukturen blieben auf dem Meeresboden zurück. Der schnelle und vermutlich zügig abgeschlossene Bildungsprozess der Pockmarks ist wahrscheinlich der Grund dafür, dass sich keine etablierte mikrobielle Gemeinschaft mit ihren Biomarkersignalen ausbilden konnte, wie sie heute im Karbonatkrustengebiet vorgefunden wird.

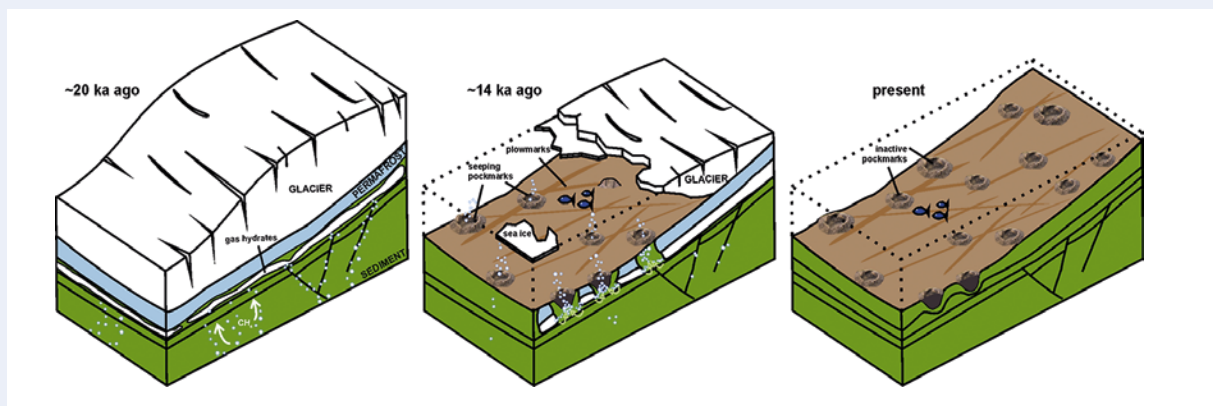


Abb. 5: Pockmarkbildungsmodell von links nach rechts: Zunächst bildeten sich weit ausgedehnte Gashydratschichten gespeist durch aufsteigendes Methan unterhalb des glazialen Eispanzers. Mit dem Rückzug des Eispanzers kommt es zur massiven Zersetzung der Gashydrate und zur Ausbildung der Pockmarkfelder. Heutzutage liegen inaktive Pockmarks vor, die keine molekularen Anzeichen für eine aktiv stattfindende Methanoxidation aufweisen (Reprinted from Nickel et al., 2012, page 159, figure 6 with permission from Elsevier).

Fig. 5: Pockmark formation model from left to right: Formation of widely disseminated gas hydrates under the Norwegian ice shield. Formation of pockmarks on the seafloor caused by dissociating gas hydrates due to the retreat of the ice shield. Nowadays inactive pockmarks with no molecular indication for an active microbial community conducting methane oxidation (Reprinted from Nickel et al., 2012, page 159, figure 6 with permission from Elsevier).

## Fazit und Ausblick

Die Wechselwirkungen zwischen Gashydraten, Mikroorganismen und dem umgebenden Sediment sind sehr komplex. Zum einen können Bakterien das in Hydraten gebundene Methangas produzieren. Bakterielle Stoffwechselprodukte wie Biotenside können die Bildung und das Wachstum von Gashydraten zudem fördern. Andere Mikroorganismen nutzen das hydratgebundene Methan als Energiequelle und verstoffwechseln es. All diese Prozesse können einen Einfluss darauf haben, wieviel Methan in Form von Gashydraten gebunden wird und in welchem Maß es verstoffwechselt wird, wenn es aus den Hydraten freigesetzt wird. Inwiefern die mikrobiellen Stoffwechselprodukte die Hydratbildung nicht nur fördern, sondern die Hydratvorkommen auch stabilisieren, soll in weiteren Studien am GFZ erforscht werden.

## Literatur

- Boetius, A., Ravenschlag, K., Schubert, C. J., Rickert, D., Widdel, F., Gieseke, A., Amann, R., Jørgensen, B. B., Witte, U., Pfannkuche, O. (2000): A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. - *Nature*, 407, 6804, p. 623-626.
- Kalogerakis, N., Jamaluddin, A. K. M., Dholabhai, P. D., Bishnoi, P. R. (1993): Effect of Surfactants on Hydrate Formation Kinetics, SPE International Symposium on Oilfield Chemistry (New Orleans 1993).
- Kelleher, B. P., Simpson, A. J., Rogers, R. E., Dearman, J., Kingery, W. L. (2007): Effects of natural organic matter from sediments on the growth of marine gas hydrates. - *Marine Chemistry*, 103, 3-4, p. 237-249.
- Kvenvolden, K. A. (1995): A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate. - *Organic Geochemistry*, 23, 11-12, p. 997-1008.
- Lanoil, B. D., Sassen, R., La Duc, M.T., Sweet, S. T., Nealson, K. H. (2001): Bacteria and Archaea Physically Associated with Gulf of Mexico Gas Hydrates. - *Applied and Environmental Microbiology*, 67, 11, p. 5143-5153.
- Lu, H., Seo, Y.-t., Lee, J.-w., Moudrakovski, I., Ripmeester, J. A., Chapman, N. R., Coffin, R. B., Gardner, G., Pohlman, J. (2007): Complex gas hydrate from the Cascadia margin. - *Nature*, 445, 7125, p. 303-306.
- Nickel, J., di Primio, R., Kallmeyer, J., Hammer, Ø., Horsfield, B., Stoddart, D., Brunstad, H., Mangelsdorf, K. (2013): Tracing the origin of thermogenic hydrocarbon signals in pockmarks from the southwestern Barents Sea. - *Organic Geochemistry*, 63, p. 73-84.
- Nickel, J., di Primio, R., Mangelsdorf, K., Stoddart, D., Kallmeyer, J. (2012): Characterization of microbial activity in pockmark fields of the SW-Barents Sea. - *Marine Geology*, 332-334, p. 152-162.
- Rogers, R., Zhang, G., Dearman, J., Woods, C. (2007): Investigations into surfactant/gas hydrate relationship. - *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 56, 1-3, p. 82-88.
- Rogers, R. E., Kothapalli, C., Lee, M. S., Woolsey, J. R. (2003): Catalysis of Gas Hydrates by Biosurfactants in Seawater-Saturated Sand/Clay. - *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 81, 5, p. 973-980.

# Astrobiologie – dem Leben im Universum auf der Spur

Dirk Wagner<sup>1</sup>, Jean-Pierre de Vera<sup>2</sup>, Jasmin Joshi<sup>3</sup>, Thomas Leya<sup>4</sup>, Dirk Schulze-Makuch<sup>5,6</sup>

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

<sup>2</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin

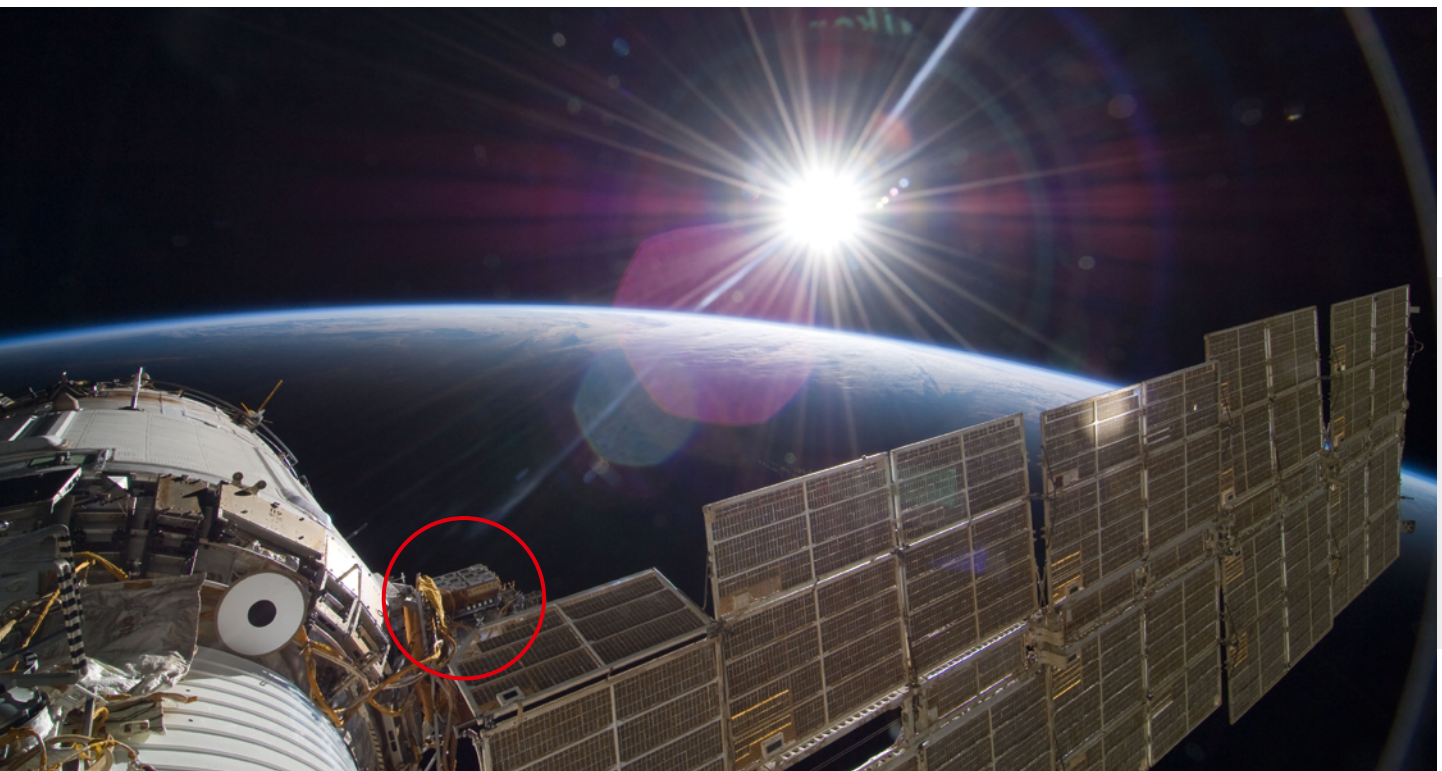
<sup>3</sup> Universität Potsdam

<sup>4</sup> Fraunhofer Institut für Zelltherapie und Immunologie (IZI-BB), Potsdam

<sup>5</sup> Technische Universität Berlin

<sup>6</sup> Washington State University, Pullman, USA

*This article provides first insights into some of the fascinating aspects of astrobiology. The central focus of this research theme is directed towards questions which have interested humans for millennia: How has life developed? Where do we come from? Are we alone in the Universe? In order to approach these questions, astrobiology brings together a variety of disciplines such as astronomy, astrophysics, biology, biochemistry, chemistry, geology, mineralogy, and cosmology. In particular, scientists are more and more interested into the biological aspects and the interactions of (micro)-organisms with their geological environment. This interest is further fueled by numerous NASA and ESA missions to Mars that have spawned new insights into Mars as a potential habitat for life. Earth analog environments, which are characterized by conditions that occur in other parts of our solar system in even more extreme forms play an important role for astrobiological research. Examples include habitats that are characterized by extreme dryness and/or coldness such as the Atacama Desert in Chile, liquid asphalt lakes in Trinidad or the permafrost areas in Siberia. Extremophilic microorganisms such as cyanobacteria and methanogenic archaea or higher organisms such as lichens and bryophytes are used as model organisms to study the limits of life under simulated extreme conditions. In recent years, an active research network has been established in the Berlin-Brandenburg region that carried out joint astrobiology and habitability studies and which among other projects is currently conducting an ESA experiment onboard the International Space Station ISS.*





In der ursprünglich als Exobiologie bezeichneten Forschung beschäftigten sich viele Forscherinnen und Forscher zunächst mit der Möglichkeit der Entstehung und Existenz von Leben außerhalb unserer Erde. Mit diesem engen Fokus provozierte die exobiologische Forschung das Vorurteil, es handle sich nicht um seriöse Wissenschaft, sondern um Science-Fiction, insbesondere da es bis heute keinen Nachweis von Leben jenseits der Erde gibt und somit im engeren Sinne der eigentliche Forschungsgegenstand fehlt. Im Gegensatz zur Exobiologie befasst sich die in den letzten Jahrzehnten entwickelte Astrobiologie als ein interdisziplinäres Forschungsthema mit fundamentalen Fragen zur Entwicklung des Lebens und den physikalischen und chemischen Bedingungen, die diesen Prozess beeinflussen. Die Astrobiologie schaut dabei nicht nur ins Universum, sondern versucht auch die Entwicklung des Lebens auf der Erde zu verstehen, um daraus Erkenntnisse für die mögliche Entwicklung des Lebens und der Suche nach möglichen Spuren außerhalb der Erde zu erlangen. Die Triebfeder dieser Forschung sind grundlegende Fragen, mit denen sich die Menschheit schon seit Jahrhunderten befasst: Wie hat sich das Leben entwickelt? Wo kommen wir Menschen her? Sind wir alleine im Universum? Um sich diesen Fragen anzunähern, bringt die Astrobiologie eine Vielzahl von Disziplinen wie Astronomie, Astrophysik, Biologie, Biochemie, Chemie, Geologie und Mineralogie zusammen. Entsprechend vielfältig sind die im Mittelpunkt stehenden Forschungsthemen:

- Ursprung des Lebens und die frühe Evolution auf der Erde
- Geo-Bio-Interaktionen auf der frühen Erde
- Überleben und Anpassung von extremophilen (Mikro-) Organismen an lebensfeindliche Umweltbedingungen auf der Erde und im Weltall
- Suche nach fossilem oder rezemtem Leben in unserem Sonnensystem
- Suche und Erforschung erdähnlicher extrasolarer Planeten
- Werkzeuge und Strategien für zukünftige Weltraummissionen zur Erkundung der Bewohnbarkeit von Planeten
- Zukunft des Lebens auf der Erde

*Links: Blick auf das Swesda-Modul (links im Bild) der Internationalen Weltraumstation (ISS) mit dem großen Sonnensegel auf der rechten Seite. Der rote Kreis zeigt die Installation der Expositionsplattform „EXPOSE“ für biologische Experimente an der Außenseite der Raumstation (Foto: NASA)*

*Left: View of the Zvezda module (left side) of the International Space Station (ISS) with the large solar panel on the right side. The red circle shows the installation of the exposure platform “EXPOSE” for biological experiments on the outside of the Space Station (photo: NASA)*

Insbesondere die biologischen Aspekte und die Interaktionen von (Mikro-)Organismen mit dem geologischen Umfeld sind in den letzten Jahren auf verstärktes Interesse der Wissenschaft gestoßen. Das Themenfeld der geologischen und biologischen Interaktionen stellt auch einen der neuen Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ dar. Dies findet seinen Ausdruck in der Etablierung einer Reihe von nationalen und internationalen Projektverbänden (u. a. DFG-Schwerpunktprogramm „Mars und die terrestrischen Planeten“, Helmholtz-Allianz „Planeten Evolution und Leben“, ESA-Projekt „BIOMEX – Biologie und Marsexperiment“). Für die astrobiologische Forschung spielen Habitate auf der Erde, die Bedingungen aufweisen, wie sie in noch extremerer Form auf anderen Planeten und Monden in unserem Sonnensystem auftreten, eine wichtige Rolle. Dazu gehören beispielsweise Habitate, die durch extreme Trockenheit und/oder Kälte gekennzeichnet sind und die sich daher als analoge Studienobjekte besonders eignen, wie beispielsweise die Atacama-Wüste in Chile, flüssige Asphaltseen in Trinidad oder der Permafrost in Sibirien, der Arktis und Antarktis. Aus diesen Habitaten wurden Mikroorganismen gewonnen, die aufgrund ihrer Anpassung an die extremen Bedingungen ihres Lebensraums als Modelle für Leben außerhalb der Erde untersucht werden.

## Erd-analoge Habitate für mögliche extraterrestrische Lebensräume

### Extrem-Mikrohabitate für Bakterien und Archaeen in einem flüssigen Asphaltsee

Der „Pitch Lake“ auf Trinidad, der von der Washington State University und der TU Berlin untersucht wird, ist einer von nur drei natürlich vorkommenden flüssigen Asphaltseen auf der Erde (Abb. 1). Die Wasseraktivität als ein Maß für das frei verfügbare Wasser im See liegt unter der Grenze, die Leben auf der Erde erlaubt. Trotzdem wurden dort Mikroorganismen gefunden. Basierend auf Phospholipid-Fettsäuren (PLFA) und genetischer Sequenzierung konnten über 600 bisher unbekannte Mikroorganismen identifiziert werden. Die Mikroben lagen in inselartigen Populationen vor, anscheinend adaptiert an verschiedene Nischen in der Asphaltmatrix. Im Pitch Lake leben nur Prokaryoten (einzellige Organismen ohne echten Zellkern), hauptsächlich Schwefel- und Stickstoffbakterien, während methanogene Archaeen wesentlich seltener sind (Schulze-Makuch et al., 2011). Die Mikroorganismen leben vorwiegend in ökologischen Nischen, die eine höhere Wasseraktivität aufweisen, und zwar in kleinen wasserhaltigen Tröpfchen. Eine chemische Analyse der Wasserzusammensetzung ergab eine Salzkonzentration vergleichbar mit Meerwasser. Isotopische Wasserstoff- und Sauerstoffanalysen wiesen nach, dass diese Tröpfchen aus dem tiefen Untergrund kommen. Die Vorstellung ist, dass Meerwasser unter hohem Druck



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

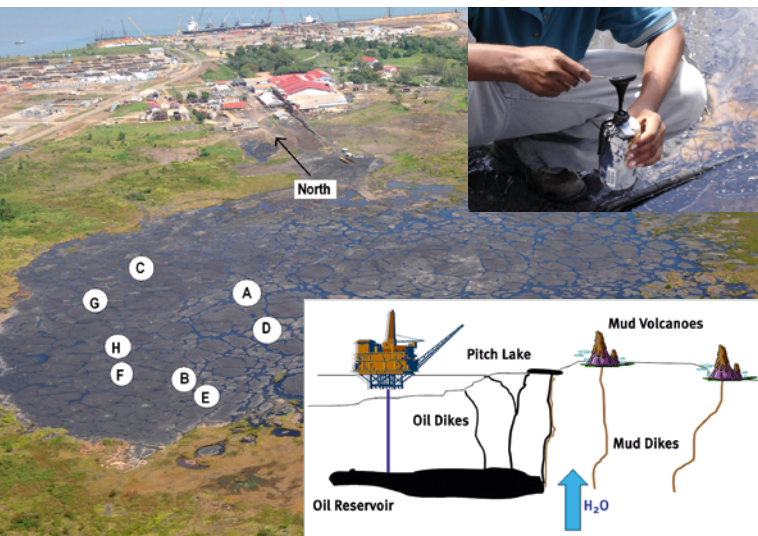


Abb. 1: Luftbild vom „Pitch Lake“ (Trinidad) mit den Beprobungspunkten. Oben rechts: Wegen der hohen Viskosität ist es schwierig mit dem flüssigen Asphalt zu arbeiten. Unten rechts: Hypothese, wie die Forschergruppe sich den Ursprung des Pitch Lake vorstellt und dessen Zusammenhang mit Schlammvulkanen (Fotos und Graphik: D. Schulze-Makuch, TU Berlin)

Fig. 1: Pitch Lake (Trinidad) as photographed from the air, including sampling points. Top right: The liquid asphalt is difficult to work with due to its high viscosity. Bottom right: Hypothesized origin of Pitch Lake with relation to nearby mud volcanoes

durch das Reservoir gepresst wird und dann eine Vermischung von Tiefenwasser und Reservoiröl stattfindet (Abb. 1B). Diese Tröpfchen stellen eigenständige kleine Ökosysteme dar, vielleicht sogar die kleinsten bekannten Ökosysteme der Erde (Meckenstock et al., 2014). Außerdem könnten diese Tröpfchen enorm wichtig für den Abbau von Kohlenwasserstoffen sein, da sie die Angriffsfläche von Kohlenwasserstoffen sehr stark vergrößern und daher zu einem viel schnelleren Abbau führen. Vom Standpunkt der planetarischen Habitabilität sind diese Umweltbedingungen eine weitere Option, unter denen Leben existieren kann – Umweltbedingungen wie sie sehr ähnlich beispielsweise auf dem Saturnmond Titan existieren könnten.

### Erforschung des Trockenlimits des Lebens in der Atacama-Wüste

Im Innern der Atacama-Wüste in Chile beträgt die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit weniger als 40% mit einem durchschnittlichen Niederschlag unter 2mm pro Jahr. Die Trockenheit auf dem Mars ist jedoch noch 2- bis 50-mal höher. Dennoch ist die Atacama-Wüste wegen ihrer Trockenheit eines der besten Mars-analogen Habitate auf der Erde (Abb. 2). Besonders geeignet ist die Atacama für die Erforschung der ökologischen Übergänge zu immer trockener werdenden Umweltbedingungen. Auch gibt es spezielle Trockenhabitate in der Atacama wie zum Beispiel Hypolithe, das sind Mikroben, die an der Unterseite von Quarzgesteinen wachsen und Mikro-

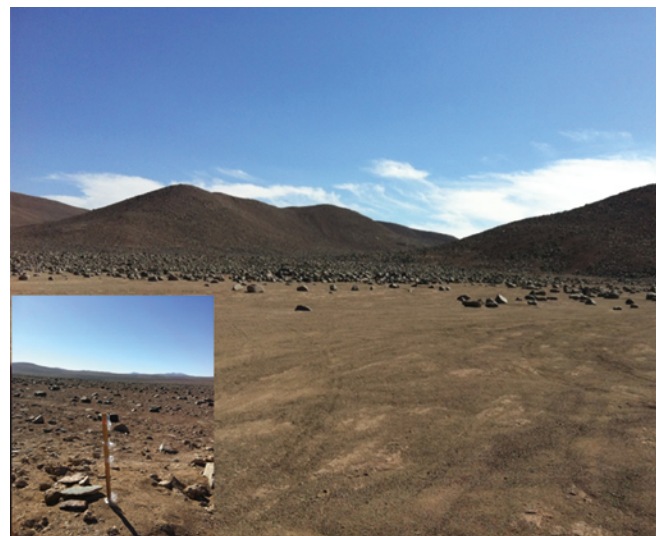


Abb. 2: Maria-Elena-Beprobungspunkt in Mars-analoger Landschaft. Unten links: Beprobungspunkt Yungay mit beschichteten Plastikfolien an einem Stab, um organische Stoffe aus der Atmosphäre für spätere Analysen zu sammeln. (Fotos: D. Schulze-Makuch, TU Berlin)

Fig. 2: Maria-Elena field site with Mars-analog landscape. Bottom left: Yungay sampling site with coated plastic foils on a stick to trap organic compounds from the atmosphere for later analysis

habitate ausnutzen, sowie halophile Mikroorganismen, die in Salzkristallen leben und durch hygroskopische Salze Wasser direkt aus der Atmosphäre aufnehmen können. Diese Anpassungsstrategien und speziellen Habitate sind sehr relevant für die Suche nach Leben auf dem Mars – falls es dort existiert. Momentan läuft ein großes Forschungsprojekt (ERC Advanced Grant HOME) unter Leitung von Prof. Dirk Schulze-Makuch mit Beteiligung des GFZ (Sektion Geomikrobiologie) und weiterer nationaler und internationaler Forschergruppen, um das Trockenlimit des Lebens in der Atacama zu bestimmen. Eine Zielsetzung ist es herauszufinden, ob die gefundene DNA in der hyperariden Zone tatsächlich biologische Spuren von stoffwechselaktiven mikrobiellen Gemeinschaften aufzeigt oder ob diese lediglich die gut konservierten Überreste abgestorbener Zellen darstellen.

### Mikrobielles Leben im terrestrischen Permafrost

Permafrost auf der Erde, der überwiegend in polaren und sub-polaren Regionen vorkommt, gilt aus astrobiologischer Sicht als ein Analogon für extraterrestrischen Permafrost, weil dieser ein weitverbreitetes Phänomen in unserem Sonnensystem, wie beispielsweise auf dem Mars, darstellt (Abb. 3). Terrestrischer Permafrost ist durch extreme Klima- und Geländebedingungen gekennzeichnet. Insbesondere das saisonale Gefrieren und Tauen in der aktiven Auftauzone (active layer) führt zu ausgeprägten Gradienten in der Temperatur und Geo-

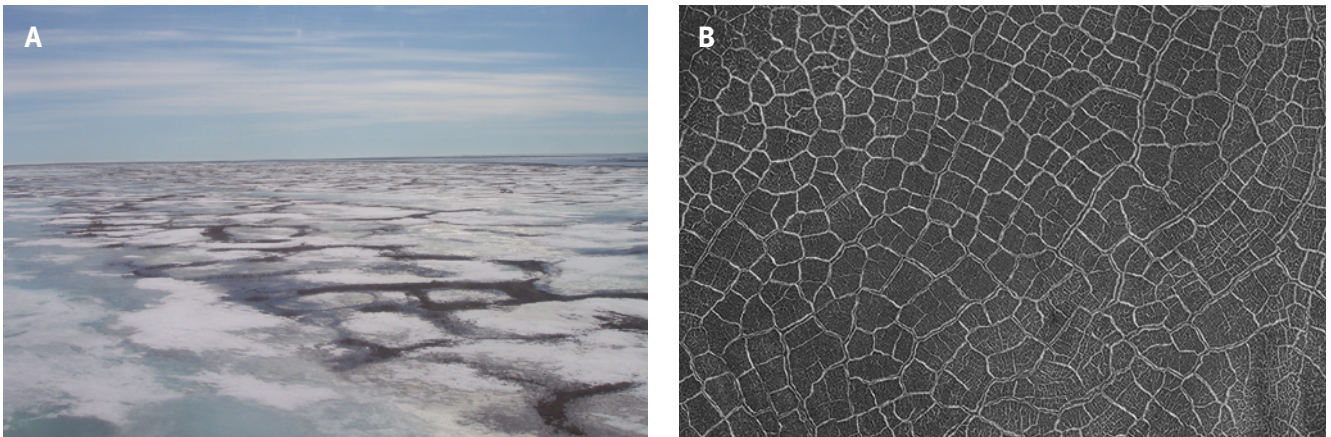


Abb. 3: Polygonale Permafroststrukturen. (A) Gefrorene Permafrostlandschaft im sibirischen Lena Delta (Foto: D. Wagner, GFZ); (B) Permafrost in der nördlichen Hemisphäre des Mars (Foto: NASA)

Fig. 3: Polygonal patterned ground. (A) Frozen permafrost landscape in the Siberian Lena Delta; (B) Permafrost in the northern hemisphere of Mars

chemie in den Permafrostböden. Dies führt wiederum zu drastischen Veränderungen weiterer, für mikrobielles Leben wichtiger Ökosystemparameter, wie beispielsweise der Salinität, des Bodendrucks, der Sauerstoffkonzentration und der Nährstoffverfügbarkeit. Mikroorganismen im terrestrischen Permafrost müssen also an eine Kombination von verschiedenen extrem schwankenden Umweltparametern angepasst sein. Trotz dieser Extrembedingungen finden wir eine hohe Diversität von Mikroorganismen, bestehend aus Vertretern aller drei Domänen des Lebens (Bakterien, Archaeen, Eukaryoten) mit einer Biomasse, die mit Mikroorganismenpopulationen in Bodenökosystemen gemäßigter Klimate vergleichbar ist (Wagner, 2008). Lebensfähige und stoffwechselaktive Mikroorganismen wurden auch in tiefen, gefrorenen und bis zu 3 Mio. Jahre alten Permafrostablagerungen in Sibirien nachgewiesen (Rivkina et al., 1998). Diese Organismen leben unabhängig vom Sonnenlicht und generieren die für den Stoffwechsel benötigte Energie aus der Oxidation von Schwefelwasserstoff, Methan oder reduzierten Stickstoffverbindungen. Sollte sich Leben auf dem frühen Mars ähnlich wie auf der frühen Erde entwickelt haben, erscheint es nicht unmöglich zu sein, dass dieses Leben in Nischen in tiefen Marsedimenten bis heute überdauert hat. Das GFZ leistet hier mit seiner Expertise im Bereich der Tiefen-Biosphären-Forschung einen wichtigen Beitrag für das Verständnis von Leben in extremen Habitaten auf der Erde und entsprechenden Habitaten außerhalb der Erde. Seit die ESA-Mission *Mars Express* 2003 erstmalig Methan in der Mars-Atmosphäre nachweisen konnte, konzentrieren sich neuere Studien auf methanbildende Mikroorganismen – sogenannte methanogene Archaeen („Urbakterien“) – aus terrestrischen Permafrosthabitaten als mögliche Kandidaten für Leben auf dem Mars.

### Methanogene Archaeen als Modelle für Leben auf dem Mars

Die für die Methanbildung auf der Erde verantwortlichen Mikroorganismen werden phylogenetisch als Archaeen klassifiziert. Archaeen unterscheiden sich von Bakterien in einigen spezifischen Charakteristika, wie beispielsweise der Zellwandzusammensetzung und den Coenzymen. Bei den methanogenen Archaeen handelt es sich um streng anaerobe Mikroorganismen, die nicht in der Lage sind, Sporen oder andere Dauerstadien zu bilden. Aufgrund ihrer spezifischen Anpassung an die Bedingungen der frühen Erde (u. a. kein Sauerstoff, keine oder nur wenige organische Substrate) und ihres phylogenetischen Ursprungs, werden sie als eine der initialen Organismengruppen für das Leben auf der Erde angesehen. Sie sind weitverbreitet in der Natur und werden in hohen Abundanzen in extremen Habitaten gefunden. Methanogene Archaeen sind zu lithoautotrophen Wachstum befähigt, wobei die benötigte Energie aus der Oxidation von Wasserstoff stammt und Kohlendioxid als einzige Kohlenstoffquelle genutzt werden kann. Organische Substanzen werden also bei dieser Art des Stoffwechsels nicht als Kohlenstoffquelle benötigt.

Kürzlich aus sibirischen Permafrostböden isolierte methanogene Archaeen wie beispielsweise *Methanosarcina soligelidi* SMA-21 (Abb. 4A und 4B; Wagner et al., 2013) haben sich als erstaunlich widerstandsfähig gegenüber Austrocknung, osmotischem Stress, extrem niedrige Temperatur, Strahlung und Hunger (Nährstoffmangel) gezeigt (Morozova und Wagner, 2007). Darüber hinaus zeigte ein erstes Marssimulationsexperiment, dass methanogene Archaeen aus dem sibirischen Permafrost eine dreiwöchige Exponierung unter den simulierten thermophysikalischen Marsbedingungen schadlos überstan-

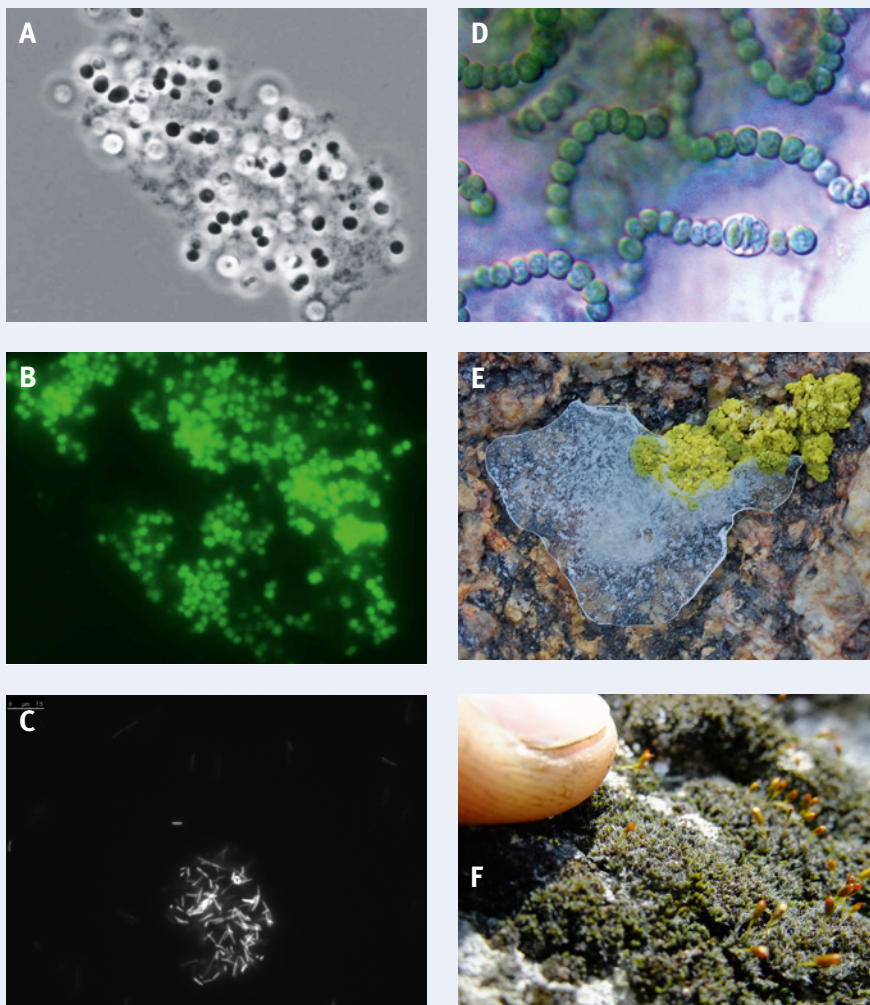


Abb. 4: Extremophile (Mikro-)Organismen, die aufgrund ihrer Toleranz gegenüber extremen Stressbedingungen für astrobiologische Experimente/Weltraumexperimente eingesetzt werden: (A) und (B) *Methanosarcina soligelidi* SMA-21, methanogenes Archaeum aus einem sibirischen Permafrostboden; (C) *Methanobacterium movilense* MC-20, Referenzorganismus aus einem Permafrost unbeeinflusstem Habitat; (D) *Nostoc spec.*, ein Cyanobakterien-Isolat aus einem Mars-analogen Gebiet in Spitzbergen; (E) *Pleopsidium chlorophanum*, eine Mars-resistente Flechte aus der Antarktis (North Victoria Land); (F) *Grimmia sessitana*, ein Moos aus dem alpinen Permafrost der Walliser Alpen (Fotos: A-C: O. Burckhardt, GFZ; D,E: J. P. de Vera, DLR; F: J. Joshi, Universität Potsdam)

Fig. 4: Extremophilic (micro-)organisms that were used for astrobiological experiments/space experiments because of their tolerance against extreme stress conditions: (A) and (B) *Methanosarcina soligelidi* SMA-21, methanogenic archaea from a Siberian permafrost soil; (C) *Methanobacterium movilense* MC-20, reference organism from a non-permafrost environment; (D) *Nostoc spec.*, isolates of cyanobacteria from a Mars-analog area in Svalbard; (E) *Pleopsidium chlorophanum*, a Mars-resistant lichen from Antarctica (North Victoria Land); (F) *Grimmia sessitana*, a moss from alpine permafrost in the Wallis-Alps

den haben, während Vergleichsorganismen aus Permafrost unbeeinflussten Habitaten wie beispielsweise *Methanobacterium movilense* MC-20 (Abb. 4C) nach dem Experiment zu fast 100 % geschädigt waren (Morozova et al., 2007). Diese Studien deuten darauf hin, dass methanogene Archaeen aus Permafrost generell besser an extreme Bedingungen angepasst sind als vergleichbare Mikroorganismen aus gemäßigten Habitaten. Diese Vermutung wird auch durch aktuelle Studien des GFZ in einer Kooperation mit dem DLR gestützt, die mittels Raman-Spektroskopie zeigen konnte, dass unabhängig von der phylogenetischen Verwandtschaft, die chemische Zusammensetzung der methanogenen Archaeen aus dem sibirischen Permafrost einem Cluster zuzuordnen ist, während die Vergleichsorganismen aus von Permafrost unbeeinflussten Habitaten einem anderen Cluster zuzuordnen waren (Serrano et al., 2014). Dieser Befund spiegelt die biochemischen Verän-

derungen in den Permafroststämmen wider, die offensichtlich im Zuge der Anpassung stattgefunden haben.

Weitere GFZ-Untersuchen zeigen den positiven Einfluss sogenannter Mars-analoger Mineralien (MAMs, bereitgestellt von Jörg Fritz, Museum für Naturkunde, Berlin) auf die Stoffwechselaktivität und das Wachstum von methanogenen Archaeen unter simulierten Marsbedingungen (Schirmack et al., 2015). Bei den verwendeten Mineralmischungen handelt es sich um eine palagonitische Tephra (Abb. 5C; JSC Mars-1A) sowie um phyllosilikatische (Abb. 5A; hauptsächlich Montmorillonit und Chamosit) und sulphatische (Abb. 5B; hauptsächlich Gabbro und Kalziumsulfat) Mineralmischungen. Es konnte gezeigt werden, dass Methanbildung in Modellböden aus MAMs (Abb. 5D) nur mit Wasserstoff und Kohlendioxid ohne den Zusatz weiterer lebensnotwendiger Elemente möglich ist. Ein Lang-

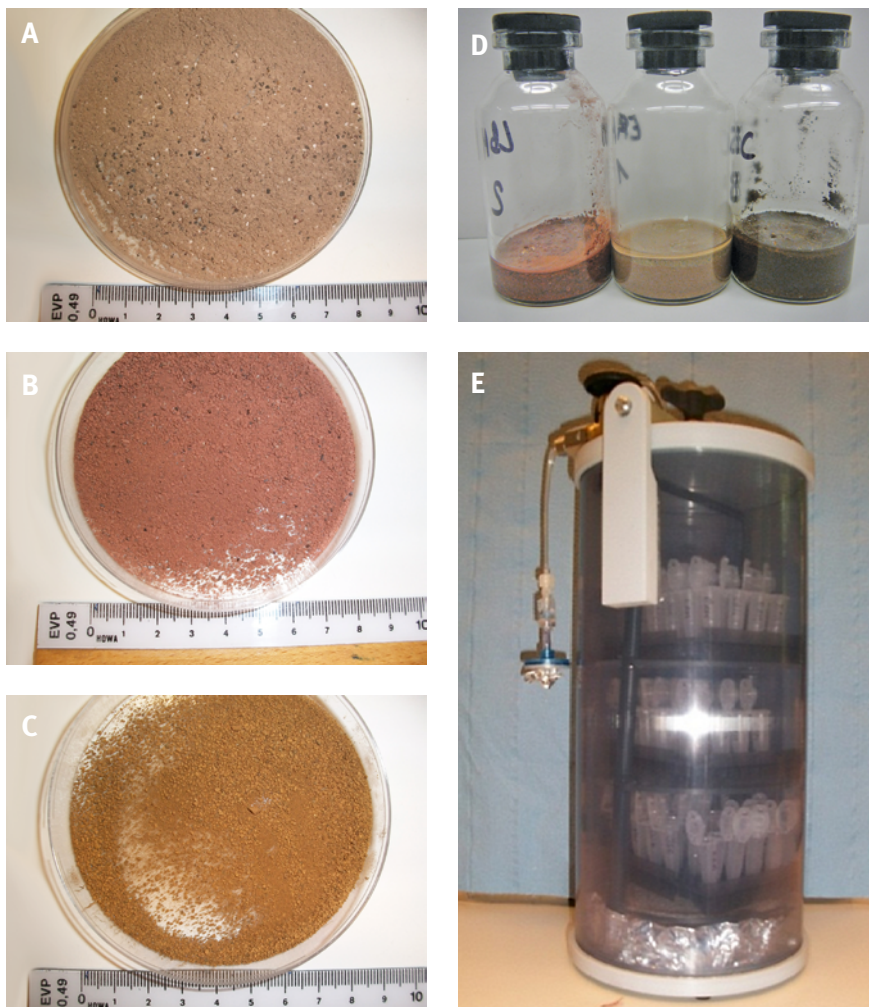


Abb. 5: Experimente mit Mars-analogen Mineralen (MAMs): (A) phyllosilikatische Mineralmischung (P-MAM); (B) sulphatische Mineralmischung (S-MAM); (C) palagonitische Tephra (Johnson Space Center, JSC Mars-1A); (D) wassergesättigte Modellböden aus S-MAM, P-MAM und JSC Mars-1A (von links nach rechts); (E) Inkubationskammer für die anaerobe Austrocknung der entsprechenden Mikroorganismen auf MAMs (Fotos: J. Schirmack, TU Berlin)

Fig. 5: Experiments with Mars analog minerals (MAMs): (A) phyllosilicatic mineral mixture (P-MAM); (B) sulphatic mineral mixture (S-MAM); (C) palagonitic tephra (Johnson Space Center, JSC Mars-1A); (D) water saturated model soils of S-MAM, P-MAM and JSC Mars-1A (from left to right); (E) incubation chamber for anaerobic desiccation of the microorganisms on MAMs

zeit-Austrocknungsexperiment mit methanogenen Archaeen auf MAMs (Abb. 5E) zeigte weiterhin eine bemerkenswerte Austrocknungsresistenz der getesteten Stämme über einen Zeitraum von 400 Tagen. Die besten Ergebnisse wurden bei diesen Experimenten im Zusammenspiel der Mikroorganismen mit der phyllosilikatischen Mineralmischung erhalten. Das Überleben der langfristigen Austrocknung und die Fähigkeit, aktiven Stoffwechsel in Mars-analogen Mineralböden zu betreiben, erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass methanogene Archaeen oder physiologisch ähnliche Organismen in ökologischen Nischen auf dem Mars existieren könnten.

### Cyanobakterien, Flechten und Moose als Modelle für Tests der Habitabilität des Mars

Cyanobakterien gelten als potenzielle Lebensformen, die neben den Archaeen ebenfalls auf dem Mars früh in dessen Entwicklungsgeschichte entstanden sein könnten. Prokaryonten, wie Archaeen und Bakterien, sind vermutlich erstmals auf der Erde vor 3,8 bis 3,5 Mrd. Jahren entstanden. Die frühesten irdischen Mikrofossilien, die coccoiden und filamentösen

Cyanobakterien ähneln und die in Apex-Chert-Gesteinen der Warrawoona-Gruppe in Australien gefunden wurden (Schopf *et al.*, 1993), wurden auf eine Zeit von vor 3,5 Mrd. Jahren datiert. Obwohl es lange eine große Debatte über die wahre Natur der Mikrofossilien gab, bestätigen aktuellere Ergebnisse (Wacey *et al.*, 2011) diese These. Aus diesem Grund wurden Cyanobakterien genau wie Archaeen als sehr gute Modellorganismen für die Suche nach Leben auf dem Mars angesehen. Mit Hilfe der Raman-Spektroskopie, einer Methode, die auf der nächsten ESA Mars-Landemission namens ExoMars angewandt wird, versucht das DLR beispielsweise mit Hilfe eines kälteangepassten Isolats der Gattung *Nostoc* (Abb. 4D) charakteristische Biosignaturen, die als Fingerabdrücke für die Suche nach Leben auf dem Mars fungieren können, zu erkennen und zu katalogisieren (Böttger *et al.*, 2012). Die dabei gewonnenen Daten werden, wie die Daten der Archaeen, in eine Biosignaturen-Datenbank eingespeist. Diese Datenbank verfügt dann auch über Metadaten wie Mineralhintergrund, atmosphärische Zusammensetzung, temperatur-, druck-, feuchte- und strahlungsabhängige Veränderungen, die bei den Messungen auf dem Mars eine Rolle spielen könnten. Dies geschieht durch Messungen während entsprechender Marssimulationen

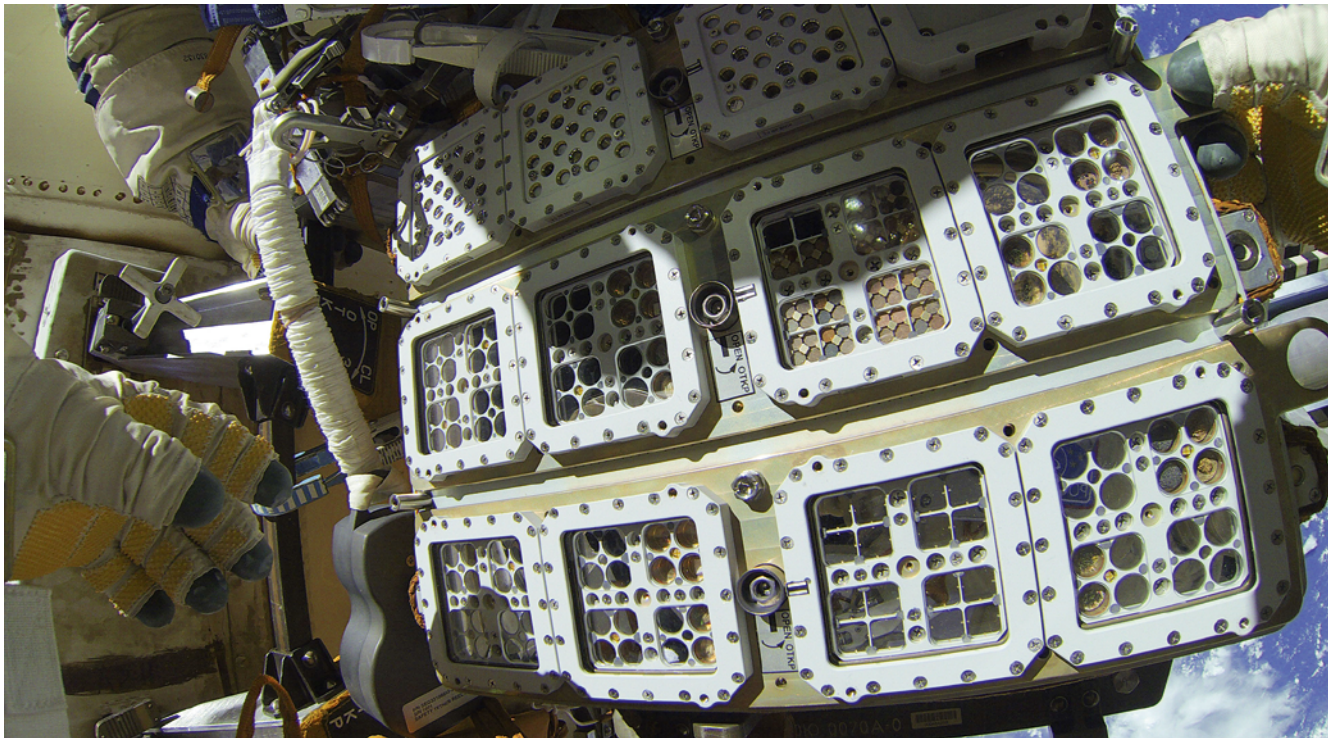


Abb. 6: Die Expositionsplattform „EXPOSE-R2“ mit dem Biologie- und Mars-Experiment (BIOMEX) wird von Astronauten außen an das russische Swesda-Modul der Internationalen Weltraumstation (ISS) montiert (Foto: ESA; für weitere Informationen siehe auch Alexander Gerst's Mission Blue Dot, siehe: [http://www.dlr.de/rb/Portaldata/38/Resources/dokumente/broschueren-pdf/DLR-Blue-Dot-de\\_en\\_2014-05.pdf](http://www.dlr.de/rb/Portaldata/38/Resources/dokumente/broschueren-pdf/DLR-Blue-Dot-de_en_2014-05.pdf)).

Fig. 6: The exposure platform 'Expose-R2' with the Biology and Mars Experiment (BIOMEX) is fixed onto the Russian Zvezda module of the International Space Station (ISS; Photo: ESA; for more information see Alexander Gerst's Mission Blue Dot: [http://www.dlr.de/rb/Portaldata/38/Resources/dokumente/broschueren-pdf/DLR-Blue-Dot-de\\_en\\_2014-05.pdf](http://www.dlr.de/rb/Portaldata/38/Resources/dokumente/broschueren-pdf/DLR-Blue-Dot-de_en_2014-05.pdf)).

in speziell dafür gebauten Marskammern (Lorek und Koncz, 2013). Darüber hinaus dienen die Cyanobakterien, die das DLR in Zusammenarbeit mit seinen Partnern von der Universität Potsdam und dem Fraunhofer Institut für Zelltherapie und Immunologie untersucht, als Testorganismen für Vitalitätstests unter Marsbedingungen. Fraglich ist z. B., ob der Mars neben seinen vermuteten lebensfreundlichen Umweltbedingungen in der frühen Phase seiner Entwicklungsgeschichte eventuell auch heute noch für irdische Organismen habitabel wäre. Neben Cyanobakterien werden dazu auch komplexere und evolutiv jüngere Organismen wie Flechten und Moose (Abb. 4E und 4F) getestet. Da sich insbesondere Flechten aus Mars-analogen Permafrostgebieten der Alpen sowie der Arktis und Antarktis bereits mehrmals als Vertreter der Eukaryonten als äußerst weltraumresistent erwiesen haben (Meeßen et al., 2013), soll auch untersucht werden, bei welchen weiteren Organismengruppen die Grenze der Lebensfähigkeit unter Marsbedingungen erreicht wird. Moose als älteste Gruppe der Landpflanzen (erste moosähnliche Mikrofossilien aus dem Ordovizium sind rund 470 Mio. Jahre alt) stellen dabei die nächsthöher organisierten Vertreter der Pflanzen dar. Moose sind größtenteils haploid, verfügen also im Gegensatz zu höheren Pflanzen nur

über einen einfachen Chromosomensatz. Da sie unbeschadet lange Trockenphasen überstehen, den Stress großer Temperaturschwankungen aushalten und extreme Umweltbedingungen in Ruhestadien überdauern können, lässt sich erwarten, dass einzelne Moosarten auch extreme extraterrestrische Umweltbedingungen tolerieren können. So wurden schon Moose beobachtet, die nach 400-jährigem Einfrieren in polarem Eis wieder weiterwachsen konnten (La Farge et al., 2013). In mehreren Versuchen mit Flechten, die in Mars-analogen Mineralien eingebettet und simulierten Marsbedingungen ausgesetzt waren, wurde ihre photosynthetische Aktivität positiv getestet (de Vera et al., 2014). Derzeit finden Untersuchungen an Moosen statt, die bereits jetzt auf eine hohe Widerstandsfähigkeit hinweisen. Weitere Untersuchungen, unter anderem im All (z. B. ESA-Projekt BIOMEX auf der Internationalen Weltraumstation ISS; Abb. 6), werden ebenfalls klären, ob die Grenze der Überlebens- und der Lebensfähigkeit der ersten komplexeren Organismen erreicht ist oder ob weiter im Stammbaum des Lebens geforscht werden muss, wo die Grenze der Vitalität unter Mars- und Weltraumbedingungen liegt. Zudem liefern die Ergebnisse ebenfalls konkrete Hinweise darauf, für welche Organismen der heutige Mars für eine gewisse Zeit habitabel sein könnte.

## Ausblick

Die astrobiologische Forschung erwartet in naher Zukunft weitere Erkenntnisse zur Habitabilität von Planeten, insbesondere vom Mars, durch die gegenwärtig laufende NASA-Mission Curiosity sowie durch die für 2018 geplante ESA-Mission ExoMars. Während Curiosity an der Marsoberfläche nach Spuren von Leben sucht und erst kürzlich eine fettsäureähnliche organische Verbindung nachweisen konnte, soll ExoMars erstmals in den Marsboden bohren, um mineralogische und chemische Untersuchungen an den oberflächennahen Sedimenten durchzuführen, mit dem Ziel, organische Verbindungen als Hinweis auf mögliches Leben, zu finden. Eine wichtige Grundlage für die Suche nach Lebensspuren beispielsweise auf dem Mars ist die Kenntnis von sogenannten Biosignaturen, die auf vergangenes oder gegenwärtiges Leben hinweisen. Zu diesem Zweck werden zurzeit im Rahmen des BIOMEX-Projekts verschiedene Experimente mit dem Ziel durchgeführt, eine Biosignaturen-Datenbank aufzubauen. Hierzu gehören auch Simulationsexperimente unter „Mars-nahen“ Bedingungen, in denen beispielsweise der Einfluss von Mars-analogen Mineralen auf die Überlebensfähigkeit von extremophilen Mikroorganismen und deren mineralogisch-biotische Interaktionen untersucht wird. Weiterhin werden die Studien zu den molekularen Mechanismen, mit denen Organismen extreme Stressbedingungen wie Trockenheit, Kälte und Strahlung bewältigen, fortgeführt, um mögliche Adaptionsfähigkeiten von Lebensformen auf anderen Planeten und Monden besser verstehen zu können. Ein wichtiger Schwerpunkt der zukünftigen Forschung am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ wird sich mit den Interaktionen von geologischen und biologischen Prozessen, die nicht nur in der Astrobiologie sondern auch in zahlreichen anderen Themenfeldern eine herausragende Rolle spielen, beschäftigen. Dazu wird gegenwärtig das GeoBioLab am GFZ aufgebaut, das spezielle Labore beispielsweise für Langzeitexperimente oder Untersuchungen unter *In-situ*-Bedingungen für die angestrebte interdisziplinäre Forschung zur Verfügung stellt.

## Literatur

- Böttger, U., de Vera, J.-P., Fritz, J., Weber, I., Hübers, H.-W., Schulze-Makuch, D. (2012): Optimizing the detection of carotene in cyanobacteria in a Martian regolith analogue with a Raman spectrometer for the ExoMars mission. - *Planetary and Space Science*, 60, 1, p. 356-362.
- de Vera, J.-P., Schulze-Makuch, D., Khan, A., Lorek, A., Koncz, A., Möhlmann, D., Spohn, T. (2014): Adaptation of an Antarctic lichen to Martian niche conditions can occur within 34 days. - *Planetary and Space Science*, 98, p. 182-190.
- La Farge, C., Williams, K. H., England, J. H. (2013): Regeneration of Little Ice Age bryophytes emerging from a polar glacier with implications of totipotency in extreme environments. - *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 110, 24, p. 9839-9844.
- Lorek, A., Koncz, A. (2013): Simulation and measurement of extraterrestrial conditions for experiments on habitability with respect to Mars. - In: de Vera, J. P., Seckbach, J. (Eds.), *Habitability of other planets and satellites, (Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology; 28)*, Dordrecht [u.a.]: Springer, p. 147-162.
- Meckenstock, R. U., von Netzer, F., Stumpp, C., Lueders, T., Himmelberg, A. M., Hertkorn, N., Schmitt-Kopplin, P., Harir, M., Hosein, R., Haque, S., Schulze-Makuch, D. (2014): Water droplets in oil are microhabitats for microbial life. - *Science*, 345, 6197, p. 673-676.
- Meeßen, J., Sánchez, F. J., Sadowsky, A., de la Torre, R., Ott, S., de Vera, J.-P. (2013): Extremotolerance and Resistance of Lichens: Comparative Studies on Five Species Used in Astrobiological Research II. Secondary Lichen Compounds. - *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 43, 6, p. 501-526.
- Morozova, D., Wagner, D. (2007): Stress response of methanogenic archaea from Siberian permafrost compared to methanogens from non-permafrost habitats. - *FEMS Microbiology Ecology*, 61, 1, p. 16-25.
- Morozova, D., Möhlmann, D., Wagner, D. (2007): Survival of Methanogenic Archaea from Siberian Permafrost under Simulated Martian Thermal Conditions. - *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 37, 2, p. 189-200.
- Rivkina, E., Gilichinsky, D., Wagener, S., Tiedje, J., McGrath, J. (1998): Biogeochemical activity of anaerobic microorganisms from buried permafrost sediments. - *Geomicrobiology Journal*, 15, 3, p. 187-193.
- Schirmack, J., Alawi, M., Wagner, D. (2015): Influence of Martian regolith analogs on the activity and growth of methanogenic archaea, with special regard to long-term desiccation. - *Frontiers in Microbiology*, 6, p. 210.
- Schopf, J. W. (1993): Microfossils of the early archean apex chert: new evidence of the antiquity of life. - *Science*, 260, 5108, p. 640-646.
- Schulze-Makuch, D., Haque, S., Antonio, M. R. S., Ali, D., Hosein, R., Song, Y. C., Yang, J., Zaikova, E., Beckles, D. M., Guinan, E., Lehto, H. J., Hallam, S. J. (2011): Microbial life in a liquid asphalt desert. - *Astrobiology*, 11, 3, p. 241-258.
- Serrano, P., Wagner, D., Böttger, U., de Vera, J.-P., Lasch, P., Hermelink, A. (2014): Single-cell analysis of the methanogenic archaeon *Methanosarcina soligelidi* from Siberian permafrost by means of confocal Raman microspectroscopy for astrobiological research. - *Planetary and Space Science*, 98, p. 191-197.
- Wacey, D., Kilburn, M. R., Saunders, M., Cliff, J., Brasier, M. D. (2011): Microfossils of Sulphur-Metabolizing Cells in 3.4-Billion-Year-Old Rocks of Western Australia. - *Nature Geoscience*, 4, 10, p. 698-702.
- Wagner, D. (2008): Microbial communities and processes in Arctic permafrost environments. - In: Dion, P., Nautiyal, C. S. (Eds.), *Microbiology of Extreme Soils, (Soil Biology ; 13)*, Springer, p. 133-154.
- Wagner, D., Schirmack, J., Ganzert, L., Morozova, D., Mangelsdorf, K. (2013): *Methanosarcina soligelidi* sp. nov., a desiccation and freeze-thaw resistant methanogenic archaeon from a Siberian permafrost-affected soil. - *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 63, p. 2986-2991.

# Netzwerk



Bohranlage des Forschungsschiffs JOIDES Resolution  
(Foto: J. Kallmeyer, GFZ)

## Mikroben im Sediment: wenig Nährstoff, viel Sauerstoff

Etwa ein Viertel des gesamten Meeresbodens auf der Erde ist extrem nährstoffarm. Zugleich enthält, entgegen bisherigen Annahmen, die obere Schicht dieses Meeresbodens über seine gesamte Dicke bis hinunter in das Grundgestein Sauerstoff. Diese neuen Ergebnisse gewann eine internationale Forschergruppe bei der Untersuchung von Bohrkernen aus dem Gebiet des Südpazifischen Wirbels. Bisherige Annahmen gingen davon aus, dass der Meeresboden bis auf eine dünne Schicht an der Oberfläche sauerstofffrei ist, weil Mikroben in den Sedimentlagen den vorhandenen Sauerstoff verbrauchen. Das von den Kontinenten ins Meer geschwemmte Sediment ist reich an organischem Material, das diesen Mikroben Nährstoff bietet. Deren Stoffwechsel verbraucht den Sauerstoff im Laufe der Zeit. Unterhalb der dünnen, sauerstoffhaltigen Deckschicht, so die bisherige Annahme, können nur noch solche Mikroben überleben, die an sauerstofffreie Bedingungen angepasst sind.

Dem Wissenschaftlerteam, an dem auch das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ beteiligt war, gelang es nun bei einer Expedition mit dem Bohrschiff „JOIDES Resolution“, Bohrkern aus dem Südpazifischen Wirbel zu gewinnen, einem Gebiet zwischen Australien, Südamerika und der Antarktis. Nirgendwo sonst auf der Erde ist man weiter vom Land und seinen Einträgen von Nährstoffen entfernt, entsprechend nährstoffarm ist das Gebiet. Aufgrund der geringen Nährstoffkonzentration finden auch die Mikroben im Meeresboden nur wenig Nahrung. Folglich gibt es hier auch nur



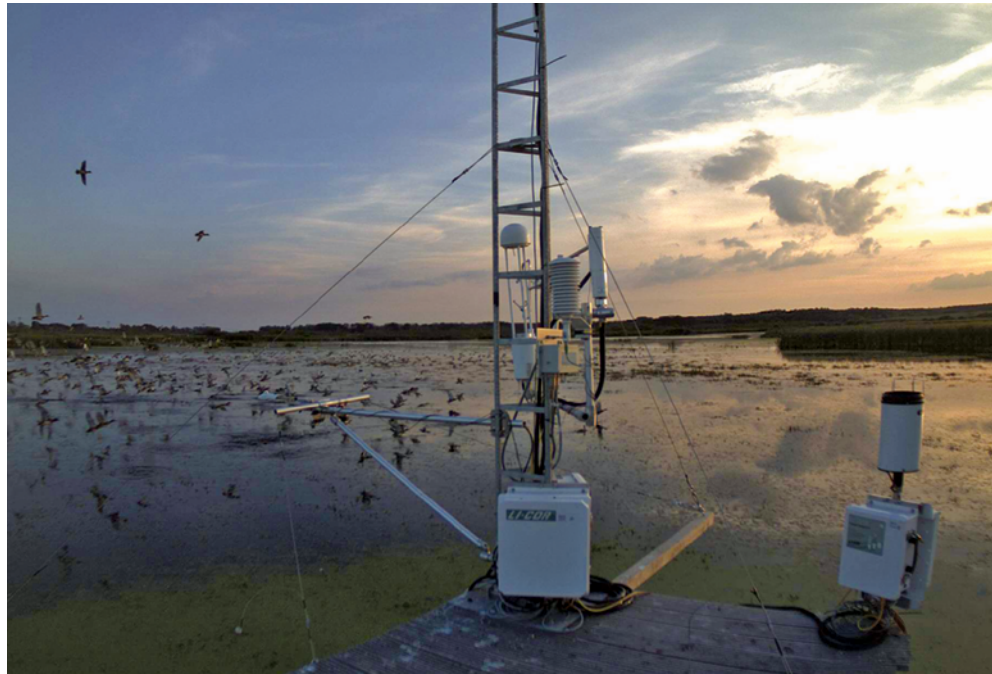
wenig Mikroben im Sediment: Die Populationsdichte an mikrobiellem Leben ist zehn- bis hundertmillionenfach geringer als im übrigen Ozean. Die wenigen überlebenden Mikroben finden so wenig Nährstoffe, dass sie den Sauerstoff nicht verbrauchen können, daher ist der Meeresboden nicht nur in der obersten Schicht, sondern über seine gesamte Dicke komplett sauerstoffhaltig und beherbergt auch nur solche Mikroben, die Sauerstoff zum Leben benötigen. Und nicht nur das abgelagerte Sediment enthält Sauerstoff, auch im darunter liegenden Basalt konnte er nachgewiesen werden.

Es stellte sich die Frage, ob das nur für das Gebiet des Südpazifischen Wirbels gilt. Zur Untersuchung dieser Frage wurden die Daten aus den Bohrkernanalysen mit Satellitendaten kombiniert. Es ergab sich, dass in fast einem Viertel der weltweiten Meeresgebiete die Nährstoffkonzentrationen ähnlich niedrig sind wie im Südpazifischen Wirbel. Daraus lässt sich folgern, dass auch dort Sauerstoff im Meeresboden zu finden sein muss. Das kann sogar Auswirkungen auf die Plattentektonik haben: Wenn eine Erdplatte mit solchem Material in die Erde abtaucht und wieder aufgeschmolzen wird, dann wird über diesen Prozess Sauerstoff dem Erdinneren zugeführt. Welche Folgen dieser Prozess für die geochemischen Prozesse im oberen Erdmantel hat, soll in zukünftigen Studien erforscht werden. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:**  
D'Hondt, S. et al. (2015): „Presence of Oxygen an Aerobic Communities from Seafloor to Basement in Deep-Sea Sediments“, - Nature Geoscience, 8, 299-304.

**Ko-Autor:**

Dr. Jens Kallmeyer  
(jens.kallmeyer@gfz-potsdam.de)



## Treibhausgase im Ungleichgewicht

### Wie menschliche Eingriffe Feuchtgebiete verändern

Feuchtgebiete setzen im natürlichen Zustand Methan frei und nehmen Kohlendioxid auf. Menschliche Eingriffe in Feuchtgebiete, insbesondere die Umwandlung in Ackerland, führen hingegen zu einer Freisetzung von CO<sub>2</sub>, die eine etwaige, durch Trockenlegung entstehende Verringerung von Methan-Emissionen überkompensieren.

Ein internationales Forscherteam konnte nun berechnen, dass bei der Umwandlung arktischer und borealer Feuchtgebiete (wie z.B. Sümpfe und Moore) in Ackerland, sich der zusätzliche Strahlungsantrieb durch Treibhausgasemissionen in einem Zeitraum von 100 Jahren auf 0,1 Millijoule (mJ) pro Quadratmeter, im Fall von Feuchtgebieten der mittleren Breiten sogar auf etwa 0,15 mJ pro Quadratmeter aufsummiert. Auch bei der Umwandlung natürlich bewaldeter Feuchtgebiete in bewirtschafteten Nutzwald tragen diese Standorte in der Folge stärker

*Eddy-Kovarianz-System zur Messung des turbulenten Austauschs von Wärme, Wasserdampf, CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> zwischen wiedervernässtem Moor und Atmosphäre. Standort der Messanlage ist Zarnekow in Nordost-Deutschland.  
(Foto: E. Larmanou, GFZ)*

zur Erwärmung bei, wenn auch erheblich weniger als unbewaldete Feuchtgebiete.

Feuchtgebiete sind einzigartige Ökosysteme, die im natürlichen Zustand meist als große natürliche Quelle für das Treibhausgas Methan (CH<sub>4</sub>), zugleich aber auch als bedeutende Senke für das Treibhausgas Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) fungieren. Die Klimawirksamkeit solcher Feuchtgebiete ergibt sich u.a. aus der Bilanz dieser beiden Gase. Zwar wirkt Methan als Treibhausgas über einen Zeitraum von 100 Jahren 28 mal stärker als Kohlendioxid, dennoch führt die Umwandlung von Feuchtgebieten in agrarisch genutzte Flächen und eine daraus resultierende Minderung von Methan-Emissionen letztlich doch zu einer Erwärmung. Dies vor allem durch die

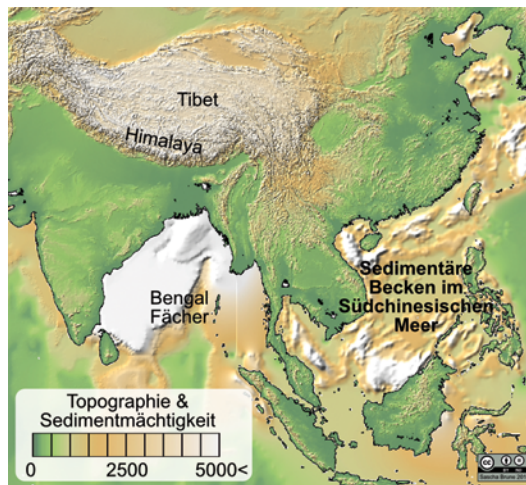
## Der Monsun ändert die Tektonik

erhöhten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Ändert sich das Feuchtgebiet durch menschlichen Einfluss, etwa durch Trockenlegung, wird dadurch auch der Einfluss dieses Areals auf das regionale Klima geändert. Die Gesamtbilanz dieser beiden unterschiedlich stark wirkenden Treibhausgase und damit die Klimawirksamkeit von Feuchtgebieten über verschieden lange Zeiträume hängt von der relativen Stärke und Richtung dieser im natürlichen Zustand entgegengesetzt wirkenden Stoffflüsse zwischen Ökosystem und Atmosphäre ab.

Wieviel dieser Effekt tatsächlich weltweit ausmacht, ist immer noch recht unsicher: Um eine Gesamtreibhausgasbilanz für Ökosysteme in Form von Feuchtgebieten aufzustellen, untersuchte das Team die Klimawirksamkeit von fast 30 unterschiedlich stark anthropogen beeinflussten arktischen, borealen und gemäßigten Feuchtgebietsstandorten weltweit. Zeitgleiche Messungen des CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Austauschs in Kontinental-Nordamerika, Grönland, Europa und Russland wurden für die Analyse und Modellierung herangezogen. Dabei wurden jeweils Paare aus einem natürlichen und einem anthropogen veränderten Standort gebildet, und zwar in den jeweils möglichen Kombinationen ähnlicher Ökosystemtypen, für die jeweils für ein volles Jahr CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Emissionsdaten vorlagen. Zur Bestimmung des veränderten Einflusses auf das Klima diente die Differenz der Netto-Kohlenstoffbilanz der Standortpaare als Serie zusätzlichen Massenflusses in die Atmosphäre. Dabei wurde die unterschiedliche Klimawirksamkeit und Verweildauer der verschiedenen Gase berücksichtigt und der Erwärmungseffekt für den Zeitraum 2000 bis 2100 berechnet. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:** Petrescu, A.M.R. et al. (2015): „Uncertain climate footprint of wetlands under human pressure“, - *Proceedings of the National Academy of Science PNAS*, 112, 15, 4594–4599.

**Ko-Autor:** Dr. Torsten Sachs  
(E-Mail: [torsten.sachs@gfz-potsdam.de](mailto:torsten.sachs@gfz-potsdam.de))



Heutige Topographie Südasiens und die Mächtigkeit der unterseeischen Sedimentfächer (in der gleichen Farbskala koloriert). Das Volumen der Fächer übersteigt das der Gebirge bei weitem. (Bild: S. Brune, Topographiedaten: GMRT v2.6, Sedimentmächtigkeit: Divins (2006), Visualisierung: GeoMapApp) (Abb.: CCBY-ND: S. Brune, 2015)

### Neuer klima-tektonischer Kopplungsmechanismus entdeckt

Eine Klimaänderung in Südasien führte vor etwa 23 Mio. Jahren zum Erstarren des Monsuns. Dadurch wurden mächtige Sedimentfrachten in das ozeanische Becken Südchinas transportiert. In der Folge führte das zu einem ungewöhnlichen und beschleunigten Absinken der Erdkruste. Die außerordentlich tiefen Becken am nördlichen Rand des Südchinesischen Meers sind Resultat dieser neu entdeckten Kopplung von klimatischen und tektonischen Prozessen.

Beim Auseinanderbrechen von Kontinenten, Rifting genannt, entstehen an den Kontinentalrändern Beckenstrukturen wie etwa vor Afrikas Westküste. Diese kühlen sich nach und nach ab und sinken dabei langsam und einheitlich in große Meerestiefen. Die Becken im Südchinesischen Meer rund um die Insel Hainan, vor allem das Baiyun-Becken, widersetzen sich dieser Regel. Hier beschleunigte sich sogar das Absinken noch mehrere Millionen Jahre nach dem kontinentalen Zerbrechen, anstatt sich zu verlangsamen. Ein Forscherteam aus den USA, Deutschland und Australien konnte nun diesen Mechanismus aufklären.

Der Schlüssel waren die riesigen Sedimentfolgen mit mehr als 5000m Mächtigkeit. Mit der Kombination geophysikalischer und Bohrlochdaten mit numerischer Modellierung konnte gezeigt werden, dass die außergewöhnlich weiche

Erdkruste der Südchinesischen Meeresränder unter der Last der Sedimente zu fließen begann.

Woher kam diese gewaltige Auflast durch das Sediment? Eine Änderung des Klimas Südasiens führte vor etwa 23 Mio. Jahren zum Erstarren des Monsuns, der durch hohe Niederschläge eine Zunahme der Erosion in den asiatischen Hochgebirgen bewirkte. Das losgelöste Material wurde von Flüssen wie dem Indus, Ganges und dem Pearl River in kilometerdicken Schwemmfächern in die umliegenden Ozeane und Meere verteilt. Im Gegensatz zu den Indus- und Bengal-Fächern ist die Erdkruste im Südchinesischen Meer extrem weich. Hier führte das Gewicht der Sedimentmassen dazu, dass das verformbare Krustengestein in rund 15 000 m Tiefe zur Seite gequetscht wurde und die ungewöhnliche Dehnung der Erdkruste ermöglichte. Dieser Mechanismus stellt eine bisher ungekannte Komponente von klima-tektonischer Kopplung dar. Denn genau zum Zeitpunkt vor rund 23 Mio. Jahren, als der Monsun sich hier verstärkte, begann auch das beschleunigte Absinken der Beckenböden Südchinas mit der Bildung der gewaltigen Sedimentfächer. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:** Clift, P.D., Brune, S., Quinteros, J. (2015): „Climate changes control offshore crustal structure at South China Sea continental margin“, - *Earth and Planetary Science Letters EPSL*, 420, 66–72.

## Angehobene Insel



Anhebung der Insel Isla Santa María als Resultat des Maule-Erdbebens im Jahr 2010. Die Insel wurde während des Erdbebens schlagartig um etwa 2 m angehoben. (Fotos: M. Moreno, GFZ)

### Die Insel Isla Santa María im Süden Zentralchiles dokumentiert einen kompletten seismischen Zyklus

Charles Darwin und sein Kapitän Robert Fitzroy waren Zeugen des großen Erdbebens von 1835 im südlichen Zentralchile. Der „Beagle“-Kapitän maß nach dem Beben eine vertikale Anhebung der Insel Isla Santa María von 2 bis 3 m. Was Darwin und Fitzroy nicht erahnen konnten war, dass sich ein solches Starkbeben 175 Jahre später an nahezu derselben Stelle wiederholen sollte. Vor der Westküste Südamerikas taucht der Ozeanboden des Pazifik unter den südamerikanischen Kontinent. Der Spannungsauf- und -abbau der Erdkruste entlang des ganzen Kontinents führt dazu, dass in rund anderthalb Jahrhunderten die gesamte Strecke von Feuerland bis Peru in einer Serie von Erdbeben einmal komplett durchbricht. Das Beben von 1835 war der Beginn eines solchen seismischen Zyklus‘ an dieser Stelle.

Ein Team von Geoforscherinnen und -forschern aus Deutschland, Chile und den USA konnte nach Auswertung des Maule-Erdbebens von 2010 erstmals einen vollständigen seismischen Zyklus in den Ver-

tikalbewegungen der Erdkruste an dieser Stelle messen und nachmodellieren. Nachdem das Beben von 1835 mit einer Magnitude von etwa 8,5 die Isla Santa María um bis zu 3 m angehoben hatte, sank die Insel im Verlauf der folgenden 175 Jahre wieder um 1,5 m ab und wurde durch das Erdbeben von Maule mit einer Momenten-Magnitude von 8,8 erneut um 1,5 bis 2 m angehoben.

Das Maule-Beben gehört zu den stärksten Beben, die jemals durch ein modernes Netzwerk weltraum-geodätischer und geophysikalischer Messsysteme am Boden vollständig erfasst wurden und ist daher gut dokumentiert. Schwieriger war die Rekonstruktion der Vorgänge von 1835. Aber die nautischen Karten von 1804, vor dem Beben, von 1835 und von 1886 sowie die präzisen Aufzeichnungen des Kapitäns erlaubten in Verbindung mit modernen Methoden eine hinreichend genaue Bestimmung der Vertikalbewegung der Erdkruste über einen vollständigen seismischen Zyklus. Zu Beginn eines solchen Zyklus wird Energie in Form einer elastischen Verformung der Erdkruste gespeichert, die bei einem Erdbeben dann schlagartig frei-

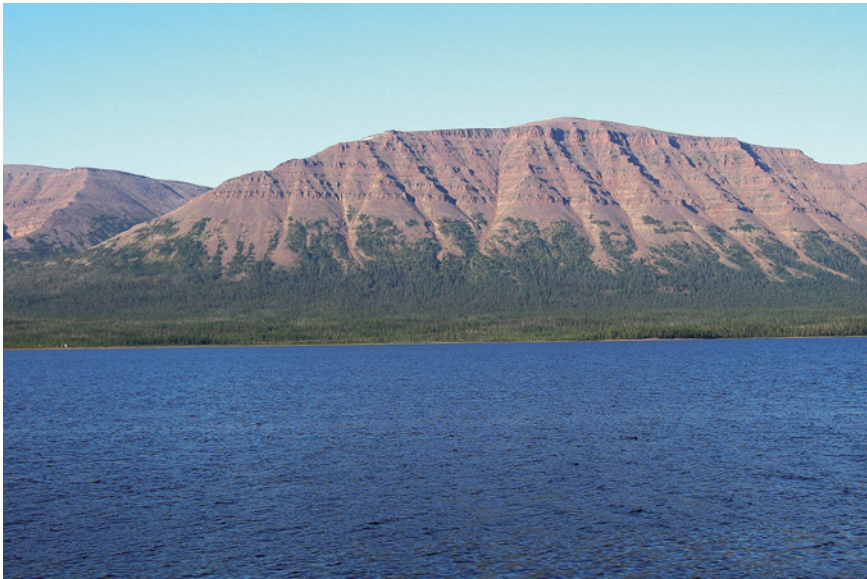
gesetzt wird. Die Beobachtungen deuten aber darauf hin, dass nach einem solchen Beben das erneute Absinken nicht gleichmäßig geschieht. Zwischen den großen Erdbeben verhakt sich die Platte unter der Isla Santa María unter dem Rand Südamerikas und drückt ihn, mit-samt der Insel, nach unten und zugleich nach Osten. Während des Bebens dreht sich die Bewegungsrichtung um, Südamerikas Rand springt nach oben und nach Westen. Dieses komplexe Bewegungsmuster konnte mit einem numerischen Modell perfekt bestätigt werden. In der Summe ergibt sich über die Zeit eine dauerhafte Anhebung von 10 bis 20 % der totalen Anhebung.

Aufzeichnungen von Erdbeben zeigen, dass es keine regelmäßigen Wiederholungszeiten oder gleichmäßig wiederholte Magnituden von Erdbeben gibt. Um das Erdbebenrisiko daher besser abschätzen zu können, sind die Erfassung und Messung von Verformungen der Erdkruste über vollständige seismische Zyklen ein wichtiges Hilfsmittel. ■

#### Weitere Untersuchungsergebnisse in:

Wesson, R. L., Melnick, D., Cisternas, M., Moreno, M., Ely, L. (2015): „Vertical deformation through a complete seismic cycle at Isla Santa María, Chile“, - Nature Geoscience letter, DOI: 10.1038/NGEO2468

## Aufstieg oder nicht?



*Sibirische Flutbasalte  
am See Glubokoe in  
der Norilsk-Region  
(Foto: D. V. Kuzmin, GFZ)*

### Wie heißes Gestein im Erdmantel gebremst wird

Gigantische Volumen heißen Gesteinsmaterials, die aus dem Erdmantel bis zur Lithosphäre aufsteigen, haben das Gesicht unseres Planeten geprägt. Sie führen, bei ausreichender Größe, zum Auseinanderbrechen von Kontinenten und sind auch verantwortlich für das Massenaussterben in bestimmten Phasen der Erdgeschichte. Bisher nahm man an, dass diese – Mantelplumes genannten – riesigen Gesteinsströme aufgrund ihrer hohen Temperatur direkt aus dem tiefen Erdmantel aufsteigen können. Ein Team von Geodynamik-Modelliererinnen und -Modellierern des GFZ berichtet in Nature Communications über mögliche Hindernisse, die den Aufstieg solcher Mantelplumes verhindern können und unter welchen Bedingungen das Gestein doch die Lithosphäre erreichen kann. Dabei konnten zugleich Widersprüche in den bisherigen Modellvorstellungen aufgelöst werden.

Die größten auf der Erde stattfindenden magmatischen Ereignisse beruhen auf dem massenhaften Schmelzen von aus dem tiefen Erdmantel aufsteigendem heißem Gestein. Spuren solcher Ereignisse der Erdgeschichte finden sich an der Erdoberfläche im Gestein von so

genannten magmatischen Großprovinzen (Large Igneous Provinces). Die bisherige Vorstellung war, dass das heiße Gestein im tiefen Erdmantel aufgrund seiner hohen Temperatur einen starken Auftrieb besitzt, daher aufsteigt und die darüber liegende Erdoberfläche um mehr als 1 km anhebt. Außerdem wurde bisher angenommen, dass diese Mantelplumes eine pilzartige Form besitzen: Zuerst steigt Material in einer breiten, kugelartigen Struktur auf, in seiner Schleppe folgt ein wesentlich dünnerer Aufstiegskanal, der einen entschieden schmaleren Radius von etwa 100 km besitzt.

Das Problem: diese Modellvorstellung stimmt in vielen Fällen nicht mit geologischen und geophysikalischen Beobachtungen überein, die breitere Aufströmungszonen und eine geringere topografische Hebung vermuten lassen. Die Lösung liegt in Beobachtungen der Plattentektonik: An vielen Stellen auf der Erde sinkt der Ozeanboden in den Erdmantel, wie etwa in den Subduktionszonen rund um den Pazifik. Dieses Gesteinsmaterial taucht offenbar während Millionen von Jahren bis in große Tiefen in den Erdmantel ein. Dieser frühere Ozeanboden besitzt eine andere geochemische Zusammensetzung als der umgebende Erdmantel und hat eine

höhere Dichte. Wenn dieses Gestein mit dem heißen Gestein des Mantelplumes vermischt wird, was geochemische Analysen an Gesteinen aus magmatischen Großprovinzen vermuten lassen, verringert sich so der Auftrieb des Plumes. Damit stellt sich jedoch die Frage, ob das heiße Material noch leicht genug ist, um aus dem unteren Erdmantel bis zur Oberfläche aufzusteigen.

Die GFZ-Computermodelle zeigen, dass einerseits die Temperaturunterschied zum Umgebungsgestein hoch genug sein muss, damit der Auftrieb am Entstehungsort des Plumes im unteren Mantel ausreicht, um den Aufstieg beginnen zu lassen. Andererseits muss das Volumen des aufsteigenden Gesteins ausreichend groß sein, um eine Zone im oberen Erdmantel durchqueren zu können, wo Drücke und Temperaturen im Gestein zu Bildung von Mineralen führen, die wesentlich schwerer als das Umgebungsgestein sind. Unter diesen Bedingungen entstehen zum einen Mantelplumes mit so geringem Auftrieb, dass sie nicht zu massivem Vulkanismus und Naturkatastrophen führen, sondern sogar im Mantel stecken bleiben. Andererseits sind diejenigen Mantelplumes, die den gesamten Mantel durchqueren konnten, viel weiträumiger, verbleiben über Hunderte von Millionen Jahren im Erdmantel und heben die Erdoberfläche um wenige 100 m an, wie es auch in der Natur beobachtet wird. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:** Dannberg, J. und Sobolev, S. V. (2015): „Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept“, - Nature Communications, 6, 6960.

## Erfolgreich: Zement auf Kohlendioxid



GFZ-Pilotstandort  
Ketzin: Verfüllungs-  
arbeiten an einer  
Bohrung (Foto: T.  
Kollersberger, GFZ)

### Abschlussphase des Projekts zur geologischen Speicherung von CO<sub>2</sub>

Mit Verfüllungsarbeiten am ersten von fünf Bohrlöchern hat Anfang Juli 2015 die Abschlussphase des Projekts zur geologischen Speicherung des Treibhausgases Kohlendioxid in Ketzin/Havel begonnen. Nach erfolgreichem Ende des Speicherns und der Überwachungsphase werden in der finalen Projektphase namens COMPLETE alle Bohrlöcher auf dem Versuchsgelände schrittweise verschlossen, wie es das Bergrecht gesetzlich vorsieht. Das vom GFZ betriebene Pilotprojekt zur wissenschaftlichen Untersuchung der geologischen Speicherung des Treibhausgases CO<sub>2</sub> tritt damit in seine Endphase.

Die Verfüllung der Bohrung erfolgt dabei schrittweise. Die Bohrung ist mit mehreren Rohren mit nach unten hin sich verjüngenden Durchmessern versehen, daher wird zunächst der innerste, untere Rohrteil in etwa 459 m Tiefe abgeschnitten und aus der Bohrung gezogen. Anschließend wird die Bohrung bis in eine Tiefe von 275 m mit Zement verfüllt. Nach dem Aushärten dieser ersten Zementstrecke wird das nächstgrößere Rohrteil bei etwa 265 m abgeschnitten, ausgebaut und die Bohrung bis zur Oberkante mit Zement verfüllt. Zum Abschluss der

Arbeiten werden der sogenannte Bohrkeller obertägig und das Fundament zurückgebaut. Die Arbeiten werden auch international einmalige Ergebnisse zur sicheren Stilllegung und Verwahrung eines CO<sub>2</sub>-Speichers liefern.

Was sich zunächst nach unspektakulärer Routinearbeit anhört, kündigt den Abschluss einer mehr als zehnjährigen wissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Erfolgsgeschichte an. Zusammen mit seinen Vorläuferprojekten CO<sub>2</sub>SINK und CO<sub>2</sub>MAN schließt das Projekt COMPLETE zum ersten Mal den kompletten Lebenszyklus eines CO<sub>2</sub>-Speichers im Pilotmaßstab. Die bereits im Jahr 2004 begonnenen Arbeiten haben grundlegende Erkenntnisse zu Errichtung, Überwachung, Betrieb und Verhalten eines CO<sub>2</sub>-Speichers von der Erkundungs- bis zur Stilllegungsphase geliefert. Dabei kann der Pilotstandort Ketzin mit dem weltweit dichtesten ober- und untertägigen Messnetz zur Überwachung der CO<sub>2</sub>-Speicherung aufwarten. Die Forschungsarbeiten konnten zeigen, dass dieses Verfahren prinzipiell einen gangbaren Weg darstellt. CO<sub>2</sub> lässt sich bei adäquater wissenschaftlicher und technischer Begleitung unter bestimmten geologischen Voraussetzungen speichern.

Die Bohrungen am Standort Ketzin sollen im Jahr 2016 zurückgebaut und verfüllt werden, so dass sich der Pilotprojektstandort im Jahr 2017 wieder in seinem ursprünglichen Zustand befindet. ■

**Weitere Informationen  
zum Pilotstandort Ketzin:**  
[www.co2ketzin.de](http://www.co2ketzin.de)

## Klimawandel in Mittelamerika: Präkolumbianische Stadt stirbt aus



Aus dem Maarsee Aljojuca, Mexico, wurden Bohrkern als Klimaarchiv gezogen.  
(Foto: U. Kienel, GFZ)

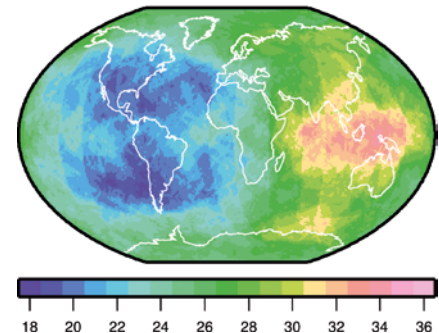
Warum die geheimnisumwitterte mittelamerikanische Stadt Cantona mit seinerzeit 90 000 Einwohnern zwischen 900 und 1050 n. Chr. verlassen und aufgegeben wurde, ist Gegenstand der Studie einer amerikanisch-deutsch-mexikanischen Forschergruppe aus den Bereichen Geo-, Klima- und Geschichtswissenschaften. Das Team um die Wissenschaftlerin Tripti Bhattacharya von der Berkeley-Universität in Kalifornien hat nun herausgefunden, dass eine Verquickung von Klimaänderung und vermutlich damit zusammenhängenden politischen Unruhen der Grund dafür war, dass die wichtige Stätte präkolumbianischer Kultur in Mexiko dem Zerfall preisgegeben wurde.

Die Wissenschaftlergruppe weist einen starken regionalen Klimawandel nach, der diese auf Landwirtschaft basierende Gesellschaft tief getroffen haben muss. Anhand von Sedimenten aus dem benachbarten Maarsee Aljojuca ließ sich diese Klimaänderung rekonstruieren. Im Projekt „Tropical Climate Dynamics“, das am GFZ angesiedelt ist, ließ sich in Bohrkernen aus diesen Sedimenten ab-

lesen, wie tiefgreifend dieser Einschnitt war. Es konnte eine Klimatologie für diese Region abgeleitet werden, die auf unter 100 Jahre genau die Niederschlagsänderungen im Sommer-Monsun nachvollzieht. Die Messung der Sauerstoffisotopie im Kalzit des Sediments zeigt deutlich eine zunehmende Trockenheit zwischen 500 und 1150 n. Chr. Genau in dieser Zeit wuchs die Stadt auf ihre höchste Einwohnerzahl, wurde aber zum Ende der Periode aufgegeben – die Antwort auf einen starken regionalen Klimawandel und daraus erwachsenen Änderungen. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:** Bhattacharya, T., Byrne, R., Böhnelt, H., Wogau, K., Kienel, U., Ingram, B. L., Zimmerman, S. (2015): „Cultural implications of late Holocene climate change in the Cuenca Oriental, Mexico“, - *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 112, 6, 1693-1698.

## Alle GNSS-Satelliten gleichzeitig operationell ausgewertet



Mittlere Anzahl (Farbskala) der an einem Ort gleichzeitig sichtbaren GNSS-Satelliten. Mit GPS allein können durchschnittlich nur sechs Satelliten simultan beobachtet werden. Die besondere Konfiguration der anderen GNSS-Satelliten erlaubt eine höhere Verfügbarkeit im asiatischen Raum. (Grafik: GFZ-Analysezentrum)

Seit Juni 2015 werden durch das GFZ-Analysezentrum in der GFZ-Sektion „GPS/Galileo-Erdbeobachtung“ im Rahmen des International GNSS Service (IGS), alle GNSS-(Global Navigation Satellite System) Navigationsatelliten routinemäßig ausgewertet. Zusätzlich zu den 31 GPS-Satelliten sind dies die Satellitennavigationssysteme GLONASS, GALILEO, QZSS und BeiDou. Insgesamt werden damit nun rund 76 Satelliten in die Auswertung integriert, alle für die globale Navigation bestimmten Satellitenbahn- und Uhrparameter werden so der öffentlichen Nutzergemeinschaft zur Verfügung gestellt.

Verglichen mit den jeweiligen Einzelsystemen werden durch die Verbindung aller Systeme die Genauigkeit und die Datenverfügbarkeit erhöht. In schwierigen Messumgebungen wie engen Stadtschluchten wird häufig das Signal der Satelliten gestört. Durch die Verwendung mehrerer Satellitensysteme erhöht sich die Zahl der zur Verfügung stehenden Signale und der Nutzer kann sich das beste Signal aussuchen. Darüber hinaus steigert die Verbindung der verschiedenen Systeme die Zeiträume und die Gebiete, für die ausreichend Signale ohne Unterbrechung zur Navigation zur Verfügung stehen. Zugleich verbessert die erhöhte Anzahl an Signalen die räumliche Auflösung bei der Atmosphärensondierung mithilfe GNSS. ■

## Hazard and Risk Team des GFZ im Einsatz



Hangrutschung am Fluss Kaligandaki nahe Beni Bazar, Nepal, im Jahr 2012  
(Foto: C. Andermann, GFZ)

### Hangrutschungen und Nachbeben in Nepal

Wenige Tage nach den beiden Katastrophenbeben am 25. April und 12. Mai 2015 brach das GFZ-„Hazard And Risk Team“ (HART) nach Nepal auf, um die Nachwirkungen der Erdbeben vor Ort zu untersuchen. Insbesondere die allgegenwärtige Gefahr durch Hangrutschungen steht im Fokus der Arbeiten, denn solche Ereignisse häufen sich in den Wochen und Monaten nach dem Beben. Die Arbeiten konzentrieren sich auf den Himalaya nördlich von Kathmandu. Vor allem die Flussgebiete des Buddhi Khola, des Trisuli und des Sun Koshi stehen im Fokus der geplanten Messungen, die voraussichtlich über anderthalb Jahre unter Mithilfe von lokalen Partnern durchgeführt werden.

Neben den direkten Auswirkungen eines Starkbebens wie Steinschlag, Einstürzen von Häusern oder Hangrutschungen gibt es auch eine Reihe von indirekten Auswirkungen, die über Monate bis Jahre anhalten können. Ein Starkbeben destabilisiert die gesamte Landschaft, es lockert den Boden und öffnet Risse im erdoberflächennahen Gestein. Dies begünstigt weitere Rutschungen und Steinschlag. Durch

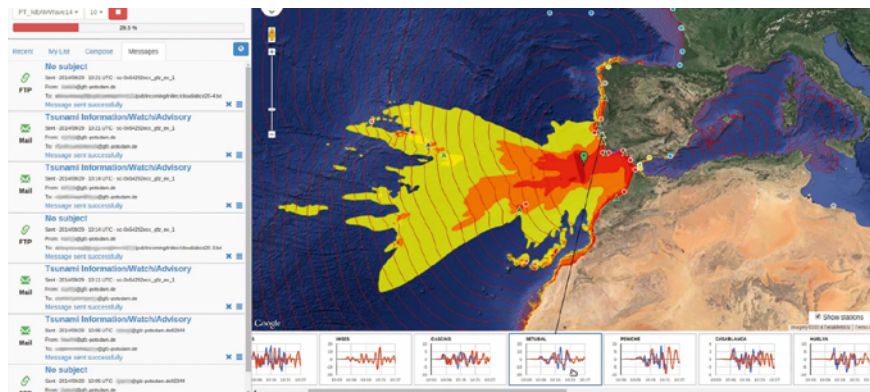
die neuen Risse kann Regenwasser in die Schicht zwischen Oberfläche und darunter liegendem Felsen sickern und so, vor allem in Starkregenzeiten, den Hang abrutschen lassen. Zugleich gelangt das Wasser schneller in Bäche und Flüsse und kann damit Hochwasserereignisse begünstigen. Im Verlauf von Monaten bis Jahren, abhängig von Witterung, Gestein und der Stärke des Bebens, entwickeln sich dieser Zustand wieder auf das Niveau vor dem Beben zurück: Die Risse schließen sich langsam wieder oder werden mit Sand und Erde verfüllt. Ziel des Einsatzes ist, die unterliegenden Mechanismen genauer zu untersuchen, um letztlich zu einer besseren Risikoabschätzung zu kommen. Dazu werden zwölf Seismometer, sechs Wetterstationen und bis zu 15 hydrologische Messstationen in Betrieb genommen.

Die Arbeiten werden vom GFZ koordiniert und sind in ein internationales Netzwerk eingebunden, an dem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Nancy, Zürich, Cambridge, Edinburgh, Utrecht sowie Partner aus Nepal beteiligt sind.

### Vulkan-Eruption auf den Kapverden

Zuvor kam das GFZ-„Hazard And Risk Team“ (HART) auf der kapverdischen Vulkaninsel Fogo zum Einsatz. Dort begann am 23. November 2014 ein Vulkanausbruch, der bis Anfang Februar 2015 andauerte. Die Eruption gilt als der größte Vulkanausbruch auf den Kapverden seit über 60 Jahren. Die Lavaströme verursachten beträchtliche Schäden, so sind drei Ortschaften unter den Lavamassen begraben oder zerstört, tausende Anwohner mussten evakuiert werden. Über die Europäische Kontaktstelle CECIS (Common Emergency Communication and Information System) wurde das GFZ gebeten, den Verlauf der Eruption zu beobachten und seine Expertise auf dem Gebiet der Vulkanüberwachung bereitzustellen. HART arbeitet hierfür gemeinsam mit der Universität der Kapverden, dem Vulkanobservatorium auf den Kanaren und dem DLR. ■

## Helmholtz Enterprise-Ausgründung: TRIDEC Cloud



TRIDEC Cloud User Interface

Forschungsergebnisse zügig in die Anwendung zu bringen und damit zum gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Nutzen einzusetzen – das ist das Ziel des Förderprogramms „Helmholtz Enterprise“. Drei neue Ausgründungen aus Helmholtz-Zentren wurden in der Auswahlrunde 2015 in die Förderung aufgenommen. Bis zu 260 000 Euro Startkapital erhalten die Gründerinnen und Gründer. Die Hälfte davon stammt aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz-Gemeinschaft, die andere Hälfte steuert das jeweilige Zentrum bei. Am GFZ wird die Plattform TRIDEC Cloud gefördert.

Die neuartige Plattform des Ausgründungsteams des GFZ führt wissenschaftliche Daten und Modelle für beispielsweise Wetter- oder Katastrophenvorhersagen mit Daten und Algorithmen der Kunden, vorwiegend aus der Versicherungsbranche, zusammen. Der als Cloud-Modell konzipierte Service ist auf spezifische Kundeninteressen zugeschnitten und bedient drei verschiedene Marktsegmente: Der erste Bereich richtet sich gleichermaßen an (Rück-)Versicherer und Versicherte. Hier wird die Plattform für die Risikoeinschätzung, Bewertung der Schadensanfälligkeit und Katastrophenanaly-

se im Bereich Naturgefahren eingesetzt. Versicherungsunternehmen können so die Gefahrenanfälligkeit besser abschätzen, präventive Maßnahmen anbieten und die Notfallvorsorge und Gefahrenabwehr der Versicherten unterstützen. Der zweite Bereich richtet sich vor allem an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, aber auch an Kundinnen und Kunden anderer Bereiche, die auf die wissenschaftlichen Algorithmen und Daten zugreifen und damit individuelle Berechnungen durchführen möchten, beispielsweise in der Tsunami- oder Erdbebenforschung. Der dritte Bereich betrifft die Frühwarnung und das Notfallmanagement für Naturgefahren. Die neue Cloud-basierte Plattform soll helfen, unabhängig entwickelte Einzellösungen bisheriger Frühwarnsysteme besser zu vernetzen und zu einem einheitlichen System zusammenzuführen, um so das Notfallmanagement auf nationaler und internationaler Ebene für die gesamte Frühwarnkette zu verbessern. ■

### Link zur Plattform:

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

### Kontakt:

Prof. J. Wächter  
([joachim.waechter@gfz-potsdam.de](mailto:joachim.waechter@gfz-potsdam.de))

## Neue Projekte



### Drei neue Marie Curie Innovative Training Networks am GFZ

Gleich drei neue Doktorandennetzwerke mit GFZ-Beteiligung, die Marie Skłodowska-Curie Action fellowships: Innovative Training Networks (ITN), wurden von der EU-Kommission bewilligt. Zwei dieser Netzwerke werden am GFZ koordiniert, eins an der Universität Bristol, unter GFZ-Beteiligung. Nun beginnen die Vertragsvorbereitungsphasen.

Die bewilligten Projekte sind:

„SYSTEM-RISK - A Large-Scale Systems Approach to Flood Risk Assessment and Management“ (Prof. Bruno Merz, Dr. Heidi Kreibich, Dr. Sergiy Vorogushyn, GFZ-Sektion „Hydrologie“; Koordination GFZ), „SUBITOP – Understanding subduction zone topography through modelling of coupled shallow and deep processes“ (Prof. Niels Hovius, Sektion „Geomorphologie“ und Prof. Onno Oncken, Sektion „Dynamik der Lithosphäre“; Koordination GFZ), „MicroArctic - Microorganisms in warming Arctic environments“ (Prof. Dirk Wagner, Sektion „Geomikrobiologie“ und Prof. Liane Benning, Sektion „Interface-Geochemie“; Koordination Universität Bristol).

ITN sind europäische Netzwerke zur strukturierten Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern, die noch nicht promoviert sind, mit dem Ziel, ihre wissenschaftlichen und allgemeinen Kompetenzen innerhalb eines internationalen und interdisziplinären Forschungs- und Ausbildungsprogramms zu erweitern. Erfahrene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler können über ein ITN eine wissenschaftliche Schule auf hohem Niveau begründen. Im Rahmen der Projekte werden jeweils auch Trainingsmaßnahmen fachübergreifender Art angeboten. Die Marie-Curie-Netzwerke bestehen aus sehr gut ausgestatteten



Grants. Die drei neu eingeworbenen Projekte leisten so einen wichtigen Beitrag zur Nachwuchsförderung am GFZ.

### European Plate Observing System

Das von der EU geförderte Projekt European Plate Observing System (EPOS) geht in eine neue Phase. Nach dem Abschluss der vorbereitenden Arbeiten im Jahr 2014 startet nun die Implementierungsphase.

EPOS, ein Vorhaben im European Strategy Forum on Research Infrastructures (ES-FRI), hat das Ziel, eine übergreifende geowissenschaftliche Infrastruktur in Europa zu entwickeln und später zu betreiben. Diese Infrastruktur soll (1) organisierten Zugang zu Infrastrukturelementen (z. B. Speziallaboratorien, Gerätepools) bieten, (2) Daten unterschiedlichster geowissenschaftlicher Disziplinen unter einer gemeinsamen Datenpolicy und gemeinsam geklärten und festgelegten kostenfreien Lizenzregeln (Creative Commons) bereitstellen, (3) eine gemeinsame Nutzung von Produkten (z. B. Risikokarten in Zusammenarbeit mit dem Global Earthquake Model GEM) und Software gewährleisten sowie (4) einen geregelten und organisierten Zugang zu Höchstleistungsrechnern bieten.

EPOS wurde von der Europäischen Kommission als eines der drei zukunftsweisenden Projekte in der ESFRI-Roadmap bewertet. Die Implementierungsphase des Projekts wird ab dem 1. Oktober 2015 über vier Jahre mit insgesamt 18,3 Mio. Euro finanziert. Das GFZ ist mit 1,8 Mio. Euro beteiligt und in 13 von 17 Arbeitspaketen vertreten. Das Projekt wird im Wesentlichen von den Geo.8-Partnern INGV, Italien (Federführung), CNRS, Frankreich, BGS/NERC, Großbritannien, ETH, Schweiz, GFZ, Deutschland und CSIC, Spanien, getragen und entwickelt.

#### Kontakt:

Dr. Jörn Lauterjung  
(lau@gfz-potsdam.de)

### SIBYL



*Das Rathaus von Navelli, Italien, nach dem Beben von L'Aquila (Foto: M. Pilz, GFZ)*

Am 28. Januar 2015 startete das EU-Projekt SIBYL (Seismic monitoring and vulnerability framework for civil protection) mit einem Kick-off-Meeting in Potsdam.

Ziel im Rahmen von SIBYL ist die Entwicklung eines operativen Rahmens für Zivilschutzbehörden, um kostengünstig und schnell die seismische Vulnerabilität von Gebäuden bewerten zu können. Hierbei stehen folgende Szenarien im Fokus:

- eine kurzfristige Schwachstellenanalyse der Gebäude in stark erdbebengefährdeten Gebieten (Pre-Event-Situation) und
- die Überwachung der dynamischen Vulnerabilität des Gebäudebestands während einer Erdbebensequenz.

SIBYL wird federführend durch das Zentrum für Frühwarnsysteme am GFZ koordiniert und organisiert. Partner in diesem Projekt sind die Technische Universität Berlin, die Aristoteles Universität in Thessaloniki, Griechenland, und AMRA (Analysis and Monitoring of Environmental Risk), Italien. Darüber hinaus ist eine enge Zusammenarbeit mit den nationalen Katastrophenschutzbehörden (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, BBK und Technisches Hilfswerk, THW) angestrebt. Das Projekt hat eine Laufzeit von zwei Jahren und wird von der EU-Kommission im Rahmen des Programms „Prevention and preparedness projects in civil protection and marine pollution (ECHO A)“ mit 480 000 Euro finanziert.

#### Weitere Informationen:

<http://www.sibyl-project.eu>

### IMPRES



*Die verlässliche Analyse des derzeitigen und wahrscheinlichen zukünftigen Risikos durch hydro-meteorologische Extreme, wie beispielsweise Hochwasser, ist eine wichtige Grundlage für ein effizientes Risikomanagement (Foto U. Herrmann)*

Ziel des EU-Projekts IMPRES (IMproving PRedictions and management of hydrological EXtremes) ist, die Methoden für die Vorhersage von meteorologischen und hydrologischen Extremen sowie ihren Auswirkungen deutlich zu verbessern. Dafür werden neue Modellkonfigurationen und Datenassimilationstechniken entwickelt, implementiert und anhand von vergangenen Ereignissen validiert. Es werden innovative Risikoabschätzungskonzepte, beispielsweise probabilistisches Impact Assessment, für die Entscheidungsunterstützung unter großer Unsicherheit entwickelt. Außerdem werden vielfältige Fallstudien durchgeführt, um regionen- und sektorübergreifend zu testen, wie robust verschiedene Risikomanagementstrategien sind. Die GFZ-Sektion „Hydrologie“ trägt mit der Entwicklung probabilistischer Modelle zur Abschätzung von Hochwasserschäden zum Forschungsprojekt bei. Die Leitung des Projekts liegt bei dem Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). Insgesamt sind 23 Organisationen aus neun europäischen Ländern an diesem Projekt, das durch das Horizon2020-Rahmenprogramm für Forschung und Entwicklung für den Zeitraum 2015 bis 2019 mit insgesamt 9 Mio. Euro gefördert wird, beteiligt.

#### Kontakt:

Dr. Heidi Kreibich  
(heidi.kreibich@gfz-potsdam.de)

## PALEX – Paläoklimaforschung im Nahen Osten



Während einer Geländeexkursion im Jahr 1995 aufgetretene Sturzflut am westlichen Toten Meer. Zum Größenvergleich die Exkursionsteilnehmer. Gegenstand von PALEX sind unter Anderem Untersuchungen zum besseren Verständnis von Extremereignissen wie Sturzfluten (flash floods), deren Häufigkeit, das Ausbreitungsverhalten im Seekörper und die Auswirkungen auf die Sedimentation im Toten Meer (Foto: Yehouda Enzel, HU)

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Fachrichtungen Sedimentologie, Hydrologie und Geochemie aus Deutschland, Israel und Palästina arbeiten gemeinsam im Forschungsprojekt PALEX (Paläoklima im östlichen Mittelmeerraum – Levante: Paläohydrologie und extreme Flutereignisse), das am 13. und 14. Juli 2015 mit einem Kick-off-Workshop in Potsdam startete.

Für die Region am Toten Meer sagen Modellszenarien zunehmende Trockenheit bei fortschreitender globaler Erwärmung voraus. Dies würde Millionen von Menschen betreffen, die in dieser Region leben. Um mögliche zukünftige Änderungen in dieser sensitiven Region besser abzuschätzen, ist ein grundsätzliches Verständnis der hydrologischen Entwicklung notwendig. Trotz enormer Fortschritte in der Klimaforschung gibt es noch immer erhebliche Wissenslücken bei wichtigen Prozessen im Klimasystem und seiner Reaktion auf menschliche Eingriffe. Der Schwerpunkt in PALEX liegt auf extremen hydro-meteorologischen Ereignissen, wie starken Überschwemmungen, und deren Einfluss auf die Sedimentation. Daten dazu werden aus dem langen Sedimentprofil der ICDP-Bohrung im Toten Meer abgeleitet. Es wird spe-

ziell die Hypothese getestet, dass Änderungen der Häufigkeit und Magnitude der Flutereignisse in Abhängigkeit von kurz- und langfristigen Klimaänderungen stehen. PALEX legt ein besonderes Augenmerk auf die Wissensvermittlung und eine verstärkte internationale Zusammenarbeit in Bezug auf Humanressourcen und Technologie. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) fördert das am GFZ koordinierte Projekt mit 800 000 Euro für die erste, zweijährige Phase. ■

### Kontakt:

PALEX-Sprecher: Prof. Achim Brauer  
(achim.brauer@gfz-potsdam.de)

PALEX-Koordination: Dr. Markus Schwab  
(markus.schwab@gfz-potsdam.de)

### Wärme neu gedacht! GFZ gründet „Zwanzig20 Forum Wärmewende“



Der Aufbau einer emissionsarmen Energiewirtschaft unter Verzicht auf die Kernenergie ist eng mit einer Energiewende auf dem Wärmemarkt verbunden. Die Wärmeversorgung beruht heute auf fossilen Energieträgern, deren Dominanz durch Verfügbarkeit, vorhandene Vertriebs- und Infrastrukturen und gute Skalierbarkeit historisch gewachsen ist. Unter diesen Rahmenbedingungen hat sich ein stark heterogener Wärmemarkt ausgeprägt, der von der Mischversorgung ländlicher Haushalte bis zur Zentralversorgung urbaner Stadtquartiere reicht. Eine Energiewende auf dem Wärmemarkt – eine „Wärmewende“ – muss dieser Heterogenität gerecht werden. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Strategieprojekts „Wärme neu gedacht“ gründete das GFZ das „Zwanzig20-Forum Wärmewende“. Das Forum entwickelt Strategien und Handlungsoptionen für die Implementierung regenerativer Wärme. Am 15. April 2015 diskutierten die 50 Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Auftaktveranstaltung dieses Projekts in Potsdam mögliche

Ansätze zur Implementierung regenerativer Wärme. Demonstrationsvorhaben in Ostdeutschland begleiten den Strategieprozess und liefern exemplarisch Lösungen für die technologischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Das Forum versteht sich als offene Cluster-Struktur unter Federführung des GFZ. Für das GFZ steht die Wärmebereitstellung der Zukunft im Fokus, da die Forschung am GFZ die unverzichtbaren Optionen der stofflichen und thermischen Speicherung im geologischen Untergrund und die Nutzung von Erdwärme ermöglichen soll. Im Forum vertreten sind weitere Forschungseinrichtungen, dazu Universitäten, Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft sowie Kommunen und Landkreise. Es ist eng vernetzt mit bestehenden Innovationsnetzwerken wie z. B. dem Cluster Energietechnik Berlin-Brandenburg.

Das Vorhaben „Wärme neu gedacht!“ wird für 24 Monate mit 1 Mio. Euro durch das BMBF im Programm „Zwanzig20 Partnerschaft für Innovation“ gefördert. ■

### Kontakt:

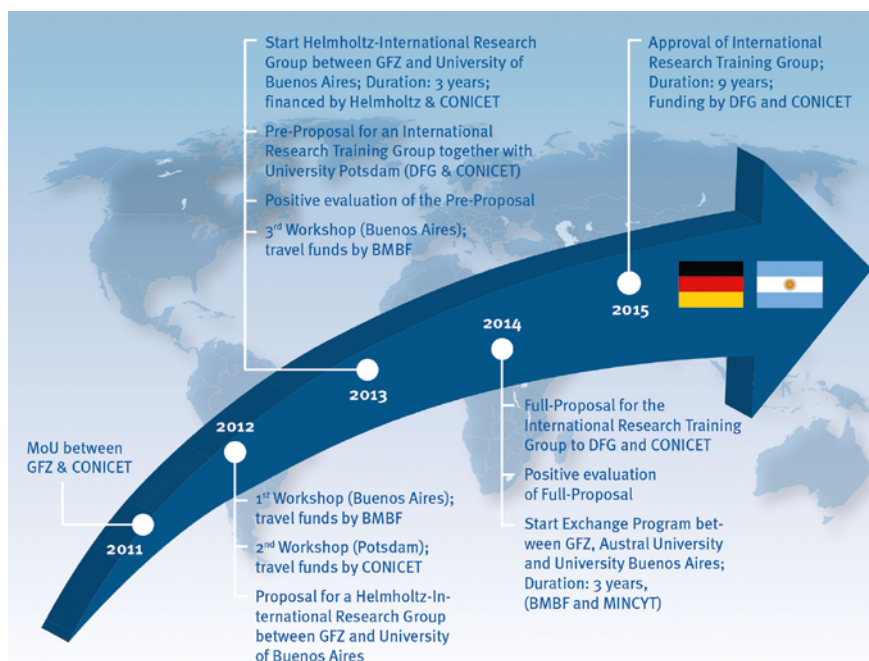
Priv. Doz. Dr.-Ing. Oliver Kastner  
(oliver.kastner@gfz-potsdam.de) und  
Daniel Acksel  
(daniel.acksel@gfz-potsdam.de)

## Internationale Zusammenarbeit

In den bilateralen europäischen Beziehungen des GFZ konnte mit **Italien** ein weiteres Kapitel der Zusammenarbeit aufgeschlagen werden. Nach einem ersten Workshop, den das GFZ im November 2013 gemeinsam mit der Italienischen Botschaft zum Thema „Dealing with Natural Hazards – German Italian Partnership on Seismic Risk Reduction“ ausrichtete, wurde der Wunsch nach weitergehenden Möglichkeiten der wissenschaftlichen Kooperation im Helmholtz-Forschungsbereich „Erde und Umwelt“ geäußert. Als Follow-up organisierten GFZ und die Italienische Botschaft daher am 23. Februar 2015 im Headquarter des italienischen Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) in Rom einen Workshop, der mehr als 60 Expertinnen und Experten der Helmholtz-Gemeinschaft und des CNR zusammenführte. Aufbauend auf der traditionell guten Zusammenarbeit der beiden Forschungsorganisationen im Forschungsbereich „Erde und Umwelt“ wurden auf dem Treffen gemeinsame zukünftige Forschungsthemen definiert, die in ein gemeinsames Memorandum of Understanding (MoU) einfließen. Dieses soll noch 2015 unterzeichnet werden.

Über die bereits in der Vergangenheit vorgestellten Kooperationen hinaus, wird die Zusammenarbeit mit **Norwegen** weiter intensiviert. Nach dem Besuch der neuen Vorstandsvorsitzenden der norwegischen Stiftung NORSTAR, Dr. Anne Strømme Lycke, am 12. Dezember 2014 am GFZ, wurde im Mai 2015 ein entsprechendes Abkommen zur Zusammenarbeit mit der renommierten geowissenschaftlichen Forschungseinrichtung unterschrieben.

Am 20. Mai 2015 fand am GFZ der Kick-off-Workshop für das gemeinsam von GFZ und der türkischen Disaster and Emergency Management Authority (AFAD) betriebene bohrlochgestützte Erdbebenobservatorium an der „North Anatolian Fault“, **Türkei**, statt. Das Projekt ist Teil des International Continental Drilling Programms (ICDP), in dem das GFZ den Vorsitz im Executive Committee und in der Operational Support Group innehat.



Aufbau und Entwicklung der Forschungsk Kooperation zwischen GFZ und Argentinien

Am 8. Mai 2015 bewilligte die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) das gemeinsam von GFZ und Universität Potsdam beantragte Internationale Graduiertenkolleg „SuRfAce processes, TEctonics and Georesources: The Andean foreland basin of Argentina (StRaTEGy)“. Es ist das erste Internationale Graduiertenkolleg der DFG mit **Argentinien** (das dritte in Südamerika) und wurde am 27./28. Mai 2015 offiziell durch die DFG-Generalsekretärin Dorothee Dzwonnek in Buenos Aires eröffnet.

Der vom GFZ initiierte und gesteuerte Prozess der kontinuierlichen Forschungsanbahnung erreichte damit ein wichtiges Etappenziel. Innerhalb von nur gut drei Jahren konnte aus einem MoU zwischen GFZ und CONICET ein internationales Großprojekt entwickelt werden, das für die nächste Dekade die geowissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen GFZ und Argentinien bestimmen wird. Daran sind – neben dem GFZ – das BMBF, die Helmholtz-Gemeinschaft, die DFG, der Nationale Rat für Wissenschaftliche und Technologische Forschung (CONICET), und das Argentinische Forschungsministerium (MINCYT), beteiligt.

Komplementär zu den Aktivitäten in Argentinien, wurden die Verhandlungen mit Wissenschaftsinstitutionen in **Kolumbien** fortgesetzt. Das Land durchläuft derzeit eine dynamische Entwicklung im Wissenschafts- und Innovationssektor, die ausländischen Forschungseinrichtungen zahlreiche Kooperationsperspektiven bietet. Nach den bilateralen Gesprächen zur wissenschaftlich-technologischen Zusammenarbeit zwischen Deutschland und Kolumbien (23./24. April 2015) ist nun die konkrete Zusammenarbeit mit dem geologischen Dienst Kolumbiens, der Universidad Nacional in Bogota und einschlägigen Unternehmen geplant. Aufbauend auf dem im Herbst 2014 durchgeführten Trainingskurs „Seismology and Seismic Risk Assessment“ des GFZ in Bogota wird sich die wissenschaftlich-technologische Zusammenarbeit des GFZ unter anderem auf Fragen zur induzierten Seismizität fokussieren, ein derzeit aktuelles Thema der kolumbianischen Erdöl-/Erdgasindustrie. Ein erster Workshop soll noch 2015 in Kolumbien stattfinden. Die enge Abstimmung mit der kolumbianischen Botschaft in Berlin, Besuche hochrangiger Wirtschafts- und Wissenschaftsdelegationen (zuletzt im April 2015) und Kon-

sultationen mit dem kolumbianischen Umweltminister Gabriel Vallejo López (4. Mai 2015) flankieren die aktuellen Planungen.

Wie die südamerikanischen Länder ist auch die Region **Zentralasien** durch eine dynamische Entwicklung in Bildung und Forschung gekennzeichnet und für das GFZ seit langem eine Schwerpunktregion seiner bilateralen Forschung. Die GFZ-Forschungsaktivitäten zur Bestimmung der Erdbebengefährdung und Risikobewertung dieser Region haben durch die jüngste Katastrophe in **Nepal** erneut eine sehr aktuelle Bedeutung erhalten und verdeutlichen nachdrücklich die große Bedeutung der Forschung in Regionen mit hoher seismischer Aktivität. Als Reaktion auf das schwere Beben in Nepal wird dort aktuell ein hydrologisch-geomorphologisch und seismisches Beobachtungsnetzwerk des GFZ aufgebaut (vgl. Beitrag oben „Hazard and Risk Team des GFZ im Einsatz“). Da die Dynamik geomorphologischer Reaktionen, z.B. Hangrutschungen, noch über Monate bis Jahre durch die Bodenerschütterungen beeinflusst wird, sind diese Prozesse für die post-seismische Gefährdungsanalyse von enormer Bedeutung.

Vom 8. bis 10. Juni 2015 besuchte eine GFZ-Delegation daher das International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) in Teheran, Iran, eines der führenden außeruniversitären Forschungseinrichtungen des **Iran**, die University of Teheran und das Institute for Forest, Range and Watershed Management. Mit allen drei Institutionen wurden Abkommen zur zukünftigen Zusammenarbeit unterzeichnet. Neben der rein fachlichen Kooperation (Geo-Hazard-Forschung und Remote Sensing) steht der Wissenschaftlerausaustausch im Fokus der zukünftigen Zusammenarbeit. Höhepunkt der Reise bildete ein Treffen des Vorstandsvorsitzenden Prof. Reinhard Hüttl mit dem stellvertretenden iranischen Energieminister Dr. Sattar Mahmoudi. Im Vordergrund des Gedankenaustauschs standen Fragen zum Einsatz erneuerbarer Energien und die zukünftige Nutzung des geologischen Untergrunds. Dr. Mahmoudi, selbst Geologe, zeigte sich an der zukünftigen Zusam-

menarbeit mit dem GFZ stark interessiert. In einem MoU soll dazu die notwendige Grundlage geschaffen werden.



*Treffen des GFZ-Vorstandsvorsitzenden Prof. Reinhard Hüttl mit dem stellvertretenden iranischen Energieminister Dr. Sattar Mahmoudi (3. v. l.) (Foto: Ministry of Energy, Iran)*

Fortschritte machte auch die Kooperation mit **Indien**. Aus einer Reihe einschlägiger Workshops in 2013 und 2014 und Besuchen hochrangiger Wissenschaftsdelegationen am GFZ resultierte ein MoU zwischen der Helmholtz-Gemeinschaft und dem indischen Ministry for Earth Sciences. Das im April 2015 unterzeichnete MoU trägt in den verabredeten Forschungsthemen primär die „Handschrift des GFZ“. Aufgrund seiner hohen wissenschaftspolitischen Relevanz fand das MoU Eingang in die Abschlusserklärung des Treffens zwischen Bundeskanzlerin Angela Merkel und dem indischen Premierminister Narendra Modi am 14. April 2015.

Vom 4. bis zum 6. Mai 2015 fand am GFZ das 2. Science Progress Meeting des Helmholtz Virtuellen Instituts „Dead Sea Research Venue – DESERVE“ statt. DESERVE befasst sich mit den drei großen Herausforderungen: Umweltrisiken, Wasserverfügbarkeit und Klimawandel in der Region des Toten Meers, wo ein besonders schneller Umweltwandel mit langfristiger Wirkung beobachtet werden kann. An dem Virtuellen Institut sind neben dem GFZ auch das Karlsruhe Institut für Technologie KIT, das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ und Forschungseinrichtungen aus **Israel, Palästina** und **Jordanien** beteiligt.

Nach einem Besuch von Prof. Hüttl im Dezember 2014 wird derzeit die wissenschaftlich-technologische Zusammenar-

beit mit **Qatar** erörtert. Qatar ist insbesondere an angewandter Forschung, Produktentwicklung und Capacity Building in den Bereichen (i) Management und Nutzung des geologischen Untergrundes (Wasser- sowie Kälte-/Wärmespeicherung); (ii) Konzepte zu „Enhanced Gas-Recovery, EGS“ mittels CCS-Technologien; (iii) (Trink-)Wassermanagement; (iv) Hybrid Cooling mittels Geothermie und Solar-Thermie interessiert. Für die zweite Jahreshälfte 2015 ist ein Workshop mit Forschungseinrichtungen in Doha geplant.

Zum Stichtag 1. Mai 2015 beschäftigte das GFZ 251 ausländische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 57 Nationen. Auch in den verschiedenen Programmen der Alexander von Humboldt-Stiftung entschieden sich im zurückliegenden Zeitraum eine Reihe internationaler Spitzenwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler für das GFZ:

- Associate-Prof. Mona Lisa von der nationalen Quaid-I-Azam Universität in Islamabad, Pakistan, mit einem Georg Forster-Forschungsstipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung,
- Prof. Roel Snieder von der Colorado School of Mines, USA, als Träger des Humboldt-Forschungspreises,
- Prof. Claudio Faccenna, Università degli studi Roma Tre, Italien, ebenso als Träger des Humboldt-Forschungspreises,
- Prof. Thorsten W. Becker, Department of Earth and Planetary Sciences, University of Southern California, Los Angeles, USA, im Rahmen seines Friedrich Wilhelm Bessel Research Awards und
- Prof. Jörn Davidsen (Department of Physics and Astronomy, University of Calgary, Kanada) als Alexander von Humboldt Research Fellow. ■

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

## Internationale Besuche am GFZ



Links: Besuch des kolumbianischen Umweltministers am GFZ; v.l.n.r.: Dr. Uwe Schneider, Sandra Liliana Córdoba Prieto, Prof. Marco Bohnhoff, Minister Gabriel Vallejo López, Prof. Reinhard Hüttl, Juliana González Ríos, Dr. Ludwig Stroink

Am 4. Mai 2015 informierte sich der kolumbianische Minister für Umwelt und nachhaltige Entwicklung Gabriel Vallejo López über die Forschungsarbeiten des GFZ und mögliche Kooperationen. Er wurde begleitet von Sandra Liliana Córdoba Prieto (II. Botschaftssekretärin „Umwelt“) und Juliana González Ríos (Gesandte-Botschaftsrätin) von der kolumbianischen Botschaft in Berlin.

Rechts: Iranischer Botschafter am GFZ; v.l.n.r.: Prof. Michael Weber, Houshang Mohammadi (Wissenschaftsattaché), Prof. Harald Schuh, Botschafter Ali Majedi, Dr. Jörn Lauterjung, Prof. Reinhard Hüttl, Dr. Ludwig Stroink, Prof. Stefano Parolai, Dr. Mahdi Motagh

Am 29. Mai 2015 besuchte der iranische Botschafter Ali Majedi das GFZ, um sich über den bevorstehenden Besuch einer GFZ-Delegation im Iran zu informieren. In dem Gespräch wurden potenzielle Kooperationsprojekte im Bereich Satellitengeodäsie, Geo-Hazard-Forschung, Wassermanagement und Nutzung des Untergrunds diskutiert.



Links: Sudanesische Delegation am GFZ; v.l.n.r.: Ghanim Yahia, Frau Afaf Mohamadani, Prof. Reinhard Hüttl, Botschafter Badreldin Abdalla, Dr. Ludwig Stroink

Am 24. Juni 2015 stand ein Gedankenaustausch mit dem sudanesischen Botschafter Badreldin Abdalla auf dem Programm. Gemeinsam mit zwei weiteren Diplomaten informierte er sich über aktuelle Forschungsthemen am GFZ und diskutierte mit Prof. Hüttl Forschungsbereiche für eine potenzielle wissenschaftlich-technologische Kooperation. ■

Fotos auf dieser Seite: E. Gantz, GFZ

# Ausgezeichnet

## Neue gemeinsame Berufungen



**Prof. Andreas Güntner**, GFZ-Sektion „Hydrologie“, übernahm zum 1. Januar 2015 eine Professur für Hydrogravimetrie in gemeinsamer Berufung

mit der Universität Potsdam. Andreas Güntners Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der skalenübergreifenden hydrologischen Prozessforschung unter Verwendung von Feldmessungen, Satellitendaten und Simulationsmodellen. Ein Schwerpunkt seiner Arbeit ist die Verbindung von Ansätzen der Geodäsie und der Hydrologie. Nach Forschungsaufenthalten in Brasilien promovierte Prof. Güntner im Jahr 2002 an der Universität Potsdam im Fachbereich Hydrologie/Geoökologie. Seit 2003 ist er als Wissenschaftler am GFZ tätig und leitet seit einigen Jahren die Arbeitsgruppe „Quantifizierung des Wasserkreislaufs“.

Zum 1. Juli 2015 starteten zwei weitere Professuren in gemeinsamer Berufung der Universität Potsdam. Prof. Taylor Schildgen übernahm eine Professur zum Thema „Landschaftsevolution und Klima-Interaktion“, Prof. Emmanuel Müller zum Thema „Knowledge Discovery and Data Mining“.



**Prof. Taylor Schildgen** leitet seit 2012 die DFG-Emmy-Noether-Gruppe „Geologic reconstructions of changes in erosion rates and hillslope processes in response

to climate forcing“, die sie von der Universität Potsdam ans GFZ mitbringt. Frau Schildgen ist am renommierten Massachusetts Institute of Technology (MIT) promoviert und hat ihre Universitätsabschlüsse in Schottland und den USA erlangt. Im Rahmen ihrer Professur wird sich Taylor Schildgen mit Veränderung von Erosionsraten und Hangrutschungsprozessen als Reaktion auf Klimaverän-

derungen beschäftigen. Eine fünfjährige Finanzierung der W2-Proessur hat Frau Schildgen im kompetitiven Helmholtz-Programm zur Förderung exzellenter Wissenschaftlerinnen eingeworben. Prof. Schildgen wird außerdem die Leitung einer Arbeitsgruppe „Landschaftsevolution und Klima-Interaktion“ in der GFZ-Sektion „Geomorphologie“ übernehmen.



**Prof. Emmanuel Müller** leitete vor seiner Berufung eine Nachwuchsgruppe zu Data Mining Algorithmen in heterogenen Datenräumen am Karlsruher Institut für

Technologie (KIT). Emmanuel Müller hat Informatik an der RWTH Aachen studiert, wo er 2010 promoviert hat. Es folgten Positionen als Research Assistant sowie Senior Researcher und Lecturer am KIT. Seit 2014 war Prof. Müller als Associate Fellow am KIT tätig, in Kollaboration mit der Universität Antwerpen/Belgien. Emmanuel Müller leitet in der Sektion Geoinformatik am GFZ die Arbeitsgruppe „Knowledge Discovery and Data Mining“. Er ist zugleich Professor an der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam in gemeinsamer Berufung mit dem Hasso Plattner Institut (HPI) und dem GFZ. Die Professur von Herrn Müller wird für fünf Jahre aus der Hasso-Plattner-Stiftung finanziert.



Auf Vorschlag des Fachbereichs Geowissenschaften der Freien Universität Berlin wurde apl. **Prof. Oliver Ritter**, GFZ-Sektion

„Geophysikalische Tiefensondierung“, am 31. März 2015 die akademische Würde eines außerplanmäßigen Professors verliehen. Oliver Ritter lehrt an der FU im Fach Geophysik. Er leitet am GFZ die Arbeitsgruppe Geo-Elektromagnetik.



Die Technische Universität Berlin verlieh apl.

**Prof. Stefano Parolai** am 22. Juli 2015 die Urkunde mit der akademischen Würde eines außerplanmäßigen Professors für das Fach Ingenieurseismologie. Stefano Parolai leitet am GFZ das

„Zentrum für Frühwarnsysteme“. ■

## Zwei ERC Grants an GFZ-Wissenschaftler



Gleich zwei GFZ-Wissenschaftler konnten sich erfolgreich um den hochdotierten ERC Consolidator Grant des European Research Councils bewerben und werden nun jeweils über einen Zeitraum von fünf Jahren mit bis zu 2 Mio. Euro gefördert. Bei den Wissenschaftlern handelt es sich um **Dr. Thomas Walter**, GFZ-Sektion „Erdbeben- und Vulkanphysik“, und **Dr. Dirk Sachse** aus der Sektion „Geomorphologie“. Thomas Walter erhält das Stipendium für sein Forschungsprojekt VOLCAPSE zur Verbesserung der Risikoabschätzung bei Vulkanausbrüchen, Dirk Sachse konnte mit seinem Projekt STEEPclim zur Rekonstruktion klimabedingter Veränderungen des Wasserkreislaufs in der Vergangenheit auf dem gesamten europäischen Kontinent punkten. Mit einem ERC Consolidator Grant werden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der Mitte ihrer Laufbahn gefördert, deren Forschung sich als besonders aussichtsreich darstellt. Der ERC Grant ist hochkompetitiv und wird für exzellente Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der Konsolidierungsphase vergeben, d. h. in einer Phase, in der sie eigene wissenschaftliche Teams und Forschungsprogramme aufbauen. ■

## Marie Curie-Stipendium für Amedea Perfumo

Die GFZ-Wissenschaftlerin **Dr. Amedea Perfumo**, Sektion „Geomikrobiologie“, wurde für ihr Projekt „Leben am Limit: Biodiversität und Aktivität von Mikroorganismen im tiefen Permafrost – Bio-Frost“ mit dem Marie Skłodowska-Curie-Stipendium des EU-Rahmenprogramms Horizon2020 ausgezeichnet. Das Projekt der Wissenschaftlerin erlaubt es, in tiefe Dauerfrostsedimente zu blicken, um dort das mikrobielle Leben zu erforschen, das sich trotz extremer Bedingungen unter Dauerfrost und ohne Sauerstoff in dieser Umwelt ansiedelt. ■

## Bernhard Steinberger Mitglied der Norwegischen Akademie der Technikwissenschaften



*Kirsti Strøm Bull, Präsidentin der Norwegischen Akademie der Technikwissenschaften, und Dr. Bernhard Steinberger bei Überreichung der Urkunde (Foto: T. Eckhoff, DNVA)*

**Dr. Bernhard Steinberger**, GFZ-Sektion „Geodynamische Modellierung“, wurde am 4. Mai 2015 als ausländisches Mitglied in die Norwegische Akademie der Technikwissenschaften in der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse aufgenommen. Er wird damit für seine Pionierarbeiten zu den Themen großräumige Mantelströmungen, Mantelplumes, plattentektonische Bezugssysteme und echte Polwanderung geehrt. ■

## Friedhelm von Blanckenburg in die BBAW aufgenommen

Die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (BBAW) hat am 5. Juni 2015 fünf neue Mitglieder gewählt. Der Leiter der GFZ-Sektion „Oberflächen-



nahe Geochemie“, **Prof. Friedhelm von Blanckenburg**, wurde in die mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse aufgenommen. Zum Mitglied kann berufen werden, wer sich durch herausragende wissenschaftliche Leistungen ausgezeichnet hat. Friedhelm von Blanckenburg ist einer der international führenden Wissenschaftler auf dem Gebiet der Geochemie, insbesondere der Isotopengeochemie. Seit einigen Jahren beschäftigt er sich mit der Quantifizierung von Prozessen auf der Erdoberfläche und der Interaktion zwischen biologischen und geologischen Vorgängen. Er ist Professor für die Geochemie der Erdoberfläche an der Freien Universität Berlin, in gemeinsamer Berufung mit dem GFZ. ■

## Michael Weber Präsident der DGG



**Prof. Michael Weber** ist seit dem 26. März 2015 neuer Präsident der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG). Michael Weber, Direktor des Departments „Physik der Erde“ am GFZ und Professor für Geophysik an der Universität Potsdam, übernimmt das Amt von Prof. Michael Korn aus Leipzig, der die DGG seit 2013 geführt hat.

Die Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e.V. hat annähernd 1200 Mitglieder aus mehr als 30 Ländern. Sie wurde 1922 in Leipzig gegründet, der Seismologe Emil Wiechert war ihr erster Vorsitzender. Die Ziele der DGG sind die Verbreitung und Erweiterung geophysikalischen Wissens in Forschung, Lehre, Anwendung und Öffentlichkeit. ■

## Rongjiang Wang erhält Rebeur-Paschwitz-Preis



Am 23. März 2015 wurde **Dr. Rongjiang Wang**, GFZ-Sektion „Erdbeben- und Vulkanphysik“, mit dem Ernst von Rebeur-Paschwitz-Preis der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG) geehrt. Auf der 75. Jahrestagung der DGG überreichte der scheidende DGG-Präsident Prof. Michael Korn Herrn Wang den Preis, mit dem dessen herausragende wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der Geophysik gewürdigt wurden. ■

## GFZ stellt neue IAGA-Vizepräsidentin und neuen IAG-Präsidenten



**Prof. Harald Schuh**, Direktor des GFZ-Departments „Geodäsie und Fernerkundung“, wurde zum 1. Juli 2015 neuer Präsident der International Association of Geodesy (IAG). Zudem wurde **Dr. Monika Korte**, GFZ-Sektion „Erdmagnetfeld“, auf der Jahrestagung der International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) vom 22. Juni bis 2. Juli 2015 in Prag, Tschechien, zur Vize-Präsidentin der International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) gewählt und **Dr. Ute Weckmann**, GFZ-Sektion „Geophysikalische Tiefenson-dierung“, zur stellvertretenden Vorsitzenden der neuen IAGA Division VI ernannt.

IAG und IAGA sind zwei der acht Gesellschaften innerhalb der IUGG. Die Ursprünge beider Gesellschaften gehen zurück bis ins 19. Jahrhundert. Die IAG befasst sich mit Wissenschaft und Forschung im Bereich der Geodäsie, hier insbesondere mit dem Erdschwerefeld, der Erdrotation und den sogenannten

geodätischen Weltraumverfahren; die IAGA mit Geomagnetismus und Aeronomie, aber auch mit der Erforschung des Erdmagnetfelds, der Magnetosphäre, des Sonnenwinds oder der elektromagnetischen Sondierung.

Die allgemein als Vorgängereinrichtung der IAG anerkannte „Europäische Gradmessung“ wurde von General Johan Jacob Baeyer begründet. Sein Nachfolger und Gründer des Geodätischen Instituts in Potsdam, Friedrich Robert Helmert, gilt wegen seiner in Potsdam geleisteten wissenschaftlichen Arbeit als „Vater der geodätischen Wissenschaft“. Helmert weitete den internationalen Verbund von Potsdam in eine „Internationale Erdmessung“ aus. Mit der Wahl von Prof. Schuh werden zudem Aufgaben des IAG-Office an das GFZ transferiert – die IAG kehrt an ihren Entstehungsort Potsdam zurück.

Harald Schuh, der neben seiner Präsidenschaft Mitglied des IUGG-Exekutivkomitees ist, wird sich künftig neuen Aufgaben in Gremien der IUGG und anderen Wissenschaftsorganisationen sowie bei den Vereinten Nationen (UN) widmen. Am 26. Februar 2015 wurde von der Generalversammlung der UN die erste Resolution, die sich mit Geodäsie beschäftigt, verabschiedet (Resolution Nr. A/RES/69/266), was zufällig mit der Wahl von Herrn Schuh zusammenfällt.

Zu den zukünftigen Aufgaben von Monika Korte als neuer IAGA-Vizepräsidentin zählen die Koordination von Symposien und Workshops, die Ausarbeitung der IAGA-Richtlinien sowie die Interessensvertretung der Mitglieder und des Forschungsbereichs der IAGA innerhalb der internationalen Wissenschaftslandschaft.

Bereits im Sommer 2014 wurde Ute Weckmann auf dem 22. EM Induction Workshop in Weimar zur stellvertretenden Vorsitzenden der Working Group I.2 der IAGA Division I gewählt. Nun ist diese Working Group mit rund 1400 Mitgliedern als eigenständige Division hochgestuft worden. ■

## Long Service-Medaille der IAGA für Hans-Joachim Linthe

**Dr. Hans-Joachim Linthe**, der im Dezember 2014 in Ruhestand getretene Technische und stellvertretende Leiter des zum GFZ gehörenden Adolf-Schmidt-Observatoriums für Erdmagnetismus in Niemege, Brandenburg, ist zusammen mit dem britischen Erdmagnetiker John Riddick von der International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) mit dem „Long Service Award“ ausgezeichnet worden. Die zur Ehrung gehörende Medaille wurde Dr. Linthe am 28. Juni 2015 während der Generalversammlung der International Union of Geophysics and Geodesy (IUGG) in Prag, Tschechien, überreicht. ■

## Dirk Wagner in Beirat „Umwelt“ der BAM berufen

**Prof. Dirk Wagner**, Leiter der Sektion „Geomikrobiologie“ am GFZ, wurde im Juni 2015 in den Wissenschaftlichen Beirat „Umwelt“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) berufen und bringt dort seine Expertise in den Bereichen Geomikrobiologie und Geo-Bio-Interaktionen ein. Dabei wird er die BAM bei ihrer Schwerpunktsetzung in der Forschung im Themenbereich „Umwelt“ beraten sowie Kontakte und Kooperationen zu anderen Forschungseinrichtungen in diesem Themenbereich fördern. ■

## Jens Kallmeyer ist Distinguished Lecturer

Für seine Forschung auf dem Gebiet der tiefen Biosphäre wurde **Dr. Jens Kallmeyer**, GFZ-Sektion „Geomikrobiologie“, vom European Consortium for Ocean Research Drilling (ECORD) zum Distinguished Lecturer ernannt. Die Ernennung erfolgt für zwei Jahre und beinhaltet eine Reihe von öffentlichen Vorträgen in Forschungseinrichtungen der ECORD-Mitgliedsländer. ■

## Dan Harlov erhält Best Guest Editor Award

**Prof. Daniel Harlov**, GFZ-Sektion „Chemie und Physik der Geomaterialien“, erhielt für seinen Beitrag „The role of fluids in the lower crust and upper mantle:

A tribute to Jacques Touret“ den 2014 Geoscience Frontiers Best Guest Editor Award der Zeitschrift Geoscientific Frontiers. Der Beitrag erschien in Vol. 5, Issue 5, im November 2014.

Zudem ist Daniel Harlov Mitherausgeber der im Juni 2015 erschienenen Ausgabe „Apatite: A Mineral for All Seasons“ von Elements magazine, der gemeinsamen Zeitschrift zahlreicher mineralogischer und geochemischer Gesellschaften in Europa, Nordamerika und Japan. ■

## Auszeichnungen für drei Doktoranden

Die Doktorandin **Jacqueline Salzer**, GFZ-Sektion „Erdbeben- und Vulkanphysik“, erhielt die Auszeichnung „Outstanding student paper award“ auf dem Herbsttreffen der American Geophysical Union (AGU) 2014 in San Francisco, USA, im Bereich „Volcanology, Geochemistry and Petrology“.

Auf dem Treffen der European Geosciences Union (EGU) im April 2015 in Wien wurden die Doktoranden **Christopher Otto**, GFZ-Sektion „Hydrogeologie“, und **Janek Dreibrodt**, GFZ-Sektion „Hydrologie“, mit dem „Outstanding student poster award“ in den Bereichen „Energy, Resources and the Environment“ bzw. „Hydrological Sciences“ geehrt. ■

## Claudio Faccenna: Humboldt-Preisträger Gast am GFZ

Der Humboldt-Preisträger **Prof. Claudio Faccenna**, Università degli studi Roma Tre, Italien, ist bei Prof. Onno Oncken, GFZ-Sektion „Dynamik der Lithosphäre“, Gast für einen Studienaufenthalt. Claudio Faccenna hat den angesehenen Alexander von Humboldt-Forschungspreis 2015 der Humboldt-Stiftung als einer der international führenden Wissenschaftler auf dem Gebiet der Geodynamik mit einem Schwerpunkt auf der aktiven Tektonik erhalten. ■



**Alexander von Humboldt**  
Stiftung/Foundation



# Bücher und Medien

## Forschungsfeld Naturgefahren

P. Becker, R. F. Hüttl (Eds.)  
Offenbach, Potsdam: DWD/GFZ,  
2014, 108 S.  
ISBN: 978-3-88148-475-6



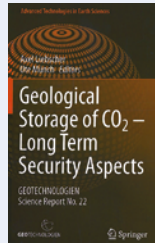
### Über dieses Buch schreiben die Herausgeber:

Naturgefahren werden in erster Linie als Risiken gesehen, die vom Menschen nicht verursacht oder be-

einflusst werden können. Diese Einschätzung trifft aber nicht durchgängig zu. So spielen bei Überschwemmungen, Dürren und den Auswirkungen des Klimawandels menschliche Aktivitäten oft eine entscheidende Rolle. Das betrifft zum Beispiel die Einflüsse hydrogeologischer Veränderungen durch Flussregulierungen und Eindeichungen oder Veränderungen durch intensive Landnutzungsmaßnahmen wie Waldrodungen oder Überweidungen. Ein weiteres Beispiel sind die nach wie vor global ungebremsten Emissionen von Treibhausgasen. Der Mensch treibt damit unmittelbar Veränderungen des Klimas und seiner Lebensbedingungen an, die zu schwerwiegenden Folgen führen können. Solche Auswirkungen von Naturgefahren können für den Einzelnen zwar katastrophal sein, in der Regel werden sie von der Gesellschaft aber erst dann als „Naturkatastrophe“ wahrgenommen, wenn ein bestimmtes Ausmaß an Opfern oder volkswirtschaftlichem Schaden überschritten wird. ■

## Geological Storage of CO<sub>2</sub> – Long Term Security Aspects

A. Liebscher, U. Münch (Eds.)  
Springer, Berlin, 2015, 245 S.  
ISBN: 978-3-319-13929-6



### Über dieses Buch schreibt der Verlag:

This book explores the industrial use of secure, permanent storage technologies for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), especially geological CO<sub>2</sub> storage.

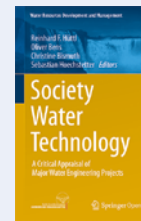
Readers are invited to discover how this greenhouse gas could be spared from permanent release into the atmosphere through storage in deep rock formations. Themes explored here include CO<sub>2</sub> reservoir management, caprock formation, bio-chemical processes and fluid migration. Particular attention is given to groundwater protection, the improvement of sensor technology, borehole seals and cement quality.

A collaborative work by scientists and industrial partners, this volume presents original research, it investigates several aspects of innovative technologies for medium-term use and it includes a detailed risk analysis.

Coal-based power generation, energy consuming industrial processes (such as steel and cement) and the burning of biomass all result in carbon dioxide. Those involved in such industries who are considering geological storage of CO<sub>2</sub>, as well as earth scientists and engineers will value this book and the innovative monitoring methods described. Researchers in the field of computer imaging and pattern recognition will also find something of interest in these chapters. ■

## Society – Water – Technology A Critical Appraisal of Major Water Engineering Projects

Reihe: Water Resources Development  
and Management  
R. F. Hüttl, O. Bens, C. Bismuth,  
S. Hoehstetter (Eds.)  
Springer, 2015, 305 S.  
ISBN 978-3-319-18970-3



### Über das Buch schreibt der Verlag:

This book presents the results of the Interdisciplinary Research Group “Society – Water – Technology” of the Berlin-

Brandenburg Academy of Sciences and Humanities. It describes interdisciplinary evaluation criteria for major water engineering projects (MWEs) and portrays an application to the Lower Jordan Valley (Middle East) and the Fergana Valley (Central Asia). Both areas are characterised by transboundary conflicts, by challenges due to demographic and climate change, and by political and societal pressures. Based on the findings, the book provides recommendations for science and political decisions makers as well as for international financing institutions. In addition, it outlines research gaps from an interdisciplinary perspective.

In the past, MWEs have been used as an instrument to cope with the demands of growing populations and to enhance development progress. Experiences with MWEs have shown that a purely technical approach has not always brought about the desired results. In many cases, MWEs have even resulted in negative implications for society and environment. Therefore, improved management strategies and enhanced technologies for a sustainable water resource management

system are a prerequisite to meet present and future challenges. And, moreover, the continuous evaluation and optimisation of these measures is, likewise, a must. ■

## Microbial Evolution under Extreme Conditions

Reihe: Life in Extreme Environments

C. Bakermans (Ed.)

De Gruyter, 2015, 276 S.

ISBN: 978-3-11-034071-6



### Über das Buch schreibt der Verlag:

This book explores the current state of knowledge about microbial evolution under extreme conditions and addresses the following questions: What is known about the processes of microbial evolution (mechanisms, rates, etc.) under extreme conditions? Can this knowledge be applied to other systems and what is the broader relevance? What remains unknown and requires future research? These questions will be addressed from several perspectives including different extreme environments, specific organisms, and specific evolutionary processes. ■

## Geofluids

Developments in Microthermometry, Spectroscopy, Thermodynamics, and Stable Isotopes

V. Hurai, M. Huraiová, M. Slobodník,

R. Thomas Elsevier, 2015, 504 S.

ISBN: 9780128032411



### Über das Buch schreibt der Verlag:

*Geofluids: Developments in Microthermometry, Spectroscopy, Thermodynamics, and Stable Isotopes* is the definitive

source on paleofluids and the migration of hydrocarbons in sedimentary basins - ideal for researchers in oil and gas exploration.

There's been a rapid development of new non-destructive analytical methods and interdisciplinary research that makes it difficult to find a single source of content on the subject of geofluids. Geoscience researchers commonly use multiple tools to interpret geologic problems, particularly if the problems involve fluid-rock interaction. This book perfectly combines the techniques of fluid inclusion microthermometry, stable isotope analyses, and various types of spectroscopy, including Raman analysis, to contribute to a thorough approach to research. Through a practical and intuitive step-by-step approach, the authors explain sample preparation, measurements, and the interpretation and analysis of data related to thermodynamics and mineral-fluid equilibria. ■

## Earthquake Model Central Asia: seismic hazard and risk assessment in Central Asia

S. Parolai, J. Zschau, U. Begaliev (Eds.)

Sonderausgabe *Annals of Geophysics*, 2015, Vol. 58, Nr. 1

ISSN: 2037-416X



### Über dieses Heft:

Das jüngste starke Erdbeben in Nepal gibt der Sonderausgabe der Zeitschrift *Annals of Geophysics* mit dem Titel "Earthquake Model Central Asia: seismic hazard and risk assessment in Central Asia" besonderes Gewicht. Die Herausgeber Stefano Parolai und Jochen Zschau, beide GFZ, und Ulugbek Begaliev vom INTUIT in Kirgisistan, stellen die Ergebnisse der langjährigen Forschungsaktivitäten des GFZ zu Erdbebengefährdung und Risiko-

bewertung in Zentralasien sowie neueste Forschungsergebnisse aus dieser Region zusammen.

Schwerpunkt der Ausgabe ist das Erdbebenmodell EMCA (Earthquake Model Central Asia), zur Bestimmung der Erdbebengefährdung in Zentralasien, ein vom GFZ koordiniertes Programm. Weitere Themen sind Wahrscheinlichkeiten seismischer Gefährdung, Standorteffekte sowie Gefahren- und Verwundbarkeitsmodelle für Zentralasien. Mehrere Publikationen der Ausgabe befassen sich außerdem mit dem Stand der Forschung 15 Jahre nach der GSHAP-Initiative (Global Seismic Hazard Assessment Program), in deren Rahmen erstmals eine global vergleichbare Karte zur Erdbebengefährdung erstellt wurde.

Die schwere Erdbebenkatastrophe in Nepal verdeutlicht die Bedeutung der Erforschung der Erdbebengefährdung in Regionen mit hoher seismischer Aktivität. ■

## ICDP Science Plan – Weißbuch Wissenschaftliches Bohren



Wissenschaftliches Bohren ist ein unverzichtbares Werkzeug der Geowissenschaften (vgl. *System Erde*. GFZ-Journal, 2014, Heft 1). Das Internationale Wissenschaftliche

Bohrprogramm ICDP (International Continental Scientific Drilling Program) hat nun ein Weißbuch vorgelegt, das aktuelle wissenschaftliche und technische Herausforderungen zusammenfasst.

Der Band „Unravelling The Workings Of Planet Earth – Science Plan for 2014-2019“ stellt vor allem die gesellschaftlichen Aufgaben in den Vordergrund, für die wissenschaftliche Bohrungen auf Kontinenten dienlich sind. Dazu gehört die Erforschung der Verfügbarkeit von (Trink-) Wasser, Vorsorge vor Naturkatastrophen,

Erkundung von Veränderungen des Klimas und der Umwelt sowie von Energie und Rohstoffquellen. Das Dokument dient einerseits als Richtungsweiser für Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler weltweit und andererseits als Vermittlungsgrundlage für nationale Förderinstitutionen, um das aktuelle Konzept der Mischfinanzierung für Bohrprojekte weiterhin erfolgreich umsetzen zu können.

Das ICDP ist eine infrastrukturelle Einrichtung für wissenschaftliches Bohren und fördert weltweit herausragende Projekte der Geowissenschaften. Das Programm ist auf Initiative des GFZ 1996 gegründet worden und wird seither am GFZ koordiniert und operativ unterstützt. Am ICDP sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und Mitglieder aus 24 Nationen beteiligt. Mehr als 34 Projekte und 62 vorbereitende Workshops wurden bisher mit großem Erfolg durchgeführt. ■

Das Weißbuch steht zum Download unter [www.icdp-online.org](http://www.icdp-online.org) zur Verfügung und ist in gedruckter Form in den ICDP-Büros erhältlich.

## Einstieg ins Forschungsdatenmanagement in den Geowissenschaften – EWIG



Im Rahmen des DFG-Projekts EWIG beschäftigten sich die Partner Institut für Meteorologie der FU Berlin, Zuse Institut Berlin und GFZ mit dem Thema Forschungsdaten unter dem Aspekt, wie diese als Ergebnisse der Forschung langfristig erhalten werden können. Neben technischen Herangehensweisen lag ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit darauf, dass die Sicherung der nachhaltigen Zugänglichkeit von Forschungsergebnissen als Teil des Forschungsprozesses verstanden werden und zukünftig bereits in die universitäre Ausbildung einfließen sollte. Die Vermittlung von Kenntnissen zum Forschungs-

datenmanagement an Studierende, Postgraduierte und auch erfahrene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ist aus Sicht der Projektpartner in Deutschland noch vergleichsweise wenig verbreitet. Die Nutzung von Forschungsergebnissen muss schon zu Beginn der Forschungsarbeit mitbedacht werden. Wenn erst gegen Ende der Arbeiten über eine geeignete Struktur der Archivierung oder Publikation nachgedacht wird, ist dies in der Regel zu spät.

Ein wesentliches Ergebnis des EWIG-Projekts liegt in Form einer kurzen, kompakten Handreichung für Studierende, Lehrende und Forscher in den Geowissenschaften vor. Die Broschüre „Einstieg ins Forschungsdatenmanagement in den Geowissenschaften“ soll den Zugang ebnet und einen ersten Vermittlungsansatz zu Methoden und Werkzeugen des Datenmanagements bieten. Auf 24 Seiten werden darin kurz und knapp grundsätzliche Fragen des Umgangs mit Forschungsdaten vorgestellt. ■

Unter <http://doi.org/10.2312/lis.14.01> steht die Broschüre zur Nachnutzung zur Verfügung. Eine gedruckte Auflage wurde an geowissenschaftliche Institutionen in Deutschland versendet. Restexemplare sind über die Bibliothek ([bib@gfz-potsdam.de](mailto:bib@gfz-potsdam.de)) erhältlich.

## System Erde. GFZ-Journal (2015) Jahrgang 5, Heft 1 [systemerde.gfz-potsdam.de](http://systemerde.gfz-potsdam.de)

### Die tiefe Biosphäre

*Jens Kallmeyer* 6-11

### Nahrungsgrundlage für eine tiefe Biosphäre

*Kai Mangelsdorf* 12-17

### Molekulare Indikatoren für die Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe der Erde

*Dirk Sachse* 18-21

### Mehr Moor?

Zur Treibhausgasdynamik wiedervernässter Feuchtgebiete

*Torsten Sachs, Franziska Koebsch, Daniela Franz, Eric Larmanou, Andrei Serafimovich, Katrin Kohnert, Gerald Jurasinski, Jürgen Augustin* 22-27

### Mikrobiologische Prozesse in CO<sub>2</sub>-Aufstiegskanälen

*Mashal Alawi, Tobias Nickschick, Horst Kämpf* 28-33

### Die Wechselwirkungen zwischen Biosphäre und Gashydraten

*Manja Luzi-Helbing, Kai Mangelsdorf, Dirk Wagner, Judith M. Schicks* 34-39

### Astrobiologie – dem Leben im Universum auf der Spur

*Dirk Wagner, Jean-Pierre de Vera, Jasmin Joshi, Thomas Leya, Dirk Schulze-Makuch* 40-47

