

# System Erde

GFZ-Journal

**GFZ**

Helmholtz-Zentrum  
**POTS DAM**

2014 – Heft 1

SCHWERPUNKT

## Wissenschaftliches Bohren





## Titelbild

Der vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ betriebene Pilotstandort Ketzin zur geologischen Speicherung von CO<sub>2</sub> liegt etwa 22 km nordwestlich von Potsdam.

Auf dem Foto ist im Hintergrund der Bohrturm der im Jahr 2012 abgeteuften Beobachtungsbohrung „CO<sub>2</sub> Ktzi 203“ zu sehen. Die beiden Tanks und die Wärmetauscher im Vordergrund sind Teil der CO<sub>2</sub>-Injektionsanlage. Ktzi 203 wurde ohne technische Schwierigkeiten durch den nach vier Jahren Injektionsbetrieb mit CO<sub>2</sub>-gefüllten Speicher gebohrt. Das Hauptziel der Bohrung war die Gewinnung von Gesteinsproben aus Bohrkernen, die während dieser Zeit dem verpressten CO<sub>2</sub> ausgesetzt waren, um mögliche Einflüsse auf das Gestein zu untersuchen. Es konnte so auch nachgewiesen werden, dass kein CO<sub>2</sub> in das Deckgebirge eingedrungen ist. (Foto: Andreas Jurczyk, GFZ)

## Impressum

### Herausgeber:

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

Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

### Redaktion:

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

### Layout:

UNICOM Werbeagentur GmbH  
Grit Schwalbe, GFZ

### Druck:

Druckerei Arnold, Großbeeren

© Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ 2014  
ISSN 2191-8589



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

# Editorial

## Wissenschaftliches Bohren – ein Universalwerkzeug der Geoforschung



Die Plattentektonik erweist sich heute als die geowissenschaftliche Generaltheorie. Es wird dabei leicht übersehen, dass die ersten grundlegenden Ideen von Alfred Wegener durch die Ergebnisse wissenschaftlicher Bohrungen auf den Ozeanen wesentlich weiterentwickelt werden konnten: in den gewonnenen Bohrkernen der 1960er Jahre zeigte sich, dass die Ozeanböden entschieden jünger waren, als Wegener annahm. Zudem wurde klar, dass das Alter der Ozeanbodenbasalte mit der Entfernung von den mittelozeanischen Rücken zunimmt und dass zudem sich die Magnetisierungsrichtung der Gesteine beiderseits der Ozeanrücken in parallelen Streifen ändert. Als Ergebnis

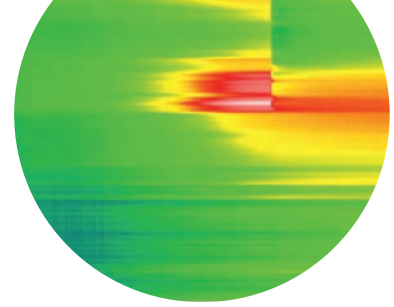
der Interpretation dieser Resultate aus Bohrungen ergab sich letztlich die Umstellung des Konzepts der Kontinentaldrift auf die Plattentektonik.

Auch heute noch ist wissenschaftliches Bohren zum Verständnis des Systems Erde unverzichtbar. Aber auch die Nutzung des unterirdischen Raums ist ohne Bohren nicht möglich, Geothermie, geologische Speicherung und die Nutzung von Erdöl und -gas sind offensichtliche Belege dafür. Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ hat seit seiner Gründung wissenschaftliches Bohren als Instrument genutzt. Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik, kurz KTB, mit seinen 4000 und 9101 Meter tiefen Bohrlöchern ist eine der Wurzeln des GFZ. Mit den aus der KTB gewonnenen Erfahrungen organisierte das GFZ im Sommer 1993 eine Konferenz zur Gründung eines internationalen Programms für wissenschaftliche Landbohrungen. Die Themenvielfalt reichte von der Erforschung der Erdgeschichte über Vulkanismus und Geodynamik bis hin zur Klimaforschung. Dieses „Scientific Rationale for Establishment of an International Program of Continental Scientific Drilling“ war die Basis für das “International Continental Scientific Drilling Program” (ICDP), das auf wesentliche Initiative des GFZ 1996 in Tokio von den Gründernationen Deutschland, USA und China aufgestellt wurde. Ziel des ICDP war, als komplementäres Gegenstück zu den Ozeanbohrprogrammen die Kontinente zu erforschen: kein Ozeanboden ist älter als 200 Millionen Jahre, was verglichen zu 4,6 Milliarden Jahren Erdgeschichte eine sehr kurze Zeitspanne ist. Die Kontinente sind älter und komplizierter als die Ozeanböden und stellen mehr Fragen, sie bieten aber auch mehr Antworten.

Bis heute spielt das GFZ eine zentrale Rolle im ICDP. So ist beispielsweise die für zentrale operationelle Fragen des ICDP zuständige Operational Support Group (OSG) am GFZ angesiedelt. Die inzwischen weltweit über 30 durchgeführten Bohrprojekte zu den unterschiedlichsten Themenkomplexen untermauern die große internationale Bedeutung des ICDP-Konzepts. Aber auch im Alltagsbetrieb des GFZ sind Bohrungen Teil des Forschungsprogramms. Bohrlöcher in der Nähe der Nordanatolischen Verwerfung dienen im GONAF-Projekt (Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault Zone) zur Erforschung und Überwachung des seismischen Risikos faktisch vor den Toren Istanbuls. Bohrungen in Binnenseen geben Aufschluss über das Klima der Vergangenheit. Die Bohrlöcher des Geothermie-Forschungsstandorts Groß Schönebeck und das Ensemble von fünf Bohrungen zur Erforschung der geologischen Speicherung in Ketzin sind integraler Bestandteil der Arbeiten in den GFZ-Technologietransfer-Zentren. Wissenschaftliche Bohrungen sind ein Universalwerkzeug der Geowissenschaften, selbstverständlich auch am GFZ.

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

Dr. Stefan Schwartz  
Administrativer Vorstand



# Inhalt

**6** Bohrungen:  
Ein Instrument der Wissenschaft  
*Ulrich Harms*

**14** Langzeitüberwachung von Erdbeben-  
zonen durch den Einsatz von Bohr-  
lochseismometern  
*Marco Bohnhoff, Christina Raub, Fatih Bulut,  
Bernhard Prevedel, Georg Dresen, Peter E. Malin*

**22** In Teufels Küche – Bohrungen  
ins Innere von Vulkanen  
*Thomas Wiersberg, Samuel Niedermann,  
Martin Zimmer*

**30** Hydraulische Stimulationskonzepte zur  
Entwicklung von Enhanced Geothermal  
Systems (EGS)  
*Günter Zimmermann, Guido Blöcher, Andreas  
Reinicke, Fiorenza Deon, Simona Regenspurg,  
Jeoung Seok Yoon, Arno Zang, Oliver Heidbach,  
Inga Moeck, Ernst Huenges*

**36** Überwachung der Bohrungsintegrität –  
Voraussetzung für die sichere und effi-  
ziente Nutzung geothermischer Energie  
*Thomas Reinsch und Jan Henniges*

## **70** Netzwerk

70 Bohren ganz praktisch

71 Asymmetrische Kontinentränder und die  
lange Geburt eines Ozeans

72 Neues Patent zur Energiespeicherung im  
geologischen Untergrund

73 Seismische Lücke in Chile

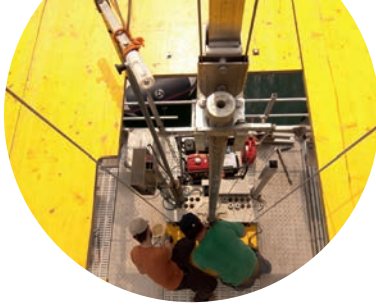
74 Biologische Prozesse formen Landschaft

74 Wasserkreislauf verstärkt  
plötzlichen Klimawandel

75 GRACE Follow-On

76 Die Topographie des Mittelmeeres –  
GPS-Reflektionsmessungen mit HALO

77 Globaler Wandel im Satellitenblick



42

### Intelligente Bohrungen zur Exploration, Standortcharakterisierung und Speicherüberwachung

*Axel Liebscher, Jan Henniges, Stefan Lüth, Sonja Martens, Fabian Möller, Bernhard Prevedel, Cornelia Schmidt-Hattenberger*

48

### Mit großem Bohrer auf der Jagd nach den kleinsten Lebewesen – wissenschaftliches Bohren für geomikrobiologische Forschung

*Jens Kallmeyer*

54

### Probengewinnung in Lockersedimenten

*Ulrich Harms, Jens Mingram, Brian Brademann*

60

### Untertageexploration – Instrumente und Methodenentwicklung

*Rüdiger Giese und Jochem Kück*

66

### InnovaRig – ein wissenschaftliches Labor für die Tiefbohrtechnik

*Bernhard Prevedel*

77 Eröffnung eines neuen geomagnetischen Observatoriums auf der Insel Lombok, Indonesien

77 Vulkane abseits ihrer Magmaquellen

78 Neue Informationsplattform zu Erde und Umwelt

79 Internationale Zusammenarbeit

81 **Ausgezeichnet**

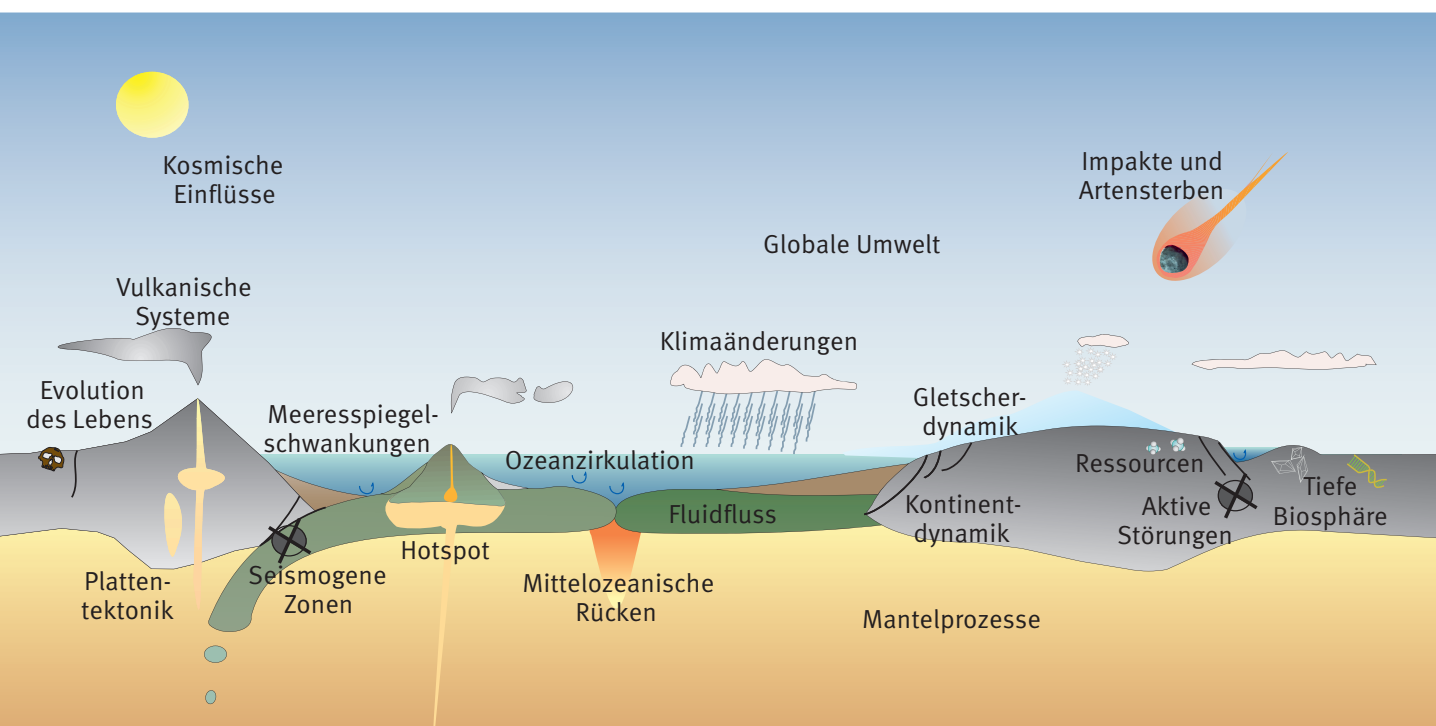
84 **Bücher**

# Bohrungen: Ein Instrument der Wissenschaft

Ulrich Harms

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*In geosciences deep sampling of Earth's continental crust and observations at depth are essential tools to gain new insight. Drilling, coring and instrumentation of boreholes serve to better understand the environmental and climate evolution of our planet, to shed light on the physical and chemical conditions leading to natural disasters and to search for novel, sustainable resources. Research programs such as the German KTB have utilized the instrument drilling successfully in order to address such goals. During the past decades the high costs of drilling as well as wide-ranging research topics led to the formation of international scientific drilling programs. Based on international cost sharing they address project-wise globally important overarching issues with comprehensive research teams. The ocean drilling programs established the understanding of plate tectonics and the change of global climates. Coordinated by the GFZ, the International Continental Scientific Drilling Program, ICDP has with to date 30 research projects provided new understanding of the complex System Earth especially through lake sediment, fault zone and volcano drilling.*



Skizze der zentralen geowissenschaftlichen Themen, bei denen Forschungsbohrungen eingesetzt werden (nach Harms und Tobin, 2011)

Sketch of critical themes addressed through scientific drilling projects

Unser Verständnis vom Aufbau der Erde und von den Prozessen im Erdinneren beruht im wesentlichen auf Materialproben und Messdaten von der Erdoberfläche, geophysikalischen Untersuchungen des Untergrunds sowie Laborexperimenten und Modellierungen. Neben diesen geophysikalischen und computergestützten Methoden sind die Geowissenschaften auch auf eine direkte Beobachtung dynamischer Vorgänge in der Erde und die Gewinnung von Proben aus der Tiefe angewiesen. Dazu eignen sich in vielen Fällen wissenschaftliche Bohrungen, mit denen Bohrkerne aus der Tiefe gewonnen werden können sowie Messungen der Zustände und Änderungen im Gesteinsverband aufgezeichnet werden können.

Ergebnisse dieser Forschungsbohrungen tragen zur Lösung wesentlicher Fragen von gesellschaftlichem Belang bei, wie beispielsweise zum Verständnis der Vorgänge, die zu Naturkatastrophen wie Erdbeben, Vulkanausbrüche oder Meteoriteneinschläge führen. Aus Bohrkernen können auch Daten zur Umwelt- und Klimaentwicklung über geologische Zeiträume gewonnen werden, die dazu beitragen, gegenwärtige und zukünftige Entwicklungen zu verstehen. Ebenso können Vorkommen und Bildungsbedingungen natürlicher Ressourcen wie Wasser und mineralische und energetische Rohstoffe mit Forschungsbohrungen untersucht werden. Dies trägt zur nachhaltigen Nutzung dieser Ressourcen bei.

Aufgrund der internationalen Bedeutung der zu lösenden Fragen sowie andererseits der hohen Kosten von Bohrungen wurden internationale wissenschaftliche Bohrprogramme aufgebaut. Mit ihnen werden globale geowissenschaftliche Aufgaben gemeinschaftlich in fachlich weit aufgestellten Forschungsteams gelöst. Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ spielt dabei eine zentrale Rolle als federführende Institution des Internationalen kontinentalen Wissenschaftlichen Bohrprogramms, ICDP (<http://www.icdp-online.org>).

## Tiefe Bohrungen

Die weltweit erste Tiefbohrung liegt etwa 50 km südlich von Potsdam, in Sperenberg. Mit 1271 m Endteufe war die Bohrung von 1871 bis 1886 das tiefste Bohrloch. Obwohl die Bohrung der kommerziellen Erkundung des Gipshuts und des darunter liegenden Salzstocks diente, erreichte sie große wissenschaftliche Bedeutung. Erstmals konnte die geothermische Tiefenstufe gemessen werden. Der Wert von 3 °C Temperaturzunahme pro 100 m Tiefe blieb für Jahrzehnte der Referenzwert. Die Suche nach Erdöl aus immer tieferen Schichten trieb in den folgenden Jahrzehnten eine bohrtechnische Entwick-

lung an, die dazu führte, dass heutzutage bis zu 7000 m tiefe Bohrungen Standard sind.

Das tiefste jemals gebohrte Loch ist die 12 261 m tiefe Bohrung Kola SG-3 im Nordwesten Russlands, nahe der norwegischen Grenze (Abb. 1). Sie wurde bereits von 1970 bis 1998 niedergebracht und diente vor allem wissenschaftlichen Zielen, wie der Erforschung der Erzvorkommen der Region und des Aufbaus der sehr alten Erdkruste der Kolahalbinsel. Die Bohrung durchörterte ein gering deformiertes Becken aus metamorphen vulkanischen und sedimentären, altproterozoischen Abfolgen und stieß darunter tief ins archaische Grundgebirge vor. Die geringe Temperaturzunahme auf weniger als 200 °C in 12 km Tiefe war eine wichtige Voraussetzung zum Erreichen dieser Tiefe. Eine der bis heute bedeutendsten Entdeckungen war das Vorkommen von Tiefenwässern in offenen Kluftsystemen bis in 12 km Tiefe. Auch technisch betrat das Vorhaben Neuland: unter anderem wurde ein spezieller Bohrstrang aus Aluminium entwickelt, der auf Grund des geringen Gewichts das Tiefenziel erreichbar machte. Ebenso bedeutsam war die Nutzung spülungsgetriebener Untertagemotoren mit Doppelturbinen, um die Bohrung möglichst vertikal zu halten und kontinuierlich Bohrkerne zu gewinnen. Obwohl die Bohrung auf der Kolahalbinsel inzwischen zementiert, verschlossen und aufgegeben ist, blieb der Tiefenrekord bestehen. Zwar gibt es heute Erdöl- und Erdgasbohrungen, z. B. in Katar und auf Sachalin, die als „tiefer“ gelten, dabei handelt es sich aber um abgelenkte Bohrungen, in denen weite Teile der Bohrstrecke horizontal und nicht in die Tiefe geführt wurden (siehe Infografik „Wie tief kann man bohren?“, S. 12).



Abb. 1: Bohrturm und Feldlabor der Forschungsbohrung Kola SG-3 im Jahr 2000 (Foto: U. Harms, GFZ)

Fig. 1: Drillrig and field laboratory building at the research well Kola SG-3 in 2000



Kontakt: U. Harms  
([ulrich.harms@gfz-potsdam.de](mailto:ulrich.harms@gfz-potsdam.de))

## Forschungsbohrprogramme

Die Kola-Bohrung war in ein sowjetisches Forschungsprogramm zur Tiefenerkundung integriert. Angespornt vom Wettlauf der Supermächte im All hatte die ehemalige UdSSR die amerikanische Idee, die Grenze zwischen Erdkruste und Erdmantel (Mohorovičić-Diskontinuität) zu erbohren, mit einer Landbohrung aufgenommen. Sie wollte so die USA übertreffen, deren große marine Forschungsbohrung zur Erkundung des Erdmantels im Pazifik vor der mexikanischen Küste 1966 nach fünf Jahren eingestellt wurde, nachdem aufgrund technischer Probleme nur 183m Tiefe erreicht wurden. Allerdings hatte das MOHOLE genannte amerikanische Projekt gezeigt, dass aus mehreren Tausend Metern Wassertiefe erfolgreich Proben von Sedimenten und der basaltischen Ozeankruste vom Boden des Ozeans gewonnen werden können. Dies war nicht nur ein Meilenstein für die Offshore-Erdölgewinnung, sondern auch der Startschuss des 1968 begonnenen, marinen Forschungsbohrprogramms Deep Sea Drilling Project. Bis heute werden die marinen Geowissenschaften von dessen Nachfolgeprogrammen, wie dem jetzigen International Ocean Discovery Program IODP (Anonymous, 2011; Abb. 2), wesentlich vorangebracht. Durch die Forschung an Ozeanbohrkernen konnte unter anderem nachgewiesen werden, dass die kontinuierliche Neubildung ozeanischer, basaltischer Kruste an mittelozeanischen Rücken den Ozeanboden auseinandertreibt, so dass er zu den Rändern hin immer älter wird. Alfred Wegeners Hypothese der Kontinentaldrift wurde mittels dieser Bohrungen bestätigt, was das heutige geologische Weltbild der dynamischen Erde etablierte. Für die Klimaforschung lieferten Bohrkerne aus Sedimenten der Weltmeere die entscheidenden Eckdaten, weil marine Ablage-

rungen kontinuierlich über die vergangenen 150 Mio. Jahre z. B. die Wassertemperaturen aufgezeichnet haben. Dieses fossile Thermometer hilft die Steuermechanismen der Meeresströmungen und das globale Klima besser zu verstehen. Auch die Geschichte von Meeresspiegelschwankungen oder die Historie von Vergletscherungen in den polaren Regionen wurden durch marine Bohrungen rekonstruiert. Außerdem konnten im Rahmen der Ozeanbohrprogramme die großen Stoffkreisläufe, wie der des Kohlenstoffs, besser erklärt und die wenig bekannte tiefe Biosphäre, d. h. die bis in viele hundert Meter in die Tiefe reichende bakterielle und virale Besiedlung der Porenräume des Ozeanbodens, erforscht werden (vgl. Artikel von Kallmeyer in diesem Heft).

## Kontinentales Tiefbohrprogramm

Inspiziert von den erfolgreichen Gemeinschaftsunternehmen der Ozeanbohrungen wurde in Deutschland seit Ende der 1970er Jahre ein geowissenschaftliches Grundlagenprogramm (Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB) geplant. Nach ausführlicher Vorerkundung inklusive seismischer Profile wurde 1987 mit einer 4 km tiefen Pilotbohrung in der bayerischen Oberpfalz begonnen. Nahe der tschechischen Grenze bei Windischeschenbach wurde dabei die Nahtstelle zweier großer tektonischer Einheiten untersucht, dem Moldanubikum im Süden und dem Saxothuringikum im Norden. Bei der variszischen Gebirgsbildung vor 330 Mio. Jahren schienen hier Mikrokontinente übereinander verschoben



Abb. 2: Verschraubung von Bohrgestänge auf dem japanischen Forschungsbohrschiff CHIKYU (Foto: T. Wiersberg, GFZ)

Fig. 2: Drill pipe connection on the Japanese research drill vessel CHIKYU





Abb. 3: Luftaufnahme des KTB-Bohrplatzes (Foto: F. Holzförster, GeoZentrum an der KTB)

Fig. 3: Aerial photo of the present day KTB drill site

und verschweißt worden zu sein. Ungewöhnliche geophysikalische Strukturen der tiefen Kruste waren hier erbohrbar bei relativ geringer Temperaturzunahme mit der Tiefe. Zudem konnten die Spannungsverhältnisse und Fluide der Oberkruste in wechselnden Gesteinseinheiten getestet werden. Um diese Forschungsziele zu erreichen, diente die Vorbohrung zur detaillierten Probenahme und dem Test von Bohrverfahren sowie der Entwicklung von wissenschaftlichen Methoden. Ab 1990 wurde, 200 m von der Vorbohrung entfernt, die KTB-Hauptbohrung erstellt (Abb. 3), die 1994 bei 9101 m Bohrtiefe und einer Temperatur von  $\sim 270^\circ\text{C}$  endete. Die Bohrung durchdrängte eine Serie steilstehender, hochgradig deformierter, metamorpher Gesteine, die aus basaltischem Ozeanboden und turbiditischen Kontinentalhangsedimenten eines kleinen Ozeans hervorgegangen sind. Bei der Schließung des Ozeanbeckens im Paläozoikum wurden diese Gesteine stark überprägt und deutlich später, während der Kreidezeit, postorogen durch Störungszonen aufgestapelt. Dadurch verdoppelten sich die Metamorphite in ihrer Mächtigkeit. In den Störungssystemen konnten frei zirkulierende, gasreiche Ca-Na-Cl-Fluide beprobt werden. Bedeutend war der Nachweis, dass die Temperaturzunahme von  $21^\circ\text{C}/\text{km}$  auf den ersten 2 km sich im tiefen Teil der KTB auf  $28^\circ\text{C}/\text{km}$  erhöhte. Erstmals gelangen im KTB Experimente zur Bestimmung der Spannungen im Gebirge bis 9 km Tiefe mittels hydraulisch erzeugter Risse, welche die Richtung und den Betrag der maximalen horizontalen Hauptspannung anzeigten. Nach Abschluss der Bohrarbeiten wurden unter anderem Experimente zur Rheologie und Fluidodynamik der tiefen Kruste in den beiden hydraulisch korrespondierenden Bohrlochern der KTB durchgeführt (Emmermann und Lauterjung, 1997).

Nicht nur geowissenschaftlich, sondern auch technisch war KTB wegweisend, denn diese übertiefe Bohrung in Kristallingesteine erforderte die Entwicklung einer Reihe neuartiger Techniken. Ein

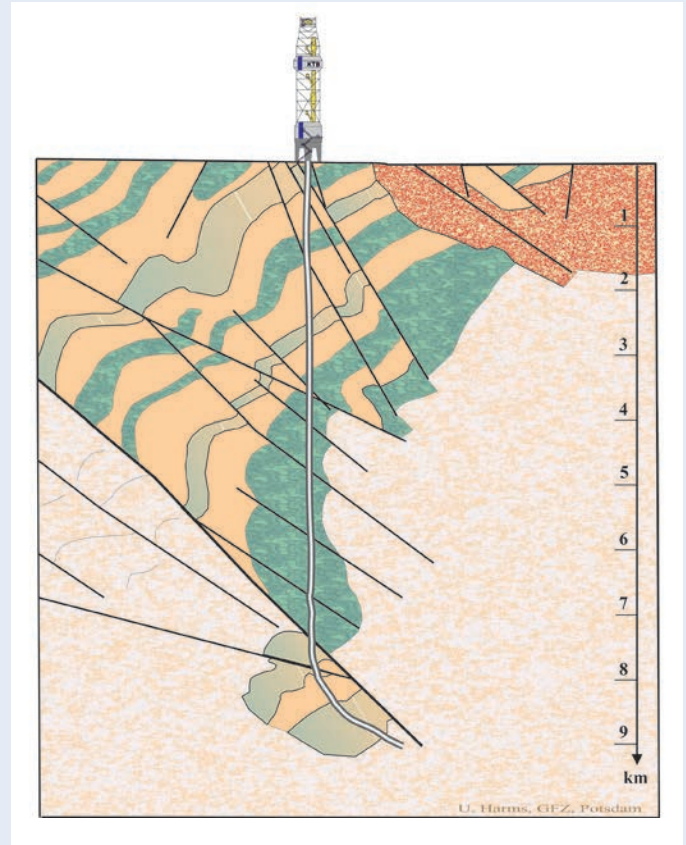
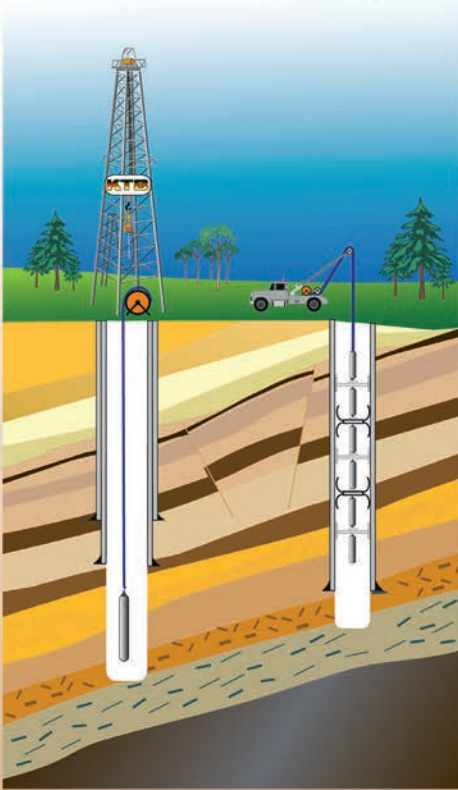


Abb. 4: Bohrlochverlauf der KTB-Hauptbohrung mit der Tiefe, dargestellt in einem West-Ost-Schnitt. Bis etwa 7500 m Tiefe verlief das Bohrloch durch aktive Steuerung mit weniger als 10 m Abweichung von der Vertikalen, während in größerer Tiefe eine starke Neigung aufgebaut wurde, die in 9101 m Tiefe zu einer Abweichung von 250 m führte.

Fig. 4: Drill path of the KTB Main Well shown in an East-West section. Down to 7500 m depth the borehole was deviated less than 10 m from vertical through active steering while the deviation increased to about 250 m distance at 9101 m final depth due to malfunction of steering systems at greater depth.

Beispiel sind Steuersysteme, mit denen die Richtung des Bohrlochverlaufs kontrolliert werden kann. Um Reibung zwischen Bohrlochwand und Gestänge zu minimieren, muss die Bohrung möglichst senkrecht verlaufen. In den steilstehenden, metamorphen Gesteinen der Oberpfalz läuft der Bohrmeißel aber in Richtung auf die Senkrechte zur Schieferung, was zu starken Abweichungen von der Vertikalen führt. Aus diesem Grund wurde für KTB ein Vertikalbohrsystem mit aktiver Steuerung der Bohrrichtung entwickelt, gefertigt und erfolgreich eingesetzt (Abb. 4). Diese aus KTB hervorgegangene technische Innovation zur aktiven Steuerung der Bohrrichtung ist heute eine Standardtechnologie in Horizontalbohrungen zur Kohlenwasserstoffförderung.

## ... KTB-Tiefenlabor für Experimente, Tests und Messungen



**Das KTB-Tiefenlabor des GFZ steht insbesondere industriellen Nutzern für unterschiedliche Test- und Entwicklungsaufgaben zur Verfügung:**

- Erprobung geophysikalischer Messmethoden und von technischem Equipment unter *In-situ*-Bedingungen
- *In-situ*-Tests von Sensoren und Housings bis in große Tiefe, unter hoher Temperatur und hohem Druck (6,7 km, 190 °C, 67 MPa)
- Ausdrillen von Kabeln (Cable Seasoning) bis zu einer Länge von 6,7 km
- Test neuer Kabeltechnologien
- Verifizierung von Messungen neuer und existierender Sonden in den umfassend charakterisierten Bohrungen
- Mehrtägige, auch zeitlich lange Wiederholungsmessungen
- Tests in einer oder beiden Bohrungen

**Interessenten wenden sich an:**

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Wissenschaftliches Bohren  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

Ansprechpartner:

Jochem Kück  
Tel.: (0331) 288-1087  
E-Mail: jochem.kueck@gfz-potsdam.de

Die beiden nach Abschluss der Bohrarbeiten offen gelassenen KTB-Bohrungen sind ein weltweit einmaliges *In-situ*-Labor für Bohrlochexperimente, Tests und Messungen, das auch Firmen und kommerziellen Anwendern zur Verfügung steht (siehe Infografik 1 „KTB-Tiefenlabor“). In den benachbarten Bohrungen mit 4 und 9,1 km Tiefe können langdauernde und ungewöhnliche Bohrlochexperimente unter idealen Bedingungen und geringen Kosten erfolgen. Die gut überwachten Bohrungen sind seit mehr als 20 Jahren standsicher und leicht zugänglich.

## ICDP

Das KTB-Projekt brachte führende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus zahlreichen Ländern zusammen, da einzigartige Proben aus großer Tiefe und zwei Bohrlöcher für spezielle Experimente zur Verfügung standen. Die sich daraus ergebenden internationalen Kooperationen waren ausschlaggebend für die Entwicklung eines internationalen Tiefbohrprogramms. Noch während des KTB wurde 1993 eine große internationale Konferenz in Potsdam (Zoback und Emmermann, 1994) abgehalten, die schließlich zur Gründung des ICDP mit den USA, China und Deutschland 1996 führte. Das GFZ trägt seitdem gemeinsam mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG den

deutschen Mitgliedsbeitrag und hat zusätzlich im ICDP zwei zentrale Aufgaben. Als Exekutivagentur des ICDP ist das GFZ mit der Geschäftsführung des Programms betraut, schließt Verträge zur Mitgliedschaft im ICDP, erhebt die Mitgliedsbeiträge und verteilt die Mittel an Projekte nach Entscheidung der ICDP-Gremien. Zudem stellt das GFZ eine Unterstützungsgruppe, die als Operational Support Group ICDP (OSG) sowohl den Gremien des Programms organisatorisch beisteht als auch die beteiligten internationalen Wissenschaftsteams bei der Durchführung ihrer ICDP-Projekte berät und aktiv unterstützt (vgl. Artikel von Giese und Kück in diesem Heft). Diese technisch-wissenschaftliche Unterstützung der ICDP-Projekte durch die OSG umfasst:

- Bohrtechnik und Engineering,
- Bohrlochmessungen und Tests,
- Bohrlochinstallationen und Monitoring,
- Informationsmanagement, Probenbearbeitung und Datenbanken und
- Fortbildung, Trainingsprogramme und Öffentlichkeitsarbeit.

Zusätzlich wird von der OSG der ICDP-Gerätepool betrieben, zu dem diverse Bohrlochmessgeräte mit Sonden, Winden und Mess-LKW gehören, die von der OSG an Bohrungen betrieben werden. Ein spezieller Seilkernbohrstrang von 5 km Länge ge-

hört ebenso zu diesem Pool wie auch das Deep Lake Drilling System (vgl. Artikel Harms et al. in diesem Heft). Des Weiteren stehen Instrumente wie optische und petrophysikalische Scanner zur Verfügung und auch Instrumente zur direkten Gasanalyse in der Bohrspülung, die nach Anleitung durch die OSG von den Teams an einer Bohrung eigenständig betrieben werden. Der Gerätepool wird je nach Bedarf erweitert: Benötigt ein Projekt Geräte, können diese mit Mitteln des ICDP beschafft werden und nach Ende der Bohrung für Folgeprojekte aus dem Gerätepool ausgeliehen werden.

Mittlerweile sind im ICDP 30 Projekte weltweit durchgeführt worden (Abb. 5). Zudem wurden über 60 Workshops von ICDP gefördert, um diese Projekte vorzubereiten und zu koordinie-

ren. Diese Vorhaben beleuchten z.B. die regionale Klima- und Umweltentwicklung der jüngeren Erdgeschichte, die insbesondere an Seesedimenten untersucht worden ist; genannt seien hier Baikalsee, Titicaca, Elgygytgyn, Van, Totes Meer oder Ohrid. Ein weiteres zentrales Forschungsobjekt des ICDP sind aktive Erdbebenzonen wie die San Andreas-Verwerfung, der Golf von Korinth, die Nordanatolische Bruchzone (vgl. Artikel von Bohnhoff et al. in diesem Heft) oder die Alpine Fault im Süden Neuseelands. Naturgefahren durch Vulkanismus konnten in Hawaii, am japanischen Vulkan Unzen und in den Campi Flegrei bei Neapel untersucht werden (vgl. Artikel von Wiersberg et al. in diesem Heft). Meteoritenkrater vom 200 km breiten Chicxulub-Einschlag in Mexiko bis zum nur 10 km großen Bosumtwi-Krater in Ghana wurden im ICDP erforscht ebenso wie die frühe

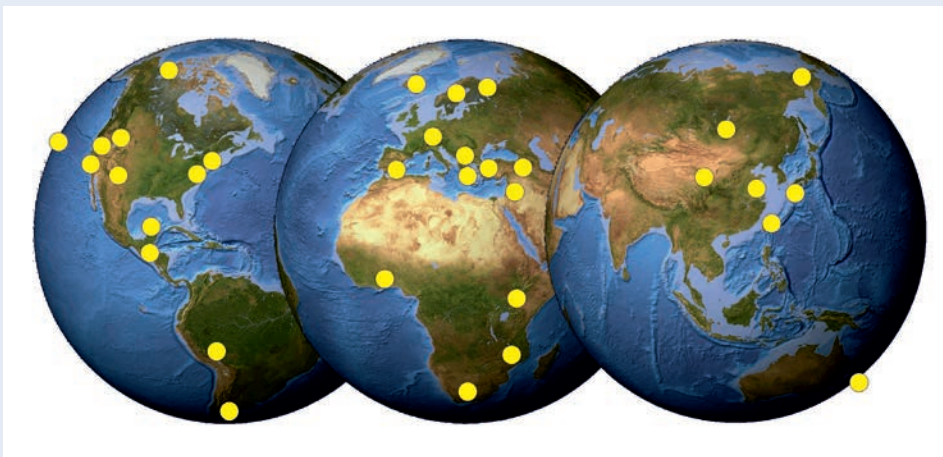


Abb. 5: Das Forschungsbohrprogramm ICDP hat mittlerweile 30 Projekte weltweit durchgeführt.

Fig. 5: The 30 projects of the International Continental Scientific Drilling Program, ICDP as of spring 2014.

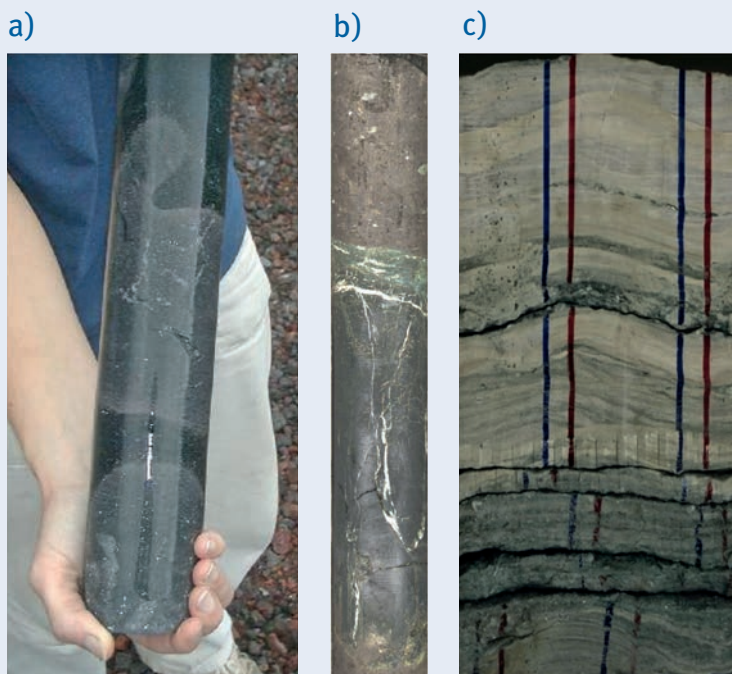
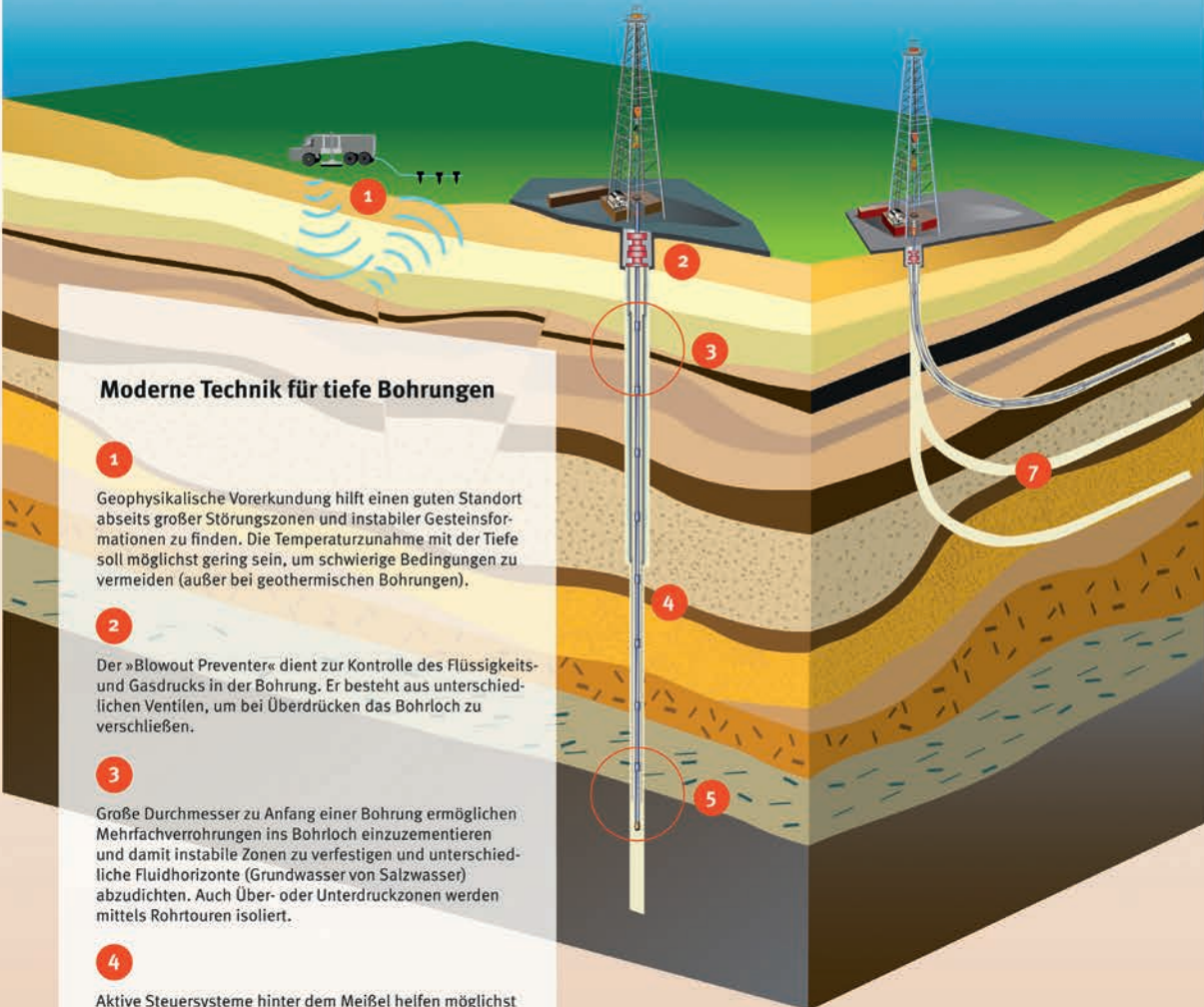


Abb. 6: Wichtige Bohrkerne aus ICDP-Projekten: a) Kissenlaven des Mauna Kea, Hawaii Scientific Drilling Project, b) Serpentinite in der aktiven Bruchzone der San Andreas-Störung in Kalifornien, c) Kreide-Tertiär-Grenze aus dem Chicxulub-Einschlagkrater in Mexiko (Fotos: ICDP-Archiv)

Fig. 6: Important drillcores of the ICDP: a) Pillow lavas from Mauna Kea, Hawaii, b) Serpentinite in the active trace of the San Andreas Fault Zone, California, c) Cretaceous-Tertiary Boundary from the Chicxulub Impact Crater in Mexico

## Wie tief kann man bohren?



### Moderne Technik für tiefe Bohrungen

**1** Geophysikalische Vorerkundung hilft einen guten Standort abseits großer Störungszone und instabiler Gesteinsformationen zu finden. Die Temperaturzunahme mit der Tiefe soll möglichst gering sein, um schwierige Bedingungen zu vermeiden (außer bei geothermischen Bohrungen).

**2** Der »Blowout Preventer« dient zur Kontrolle des Flüssigkeits- und Gasdrucks in der Bohrung. Er besteht aus unterschiedlichen Ventilen, um bei Überdrücken das Bohrloch zu verschließen.

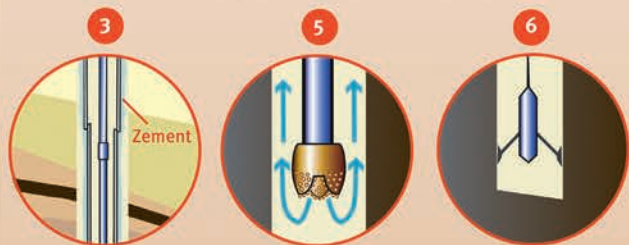
**3** Große Durchmesser zu Anfang einer Bohrung ermöglichen Mehrfachverrohrungen ins Bohrloch einzuzementieren und damit instabile Zonen zu verfestigen und unterschiedliche Fluidhorizonte (Grundwasser von Salzwasser) abzudichten. Auch Über- oder Unterdruckzonen werden mittels Rohrtouren isoliert.

**4** Aktive Steuersysteme hinter dem Meißel helfen möglichst senkrecht nach unten zu bohren, wodurch die Reibung zwischen Bohrgestänge und Bohrloch minimiert wird. Dadurch bleibt die Bohrlochwand stabil.

**5** Die Bohrspülung dient nicht nur zum Austragen des Bohrkleins, sie kühlt auch den Meißel, verringert die Reibung, treibt den Untertagemotor, balanciert Druckdifferenzen und stabilisiert Bohrlochwandungen. Die Spülung muss daher kontinuierlich chemisch und rheologisch überwacht und angepasst werden.

**6** Bohrlochmessungen und Tests helfen das Gestein, die Fluide und das Reservoir zu charakterisieren und die Bohrung sicher zu erstellen und zu nutzen.

**7** Gesteuert gebohrte Horizontalbohrungen mit bis zu 10 km weiten Ablenkungen und multiple Re-Entry-Verfahren ermöglichen den Zugang zu entfernten Formationen und verbesserte Nutzung von Öl- und Gasfeldern.



Mit diesen modernen technischen Möglichkeiten lässt sich in geeigneten Gebieten mit stabilen Gesteinsformationen und geringem Temperaturgradienten bis zu 12 km tief bohren. Allerdings steigen die Kosten exponentiell mit der Tiefe an, daher muss jedes Bohrprojekt sorgfältig geplant werden.

Entwicklung des Lebens vor 2,5 Mrd. Jahren (Beispiele siehe Abb. 6). Das kontinentale Forschungsbohrprogramm ICDP hat aber auch zur Erforschung potentieller Energiequellen, wie Gas-hydrate unter Dauerfrostböden in Kanada, sowie zur Nutzung magmatischer Geothermie auf Island beigetragen.

Im ICDP organisieren führende Wissenschaftlerinnen und Wis-senschaftler, Ingenieurinnen und Ingenieure sowie Managerin-nen und Manager aus 24 Ländern ein klar strukturiertes und hocheffizientes Forschungsprogramm. Das Programm bildet heute im Kern eine Infrastruktur zur Förderung von herausra-gender Wissenschaft und agiert international als die Plattform für Forschungsbohrungen auf Land. Die vom ICDP eingesetzten Mittel von fast 4 Mio. Dollar Jahresetat geben ihrerseits den Impuls für ein sehr viel höheres Drittmittelaufkommen. Dabei beträgt die ICDP-Förderung durchschnittlich nur etwa 20% der Bohrkosten; der Rest wird – angestoßen durch ICDP – aus anderen Quellen, meist nationaler Forschungsförderung oder Industriebeteiligungen, eingeworben.

ICDP wird gegenwärtig nach einer exzellenten internationalen Begutachtung in eine neue Phase überführt. Im November 2013 fand dazu am GFZ die Konferenz „Imaging the Past to Imagine our Future“ statt, mit der der Startschuss für den neuen Wis-senschaftsplan des ICDP gegeben wurde. Darin werden drei zentrale Forschungsthemen für der Zukunft definiert:

1. Klima und Ökosysteme, einschließlich Paläoklimaforschung sowie das Ökosystem in der Erde,
2. Nachhaltige Ressourcen, einschließlich Vulkanismus sowie Geothermie und
3. Naturgefahren wie beispielsweise Erdbeben.

Prioritäten für die jeweiligen Forschungsprojekte werden dazu nach den herausragenden gesellschaftlichen Notwendigkeiten gesetzt. Nur Forschungsprojekte, die eine breite internationale finanzielle Unterstützung finden, können im ICDP mit dem Prin-zip der Finanzierung aus diversen Quellen realisiert werden.

## Ausblick

Wissenschaftliches Bohren integriert nicht nur ein breites Spek-trum geowissenschaftlicher und weiterer naturwissenschaftlicher Felder, sondern benötigt ebenso ingenieurwissenschaftliche Entwicklungen. Bohrungen in instabile Zonen, bei hohen Temperaturen und mit hohen Fluidrücken müssen ermöglicht werden, um aktive Störungen und vulkanische Systeme zu be-proben, zu vermessen und zu instrumentieren. Für die Umwelt- und Klimaforschung ist eine gesicherte und kontinuierliche Kernprobenahme von herausragender Bedeutung. Die dazu notwendigen technischen Entwicklungen werden gegenwärtig angestoßen und gehören zu den großen Herausforderungen des wissenschaftlichen Bohrens in den nächsten Jahren.

## Literatur

- IODP - International Ocean Discovery Program (2011): Illuminating Earth's past, present, and future: the international ocean discovery program; exploring the earth under the sea; science plan for 2013-2023, Washing-ton, DC: Integrated Ocean Drilling Program, 84 p., <http://www.iodp.org/Science-Plan-for-2013-2023/>
- Emmermann, R., Lauterjung, J. (1997): The German Continental Deep Drill-ing Program KTB: Overview and major results. - *Journal of Geophysical Research*, 102, B8, 18179-18201. DOI: <http://doi.org/10.1029/96JB03945>
- Harms, U., Koeberl, C., Zoback, M. D. (Eds.) (2007): Continental Scientific Drilling: a decade of progress and challenges for the future, Berlin [u. a.]: Springer, 366 p. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-540-68778-8>
- Harms, U., Tobin, H. J. (2011): Deep Scientific Drilling - In: Gupta, H. K. (Ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, (Encyclopedia of Earth Sciences Series), Dordrecht: Springer, 91-103. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7\\_195](http://doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7_195)
- Zoback, M. D., Emmermann, R. (Eds.) (1994): Scientific rationale for estab-lishment of an International Program of Continental Scientific Drilling, International Meeting on Continental Scientific Drilling (Potsdam 1993), Potsdam: GeoForschungsZentrum, 194 p.

### Kontakt:

#### International Continental Scientific Drilling Program

Dr. Ulrich Harms

E-Mail: [ulrich.harms@icdp-online.org](mailto:ulrich.harms@icdp-online.org)

### Weiterführende Informationen:

<http://www.icdp-online.org>

#### Deutsches Forschungsbohrkonsortium GESEP e.V.

Dr. Ulrich Harms

E-Mail: [u.harms@gesep.org](mailto:u.harms@gesep.org)

### Weiterführende Informationen:

<http://www.gesep.org>

# Langzeitüberwachung von Erdbebenzonen durch den Einsatz von Bohrlochseismometern

Marco Bohnhoff<sup>1,2</sup>, Christina Raub<sup>1</sup>, Fatih Bulut<sup>1</sup>, Bernhard Prevedel<sup>1</sup>, Georg Dresen<sup>1</sup>, Peter E. Malin<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Berlin

<sup>3</sup> IESE, University of Auckland, Neuseeland

*The use of down-hole seismic instrumentation provides substantial benefits with regard to signal quality and reduced magnitude detection threshold in earthquake monitoring. This is mainly due to reduced levels of ambient and anthropogenic noise with depth, especially within the uppermost few hundred meters. Installing vertical arrays of seismometers in boreholes also allows including the depth as third dimension in addition to surface-based measurements. The installation procedure and selection of the depth of sensors in a borehole can range from quasi-permanent installations, with a retrieving option, to permanently cemented sensors in place. While sensor layouts generally depend on the boundary conditions of a specific project and are a compromise given the substantial drilling costs involved, the improvements in noise reduction generally open new windows in earthquake seismology and geomechanical reservoir monitoring. The current installation of highly sensitive down-hole seismometer arrays in monitoring wells around the eastern Sea of Marmara in Turkey (ICDP-GONAF project) and their integration into the local seismic network for monitoring the activity along the Princes Islands segment of the North Anatolian Fault Zone are discussed and first down-hole sensor responses are presented.*



Die zunehmend genauere Erfassung der globalen Seismizität hat über die vergangenen Jahrzehnte dazu geführt, dass die seismisch aktiven Bereiche auf der Erdoberfläche heute zum größten Teil identifiziert und ihre Mechanismen gut verstanden sind. Etwa 90 % aller Erdbeben treten entlang der Ränder von Kontinentalplatten auf. Dort kommt es entweder zu Aufschiebungsbeben durch Kompression (Gebirgsbildung, Subduktion), Abschiebungsbeben durch Dehnung (Mittelozeanische Rücken, kontinentale Riftsysteme) oder Seitenverschiebungen, wenn sich zwei Kontinentalplatten aneinander vorbeischieben. Lediglich Regionen mit starken Erdbeben innerhalb von einzelnen Platten (Intraplattenbeben) sind bis heute unvollständig kartiert und noch nicht gut erforscht, weil sie mit Wiederkehrperioden von meist mehreren hundert Jahren – bedingt durch sehr geringe Deformationsraten – nur sehr selten auftreten.

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ untersucht im Rahmen seiner Erdsystem-Observatorien die Seismizität ausgewählter erdbebengefährdeter Regionen. Ziel ist dabei, die von solchen Naturgefahren ausgehenden Georisiken zu reduzieren. Für die Abschätzung des Erdbebenrisikos einer bestimmten Region ist es wichtig, möglichst viele und möglichst kleine Erdbeben zu erfassen. Zudem sollten die erfassten Erdbeben mit hoher Genauigkeit räumlich lokalisiert werden können. Im Kontext der Erfassung möglichst kleiner Beben ist die Gutenberg-Richter-Relation von fundamentaler Bedeutung (*Gutenberg & Richter, 1941*). Sie besagt, dass die Zahl auftretender Erdbeben mit abnehmender Magnitude zunimmt; und zwar um den Faktor zehn pro Größenordnung in der Magnitude. Daraus folgt, dass bei der kleinsten gerade noch messbaren Erdbebenmagnitude (Detektionsschwelle) eines seismischen Messnetzes von z. B.  $M=3$  bei Erfassung eines  $M_3$ -Erdbebens auch zehn Erdbeben der Magnitude  $M=2$ , hundert Erdbeben der Magnitude  $M=1$  usw. auftreten, die aber von den Seismometern nicht detektiert werden können. Der Grund dafür ist eine im Vergleich zum Rauschpegel an den Sensoren zu kleine Signalamplitude. Um die Magnituden-Detektionsschwelle eines seismischen Netzes zu senken, sind zwei Parameter von fundamentaler Bedeutung: der Rauschpegel am Seismometer und die Entfernung der Seismometer zum Hypozentrum.

*Links: Impression nächtlicher Bohrarbeiten im Rahmen des GONAF-Observatoriums (Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault) auf der Armutlu-Halbinsel in der Nordwest-Türkei (Foto: P. Malin, University of Auckland, Neuseeland)*

*Left: Impressions from night-time drilling in the frame of the GONAF project (Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault) on the Armutlu peninsula in northwestern Turkey*

Die einfachste Maßnahme, die Magnituden-Detektionsschwelle lokal zu senken, ist eine Erhöhung der Stationsdichte im Messgebiet. Dadurch wird die mittlere Entfernung der Stationen für Erdbeben, die innerhalb des Netzes auftreten, verringert. Jeder Installation einer Seismometerstation geht zudem eine Charakterisierung des Standorts voraus, um den rauschärmsten Standort in einem vordefinierten Areal zu finden, d. h. möglichst weit von anthropogenen Geräuschquellen wie Siedlungen, Autobahnen, Stromtrassen und Industrieanlagen entfernt. Darüber hinaus wird man einen Ort mit relativ festem Stationsuntergrund auswählen, um eine gute Ankopplung des Sensors an den Untergrund zu gewährleisten. Felsgestein bietet generell bessere Registrierbedingungen als beispielsweise Ackerboden (Abb. 1a). Diesem Optimierungsprozess an der Erdoberfläche sind jedoch dahingehend Grenzen gesetzt, dass anthropogene, aber auch natürliche Geräuschquellen wie z. B. Wetter nicht gänzlich zu eliminieren sind, aber zum Teil mit dem Frequenzbereich der zu messenden Signale von lokalen Erdbeben (etwa 1 bis 100 Hz) überlappen. Zudem herrscht auf der Erdoberfläche generell ein gewisser Hintergrundrauschpegel, der maßgeblich vom Meeresrauschen der Ozeane generiert wird. Er liegt allerdings im Frequenzbereich von etwa 0,14 Hz und damit außerhalb des Frequenzspektrums von Wellenformensignaturen lokaler Seismizität.

### Genauere Messungen mit Bohrlochseismometern

Die einzige Möglichkeit, die Magnituden-Detektionsschwelle eines Seismometernetzes substanziell weiter zu senken, ist der Einsatz von Bohrlochseismometern. Dadurch ergeben sich folgende Vorteile: Zum Einen wird der Hintergrundrauschpegel mit zunehmender Einsatztiefe reduziert, da der anthropogene Rauschpegel sowie der Einfluss durch Wetter wesentlich verringert bzw. eliminiert wird (Abb. 1a). Auch die Amplitude des Meeresrauschens nimmt mit der Tiefe ab. Dadurch erhöht sich automatisch das Verhältnis von Nutz- zu Störsignal (engl. Signal to Noise Ratio – SNR), welches das entscheidende Qualitätskriterium einer seismischen Wellenformregistrierung darstellt. Zugleich werden Streueffekte der seismischen Wellen in den oberflächennahen (Verwitterungs-) Schichten vermieden, was die Erfassung deutlicherer Wellenformensignaturen mit höherer Amplitude und damit eine genauere Hypozentrenbestimmung sowie auch das Messen höherfrequenter Signalanteile ermöglicht.

In Ergänzung zu den beschriebenen Effekten spielt beim Einsatz von Seismometern in Bohrungen auch die Verringerung der Entfernung zwischen Sensor und seismischer Quelle eine Rolle, denn die absolute Signalstärke der elastischen Raumwellenamplitude (P- und S-Wellen) nimmt aufgrund der geometrischen



**Kontakt:** M. Bohnhoff  
(marco.bohnhoff@gfz-potsdam.de)

a)

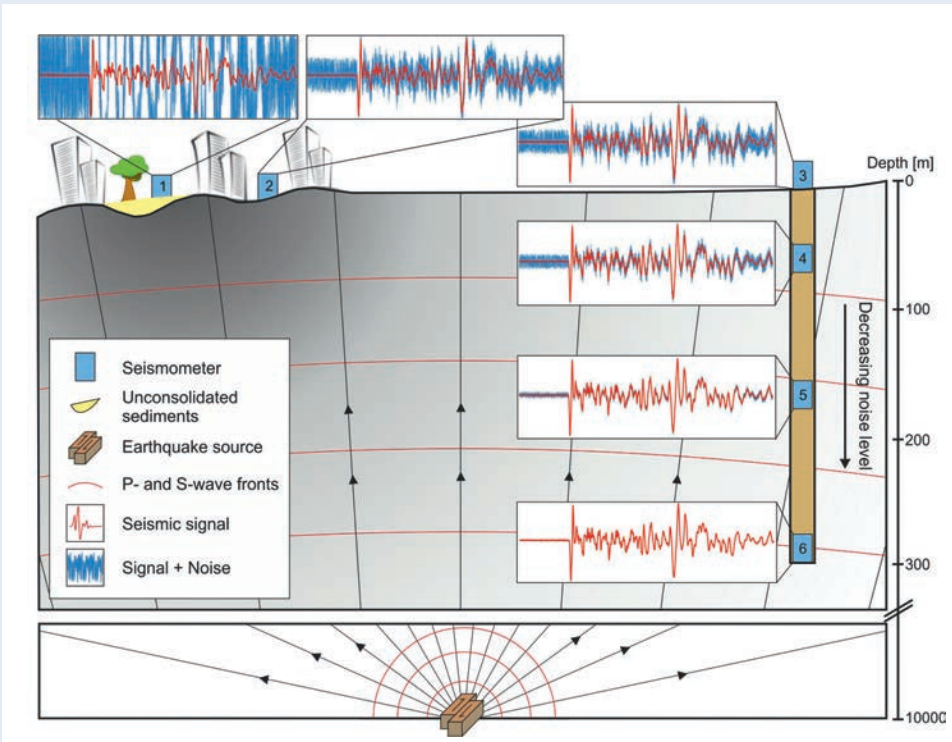


Abb 1: a) Prinzipskizze für den Einfluss anthropogener und natürlicher Rauschquellen auf die Qualität von Seismometer-Registrierungen an der Erdoberfläche und in Überwachungsbohrungen. Rote Schwingungen stellen exemplarisch das Meßsignal eines Erdbebens mit P- und S-Wellen dar. Blaue Schwingungen zeigen den standortabhängigen Rauschpegel. Die graue Schattierung im Untergrund gibt ein Maß für den örtlich variierenden Rauschpegel an. b) Verankerungsvorrichtung eines Bohrlochseismometers über einen Spannbogen (Foto: M. Bohnhoff, GFZ). c) Drei-Komponenten-Bohrlochseismometer vom Typ MARK (Eigenfrequenz 1 Hz). Dieses hochempfindliche Gerät kommt im Rahmen des GONAF-Projekts erstmals in Bohrungen zum Einsatz. Eine kardanische Vorrichtung für die drei einzelnen Komponenten innerhalb des druckdichten Gehäuses sichert die vertikale Ausrichtung (Foto: B. Najdahmadi, GFZ).

b)



c)



Fig. 1: a) Sketch on the site-dependence of anthropogenic and ambient noise as a function of depth and vicinity to population centers (grey shading). Red traces represent seismic signals with P- and S-wave trains and blue traces indicate the level of ambient noise at the various locations, respectively. b) Coupling device for a borehole seismometer achieved through a bow spring. c) Three-component borehole seismometer (type MARK, natural frequency 1 Hz) as used for the first time in downhole deployments in the frame of the GONAF project. A gimbaled construction for each of the three components embedded in the pressure-secure housing ensures verticality of the instrument at depth.



Ausbreitung und Streuung mit der Entfernung ab. Die Auswirkung dieses Effekts auf die Datenqualität hängt jedoch stark von der jeweiligen Messgeometrie ab: So kann etwa im Fall der seismischen Überwachung eines geothermischen Reservoirs in einer Tiefe von typischerweise 3 bis 4 km die Hypozentralentfernung durch Sensoren in einigen hundert Metern Tiefe schon maßgeblich (um etwa 10 %) verkürzt werden, wohingegen bei der Überwachung von Erdbebenzonen mit Hypozentren in zehn und mehr Kilometern Tiefe dieser Effekt fast vernachlässigbar klein ist (wenige Prozent).

Ein weiterer Vorteil des Einsatzes von Bohrlochseismometern ergibt sich aus der Möglichkeit, eine vertikale Kette aus mehreren Sensoren zu installieren, und damit die Bodenbewegung in verschiedenen Tiefenstockwerken und relativ zu der Signalamplitude an der Oberfläche zu messen. Dadurch können wichtige Anhaltspunkte für eine standortabhängige seismische Gefährdung in besiedelten Gebieten gewonnen werden, denn aufgrund von Änderungen der Beschaffung der oberflächennahen Erdschichten kann es lokal zu erheblichen Verstärkungen der Amplituden von Erdbebenwellen kommen (soil amplification, siehe Abb. 1a). Außerdem lässt sich durch das Aufsummieren der Registrierungen aller Seismometer in einer Kette, das sogenannte Stapeln (engl. stacking), das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Rauschen (SNR) um den Faktor der Quadratwurzel der Anzahl gestapelter Seismometer verbessern. Also erzielt man beispielsweise bei vier gestapelten Seismogrammen eine Verdopplung der Signalqualität.

Das Mitte der 1980er Jahre am Parkfield-Segment der San Andreas-Verwerfung in Kalifornien installierte High Resolution Seismic Network (HRSN) hat erstmals nachhaltig den Nutzen des Einsatzes von Bohrlochseismometern im Langzeitbetrieb verdeutlicht. Das HRSN ist Teil des Parkfield Earthquake Prediction-Experiments, in dessen Rahmen die bis heute detaillierteste Überwachung eines Schlüsselsegments einer kontinentalen Plattenrandstörung realisiert wurde. Das HRSN besteht aus einem Netzwerk fest installierter Bohrlochseismometer rund um das Parkfield-Segment in 200 bis 300 m Einsatztiefe. Das Messnetz ist bis heute in Betrieb und liefert auf Basis von Registrierungen kleinster Erdbeben eine entscheidende Datengrundlage zur Überwachung des Parkfield-Segments. Das bei Weitem regional umfangreichste Netzwerk aus Bohrlochseismometern weltweit wurde im Verlauf der letzten Jahrzehnte in Japan errichtet, um dort flächendeckend die Seismizität bei niedriger Detektionsschwelle und in hoher Auflösung in Nah-Echtzeit zu überwachen. Der Einsatz von Bohrlochseismometern stellt heute allerdings aufgrund verschiedener technologischer und logistischer Herausforderungen nach wie vor die große Ausnahme dar.

## Herausforderungen und Einsatzbereiche der Bohrlochseismologie

Der Einsatz von Seismometern in Bohrungen bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Allen voran ist das qualitäts-

bewusste und schnelle Abteufen von Bohrungen ein entscheidender Erfolgsfaktor. Abgesehen vom hohen technischen und logistischen Aufwand steigen erfahrungsgemäß die Bohrkosten exponentiell mit der Bohrtiefe an. Einer Festlegung der Einsatztiefe von Bohrlochseismometern geht daher immer eine Abwägung der Zielteufe im Vergleich zum erwarteten Vorteil bei den Monitoringbedingungen voraus. In den meisten Fällen liegt das Optimum bei wenigen hundert Metern Tiefe, da sich der Rauschpegel zu größeren Tiefen hin nur unwesentlich weiter reduziert und der zweite Faktor, die verringerte Hypozentralentfernung, meist vernachlässigbar ist. Besondere Herausforderungen für Bohrlochinstallationen sind eine abgeschirmte und damit störungsfreie Datenübertragung nach Übertage, sowie je nach Einsatztiefe auch erheblich erhöhte *In-situ*-Temperaturen und gestiegene hydrostatische Drücke. Bei Langzeiteinsätzen in nicht verrohrten (offenen) Bohrungen können zudem teils aggressive Bohrlochfluide hohe Anforderungen an das Material, Dichtungen und Kabelarmierungen darstellen.

Ohne gute Ankopplung des Sensors über die Bohrlochwand bzw. Stahlverrohrung und dessen Zementierung an die Gesteinsformation ist der Einsatz von Bohrlochseismometern nutzlos. Die Komplettierung einer Bohrlochinstallation ist allerdings anspruchsvoll, da im Gegensatz zu Oberflächenstationen kein direkter Zugriff auf das Messgerät im Bohrloch besteht, sondern lediglich ein Signalkabel die Verbindung zum Sensor darstellt. Die Ankopplung an die Gesteinsformation bei temporären Einsätzen erfolgt durch mechanische Verankerung der Seismometer mittels eines herausfahrbaren Hebelarms oder eines Spannbogens (Abb. 1b). In beiden Fällen besteht die Möglichkeit, das Gerät nach dem Einsatz am Kabel wieder zu bergen. Bei einer permanenten Seismometerinstallation in der Tiefe erzielt man die optimale Ankopplung durch Einzementieren des Messgeräts in der Bohrung, wodurch allerdings eine anderweitige Nutzung der Bohrung für die Zukunft ausgeschlossen ist. Fest installierte Bohrlochsensorik kann dann im Erfolgsfall mehrere Jahrzehnte kontinuierlich Daten liefern. Dies ist beim HRSN der Fall, dessen Daten nach wie vor direkt in das kalifornienweite seismische Messnetz eingespeist werden. Die wesentlich verbesserten Monitoringbedingungen führen zu einer verringerten Magnituden-Detektionsschwelle durch kleinere Rauschpegel und zu einer erhöhten Lokalisierungsgenauigkeit der seismischen Ereignisse durch genauere Bestimmung der P- und S-Phaseneinsatzzeiten. Damit werden durch ein bohrlochgestütztes Seismometernetzwerk die Grundlagen für einen hochpräzisen Hypozentrenkatalog geschaffen. Dies erlaubt eine wesentlich detailliertere Analyse der raumzeitlichen Entwicklung der Seismizität im Untersuchungsgebiet – ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis der unterhalb der Erdoberfläche ablaufenden Prozesse entlang von Erdbebenzonen. Darüber hinaus wird damit auch die Voraussetzung für eine präzisere Abbildung des krustalen Geschwindigkeitsfelds (tomography) sowie der seismisch aktiven Strukturen (passive fault-zone imaging) geschaffen. Bohrlochseismologische Wellenformregistrierungen erlauben darüber hinaus durch

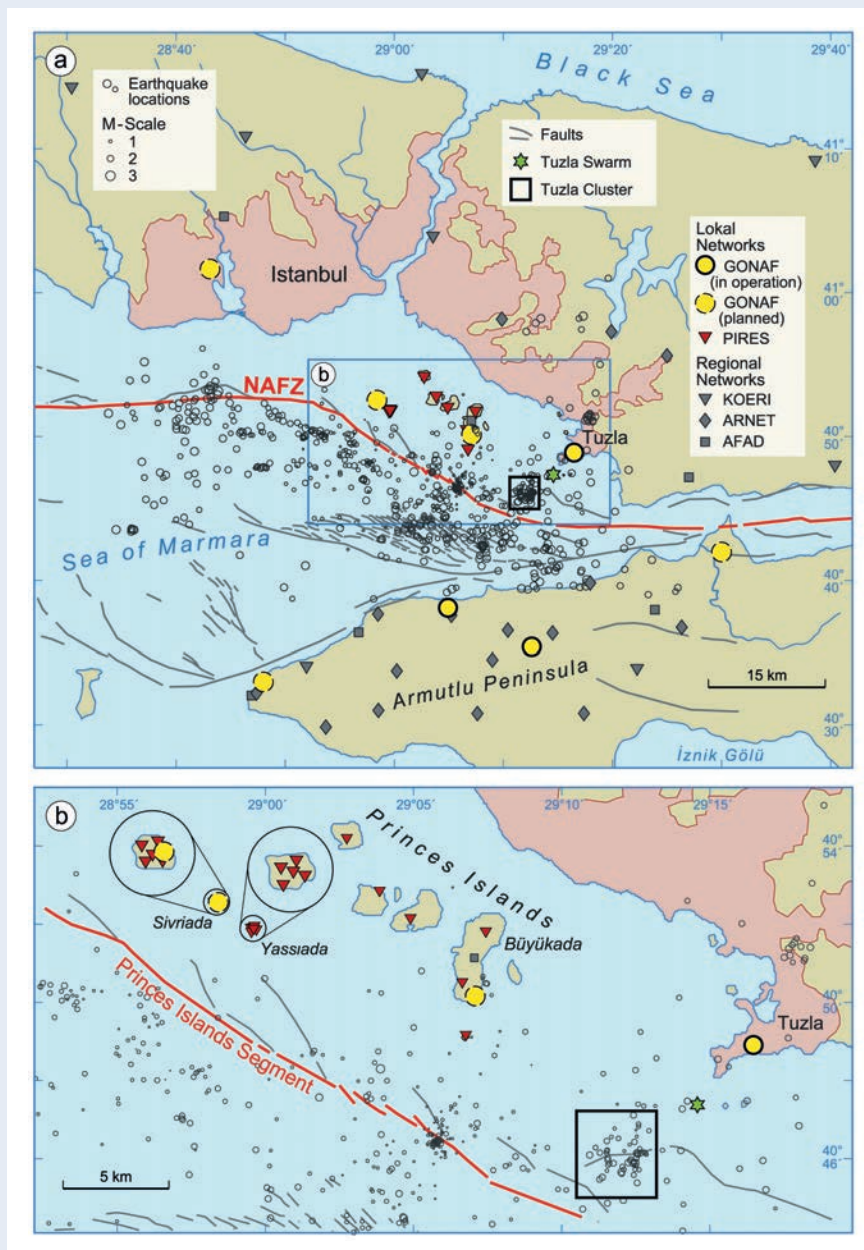


Abb. 2: a) Übersichtskarte der Region Istanbul/östliches Marmarameer im Nordwesten der Türkei. Die rote Linie markiert den Hauptzweig der Nordanatolischen Verwerfungszone (NAFZ) unterhalb des Marmarameeres. Graue Symbole markieren Stationen von regionalen Seismometernetzen. Blaue Kreise sind Bohrlochseismometer-Stationen des ICDP-GONAF-Projekts. b) Vergrößerter Ausschnitt des Prinzeninsel-Segments der NAFZ, das aufgrund einer hohen Wahrscheinlichkeit für ein starkes ( $M > 7$ ) Erdbeben gezielt mikroseismisch überwacht wird. Rote Dreiecke markieren Stationen des inselgestützten PIRES-Netzwerks. Auf den beiden Inseln Sivriada und Büyükada werden jeweils 300 m tiefe GONAF-Bohrungen abgeteuft, in die Ketten aus Bohrlochseismometern installiert werden.

Fig. 2: a) Location map of the greater Istanbul metropolitan region in northwestern Turkey. The red line marks the Princes Islands segment as the main branch of the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) below the Sea of Marmara. Grey symbols are stations of the regional permanent networks. Blue points are borehole locations of the ICDP-GONAF project. b) Enlarged map of the Princes Islands segment. Due to a high probability for a major ( $M > 7$ ) earthquake this fault segment is monitored at reduced magnitude-detection threshold to study a critical fault segment before, and potentially also during and after a major rupture. Red triangles are stations of the island-based PIRES network. 300 m-deep GONAF boreholes equipped with vertical chains of seismometers will be installed on the islands of Sivriada and Büyükada.

verbesserte Signalqualität auch eine präzisere Bestimmung weitergehender seismischer Herdparameter (earthquake source parameters): Neben den Standardherdparametern wie Hypozentralkoordinaten, Magnitude und Herdzeit sind dies z. B. der Spannungsabfall auf der aktivierten Bruchzone während des Bebens (coseismic stress drop), die Eckfrequenz der im Hypozentrum abgestrahlten Wellen (corner frequency) oder auch der genaue Verlauf des Bruchprozesses mit der Zeit (source time function). Außerdem können so auch kontrovers diskutierte Phänomene, wie etwa das Auftreten von amplitudenschwachen Wellenformensignaturen vom unmittelbaren Bruchbeginn ei-

nes Erdbebens, erfasst werden. Diese geben Aufschluss über potenzielle Signale vom Nukleationsprozess eines Erdbebens mit entsprechend wichtigen Anwendungsfeldern, wie etwa der Möglichkeit einer effektiveren Erdbebenfrühwarnung.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass durch einen in einem vergleichsweise kurzen Zeitraum von z. B. einem Jahr erfassten Erdbebenkatalog mit genaueren Hypozentren und insbesondere vielen magnitudenschwächeren Ereignissen für eine Zielregion eine Kalibrierung des örtlichen Langzeiterdbebenkatalogs möglich wird. Hier werden dann für das gleiche Ereignis die

Lokalisierungen mit und ohne das zusätzlich installierte Sensornetz verglichen, die Mislokationsvektoren für gezielte Bereiche bestimmt und dann für länger zurückliegende sowie lediglich mit dem Langzeitnetz erfassten Erdbeben als Korrektur angebracht. Somit erhält man eine höhere Lokalisierungsgenauigkeit für Erdbeben in der Zielregion für zurückliegende Zeiträume, obwohl kein ergänzendes Messnetz zur Verfügung gestanden hat.

## Bohrlochseismologie vor den Toren Istanbuls

Das GFZ ist im Rahmen seiner Erdsystem-Observatorien seit vielen Jahren in der Marmara-Region, im Nordwesten der Türkei, aktiv. Einer der Forschungsschwerpunkte dort ist die Erdbebenüberwachung des östlichen Marmarameeres in unmittelbarer Nähe zum Ballungsraum Istanbul mit seinen mehr als 13 Mio. Einwohnern und einer Wirtschaftskraft von rund 40 % der Türkei. Unterhalb des Marmarameeres verläuft in nur etwa 20 km Entfernung zum historischen Stadtzentrum Istanbuls der Hauptzweig der Nordanatolischen Verwerfungszone (North Anatolian Fault Zone NAFZ), eine der großen Plattenrandstörungen der Erde mit einer Erstreckung von mehr als 1000 km zwischen Ostanatolien und der nördlichen Ägäis. Der Bereich der NAFZ in der Marmara-Region hat im Verlauf der vergangenen 2000 Jahre mehrfach zu Starkbeben der Magnitude  $M > 7$  geführt, zuletzt im Jahr 1766. Im Mittel liegt die dortige Wiederkehrperiode für Starkbeben bei 200 bis 250 Jahren – ein Wert, der durch die lange Siedlungsgeschichte historisch sehr gut dokumentiert ist. Die Wahrscheinlichkeit für ein  $M > 7$  Erdbeben in der Marmara-Region ist gegenwärtig insgesamt als sehr hoch einzuschätzen. Hinzu kommt, dass das letzte große Beben bei Izmit im Jahr 1999 die Spannungen auf der Verwerfung unterhalb des Marmara-Segments nochmals erhöht hat.

Um die entlang des Prinzeninsel-Segments im östlichen Marmarameer auftretende Seismizität bei verringerter Magnituden-Detektionsschwelle zu erfassen, wurde im Jahr 2006 zunächst ein lokales oberflächengestütztes Seismometernetz (PIRES) auf den Istanbul vorgelagerten Prinzeninseln errichtet (*Bulut et al., 2009; 2011; Bohnhoff et al., 2013*). Unter Einbeziehung ausgewählter regionaler Stationen des türkischen Katastrophenschutzes AFAD und des türkischen Erdbebenobservatoriums Kandilli, sowie Stationen des Armutlu-Netzes (*Tunc et al., 2011*) wurde so zunächst die Magnituden-Detektionsschwelle um etwa eine Größenordnung von  $M=3$  auf  $M=1,8$  gesenkt (Abb. 2). Um die vor einem Starkbeben ablaufenden Prozesse an einer seismisch aktiven Plattenrandstörung mit bestmöglicher Präzision zu überwachen, wurde kürzlich damit begonnen, ein bohrlochgestütztes, geophysikalisches Plattenrandobservatorium entlang des Prinzeninsel-Segments zu errichten (GONAF – Geophysical Observatory at the North Anatolian Fault; [www.gonaf.de](http://www.gonaf.de)). Das GONAF-Projekt ist das erste Projekt im Rahmen des am GFZ angesiedelten Internationalen Kontinentalen Wissenschaftlichen Bohrprogramms ICDP, das sich im Schwer-

punkt mit der Langzeitüberwachung einer Verwerfungszone durch den Einsatz eines Netzwerks von Bohrlochseismometern befasst. GONAF wird vom GFZ und dem türkischen Katastrophenschutz AFAD koordiniert. Weitere assoziierte Projektpartner realisieren unter anderem eine Verdichtung des GPS-Messnetzes in der Region und die Installation bohrlochgestützter Deformationsmessgeräte.

Im Rahmen von GONAF werden in insgesamt acht 300 m tiefen Bohrungen vertikale Ketten aus unterschiedlichen Seismometertypen installiert und einzementiert. Die Betriebsdauer ist auf zunächst 20 Jahre ausgelegt. Die Seismometerketten in den GONAF-Bohrungen bestehen aus jeweils drei Vertikalseismometern einer Eigenfrequenz von 1 Hz, die im Abstand von 75 m zum Einsatz kommen. Im Bohrlochtieftsten (300 m) sind zudem Dreikomponenten-Seismometer mit Eigenfrequenzen von 1, 2 und 15 Hz implementiert, um das Spektrum der Signalfrequenzen über eine möglichst große Bandbreite zu erfassen. In den Messcontainern am Bohrlochkopf sind neben der Datenerfassungseinheit auch zusätzlich kurzperiodische, Breitbandseismometer und Akzelerometer untergebracht. Die Abtastrate aller Wellenformenregistrierungen ist auf 2000 Hz festgelegt und die Daten werden in Echtzeit simultan ans GFZ in Potsdam und zu AFAD in Ankara übertragen, wo sie ausgewertet werden.

Beim Einsatz von Dreikomponenten-Bohrlochseismometern besteht generell keinerlei Einfluss auf die horizontale Ausrichtung der Sensoren. Im Fall der GONAF-Bohrlochstationen wird die horizontale Ausrichtung daher durch Polarisationsanalyse der Wellenformen von Sprengungen in nahegelegenen Steinbrüchen ermittelt und fließt dann als Korrektur in die Auswertung der Erdbebensignaturen mit ein. Die senkrechte Ausrichtung der Sensoren ist an die Vertikalität der Bohrungen gebunden. Für die ersten drei GONAF-Bohrungen ergab die Vermessung der Bohrlochtrajektorie jeweils weniger als ein Grad Ablenkung. Da die senkrechte Ausrichtung eines seismischen Sensors fundamental wichtig für die korrekte Übertragung der Bodenbewegung ist, wurden sämtliche GONAF-Bohrlochseismometer zusätzlich in eine kardanische Aufhängung integriert, die ihrerseits in einem druckdichten Gehäuse untergebracht ist (Abb. 1c).

## Erste Ergebnisse

Im Folgenden wird exemplarisch die erzielte Datenqualität anhand von Messungen der ersten fertiggestellten GONAF-Bohrung auf der Halbinsel Tuzla im östlichen Teil Istanbuls vorgestellt (Abb. 2). Tuzla wurde als Ort für die erste Bohrlokation festgelegt, weil sie in unmittelbarer Nähe zu einem Gebiet liegt, das seit dem Izmit-Erdbeben von 1999 durch kontinuierliche seismische Aktivität aufgefallen ist (im folgenden „Tuzla-Cluster“ genannt). So konnte mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, in einem relativ kurzen Zeitraum lokal auftretende Seismizität in einer Hypozentralentfernung von 10 bis 15 km zu erfassen, um die Messgeometrie und Daten-

qualität vor dem Abteufen weiterer Bohrungen zu überprüfen. Nach Fertigstellung der Bohrarbeiten und Komplettierung der Seismometer-Installation nahm die erste GONAF-Station zu Beginn des Jahres 2013 ihren Betrieb auf. Im April 2013 fiel ein lokales Erdbeben mit einer Magnitude von  $M=1,5$  auf, welches von permanenten regionalen Seismometernetzen erfasst und in der Umgebung des Tuzla-Clusters lokalisiert wurde (Abb. 2). Die Analyse der Registrierungen der GONAF-Bohrlochseismometer zeigt, dass es sich bei dem  $M_{1,5}$ -Erdbeben nur um das größte Ereignis einer Erdbebensequenz handelt. Durch die reduzierten Rauschpegel in den verschiedenen Tiefenstockwerken und die relative Nähe der Bohrung zur Hypozentralregion konnten insgesamt 114 zusätzliche, kleinere Erdbeben durch Kreuzkorrelation der Wellenformen detektiert werden. 19 von diesen wurden, allerdings mit wesentlich geringerem Signal-Rausch-Verhältnis, auch auf den inselgestützten PIRES-Stationen erfasst (Abb. 3). Die weitergehende Analyse zeigt, dass es sich bei der hier aufgetretenen Seismizität nicht um eine Hauptbeben-Nachbe-

ben-Sequenz handelt. Hingegen spricht die zeitliche Abfolge der Erdbeben und der Magnituden für das Auftreten eines Erdbebenschwarms. Die Hauptaktivität des Tuzla-Schwarms erstreckte sich über einen Zeitraum von etwa fünf Tagen (Abb. 4). Derartige seismische Sequenzen treten z. B. auch in vulkanisch aktiven Gebieten auf und werden meist mit dem Aufstieg von kristallinen Fluiden (z. B. Magma) in Verbindung gebracht. Die innerhalb des Tuzla-Schwarms beobachtete Seismizität in 7 km Tiefe steht möglicherweise in ursächlichem Zusammenhang mit dem Aufstieg von Fluiden und Gasen entlang von Nebenästen des Prinzeninsel-Segments (Geli et al., 2008). Ein direkter Zusammenhang mit in der gleichen Region am Meeresboden beobachteten Ausgasungen ist möglich, muss aber zunächst noch weiter untersucht werden. Analysen der Gaszusammensetzung scheinen eher auf eine geringere Ursprungstiefe als die beobachtete Tiefe des Bebenschwarms, und damit auf einen entkoppelten Prozess hinzudeuten. Eine systematische raumzeitliche Wanderung von Erdbeben innerhalb des Schwarms

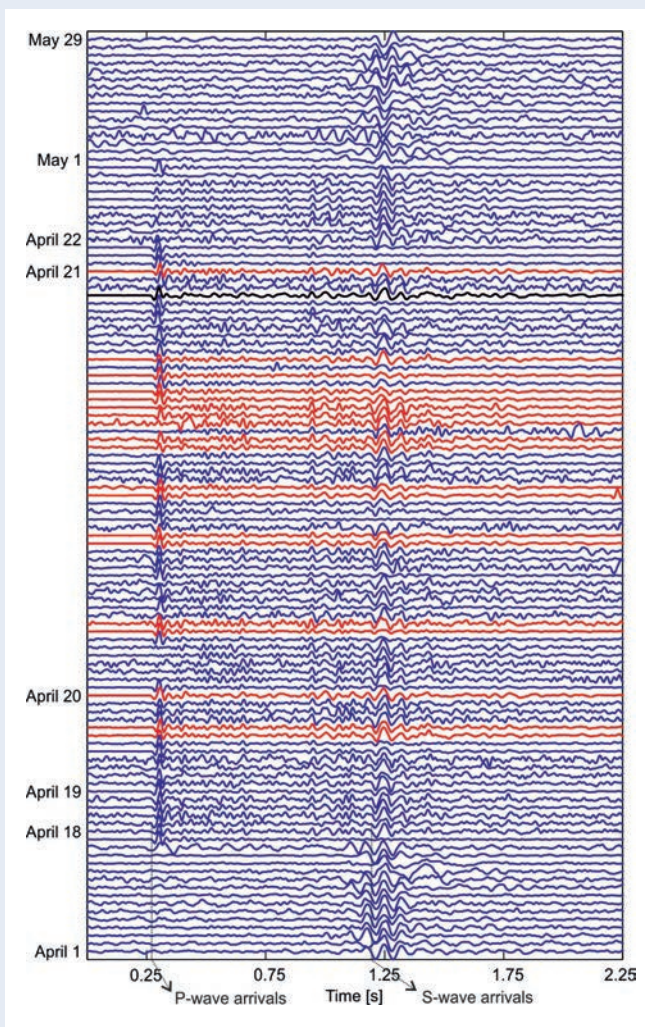


Abb. 3: Seismische Wellenformenregistrierungen des Tuzla-Erdbebenschwarms von April bis Mai 2013. Gezeigt ist jeweils die vertikale Bodenschwingung für jedes der detektierten Erdbeben an der GONAF-Station auf der Halbinsel Tuzla in 215 m Tiefe. Die hohe Ähnlichkeit der Signale weist auf eine sehr eng begrenzte Herdregion der Ereignisse hin. Während von den regionalen Festnetzstationen nur das stärkste Erdbeben dieses Schwarms mit einer Magnitude von 1,5 erfasst und lokalisiert wurde (schwarze Spur), konnten auf den inselgestützten PIRES-Stationen 19 weitere schwächere Erdbeben erfasst werden. Durch den Einsatz von Bohrlochseismometern in der GONAF-Bohrung auf Tuzla (Abb. 2) konnten bei reduziertem Rauschpegel und verringerter Hypozentralentfernung weitere 95 magnitudenschwächere Erdbeben aus derselben Herdregion erfasst werden (blaue Spuren). Alle Ereignisse zusammen bilden einen Erdbebenschwarm, der ohne Bohrlochstationen nicht detektiert worden wäre.

Fig. 3: Waveform recordings of the Tuzla earthquake swarm of May-June 2013. The traces shown are recordings of the vertical component at the GONAF borehole seismometer at 215 m on the Tuzla peninsula. While only one event was detected and located by the regional permanent seismic network (black trace), another 19 smaller-magnitude events were detected by the PIRES stations on the Princes islands (red traces). Using a cross-correlation technique additional 95 earthquakes were detected by the GONAF Tuzla borehole station (blue traces). All events belong to one earthquake swarm within a narrow hypocentral region close to the Tuzla cluster (see Fig. 2).

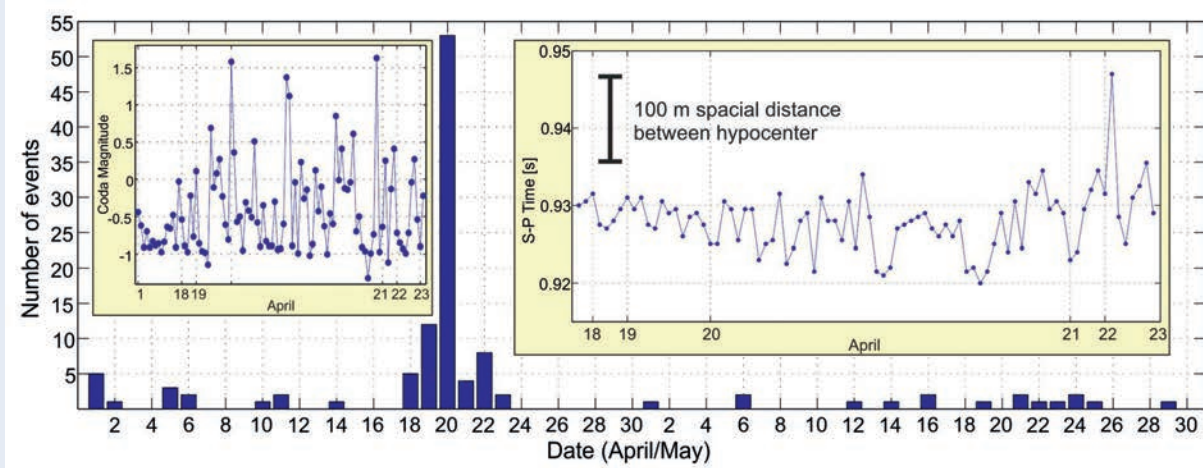


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung des Tuzla-Erdbebenschwarms (tägliche Ereignisrate). Während die Hauptaktivität zwischen dem 18. und 23. April 2013 liegt wurde mittels Wellenform-Kreuzkorrelationsanalyse über einen Zeitraum von zwei Monaten eine Reihe weiterer ähnlicher Erdbeben detektiert. Der Kasten oben links zeigt die zeitliche Entwicklung der Magnituden mit der Zeit und liefert klare Hinweise auf einen Erdbebenschwarm. Der Kasten oben rechts zeigt die zeitliche Entwicklung der Differenzlaufzeit aus P- und S-Wellen, wobei die geringe Variation keine systematische Wanderung von Erdbeben innerhalb der Schwarmregion erkennen lässt.

Fig. 4: Temporal evolution of the Tuzla earthquake swarm (daily event rate). While the main activity of the swarm occurred during April 18-23 2013 several additional events with highly similar waveforms were detected during the framing two-month period. The inset in the upper left shows the temporal evolution of the earthquake magnitudes indicating a swarm-type behavior rather than a mainshock-aftershock sequence. In the upper right the S-P times are plotted indicating that no major internal migration of hypocenters was identified.

kann durch Änderungen in der Differenz der Ankunftszeiten von Scher- und Primärwelle (S-P time) festgestellt werden. Diese variiert im Fall des Tuzla-Schwarms nur minimal, daher kann eine signifikante räumliche Veränderung der Seismizitätsverteilung während des Schwarms ausgeschlossen werden (Abb.4). Die weitere Auswertung dieser Daten am GFZ dauert an.

## Ausblick

Der systematische Einsatz von Bohrlochseismometern stellt heute trotz der beschriebenen substanziellen Vorteile nach wie vor die Ausnahme bei der Erdbebenüberwachung dar. Dies ist zuallererst durch hohe Bohrkosten, teure Spezialmesstechnik und in einer aufwendigen Installationslogistik begründet. Bestehende bohrlochgestützte seismische Langzeitinstallationen, unter anderem in Japan und Kalifornien, dokumentieren, dass ein Betrieb über Jahrzehnte möglich ist und die so gewonnenen Messdaten die Grundlage für aktuelle Forschung bilden. Erste Messdaten von kürzlich in der Marmara-Region installierten Bohrlochseismometer-Arrays im Rahmen des vom GFZ gemeinsam mit dem türkischen Katastrophenschutz AFAD koordinierten ICDP-GONAF-Projekts bestätigen den Nutzen von rauscharmen seismischen Registrierungen. Hier zeigt sich auch, dass international vernetzte Projektstrukturen, wie die Erdsystem-Observatorien des GFZ, eine wichtige Voraussetzung für wissenschaftlich motivierte Langzeitvorhaben darstellen.

## Literatur

- Bohnhoff, M., Bulut, F., Dresen, G., Eken, T., Malin, P. E., Aktar, M. (2013): An earthquake gap south of Istanbul. - *Nature Communications*, 4, 1999. DOI: <http://doi.org/10.1038/ncomms2999>
- Bulut, F., Bohnhoff, M., Ellsworth, W. L., Aktar, M., Dresen, G. (2009): Microseismicity at the North Anatolian Fault in the Sea of Marmara offshore Istanbul, NW Turkey. - *Journal of Geophysical Research*, 114, B9, B09302. DOI: <http://doi.org/10.1029/2008JB006244>
- Bulut, F., Ellsworth, W. L., Bohnhoff, M., Aktar, M., Dresen, G. (2011): Spatiotemporal Earthquake Clusters along the North Anatolian Fault Zone Offshore Istanbul. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 4, 1759-1768. DOI: <http://doi.org/10.1785/0120100215>
- Geli, L., Henry, P., Zitter, T., Dupré, S., Tryon, M., Ca atay, M. N., Mercier de Lépinay, B., Le Pichon, X., Sengör, A. M. C., Görür, N., Natalin, B., Uçarkus, G., Özeren, S., Volker, D., Gasperini, L., Burnard, P., Bourlange, S., the Marnaut Scientific Party (2008): Gas emissions and active tectonics within the submerged section of the North Anatolian Fault zone in the Sea of Marmara. - *Earth and Planetary Science Letters*, 274, 1-2, 34-39. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.047>
- Gutenberg, B., Richter, C. F. (1941): *Seismicity of the Earth*, (Geological Society of America Special Papers; 34), Geological Society of America, 126 p. DOI: <http://doi.org/10.1130/SPE34>
- Tunc, B., Caka, D., Irmak, T. S., Woith, H., Tunc, S., Baris, S., Özer, M. F., Lühr, B.-G., Günther, E., Grosser, H., Zschau, J. (2011): The Armutlu network: An investigation on seismotectonic setting of Armutlu-Yalova-Gemlik and surrounding regions. - *Annals of Geophysics*, 54, 1, 35-45. DOI: <http://doi.org/10.4401/ag-4877>

# In Teufels Küche – Bohrungen ins Innere von Vulkanen

Thomas Wiersberg, Samuel Niedermann, Martin Zimmer  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Volcanoes fascinate both scientists and the general public alike. Their hazard risk, their capability to provide unique samples from depth, and their geothermal potential renders them important targets for scientific drilling. To date, a total of seven ICDP volcano drilling projects have been in operation or completed, while several others are in planning. Here we report on the Hawaii Scientific Drilling Project HSDP (USA), the Unzen Scientific Drilling Project USDP (Japan) and the Campi Flegrei Deep Drilling Project CFDDP (Italy). The primary objective of the HSDP was to improve our knowledge of the processes within mantle plumes feeding hotspot volcanoes such as Hawaii or Yellowstone. Noble gas isotope studies on olivine from drill core samples revealed important information on the evolution of the Hawaii plume in time and space. USDP has addressed fundamental scientific questions on the structure and growth history of the Unzen volcano and aimed to clarify the eruption mechanism. Online gas monitoring during drilling into the magma conduit has demonstrated that degassing and fluid circulation in the magma conduit are major factors governing the eruptions of Unzen. The substructure of the Campi Flegrei caldera is the target of CFDDP. This project aims to better understand volcanism associated with large calderas and to study the interaction between magmatic and geothermal systems as well as the role of fluids in the generation of seismic unrest, ground uplift and eruptions.*



Vulkane faszinieren Laien wie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gleichermaßen und sind wichtige Forschungsobjekte für unterschiedliche wissenschaftliche Untersuchungen. Vulkanausbrüche können je nach Art und Stärke Auswirkungen auf unseren Lebensraum und das Klima von regionaler bis globaler Skala haben, jedoch ist unser Wissen zur Vorhersagbarkeit von Vulkanausbrüchen begrenzt und hängt vom Vulkantyp und letztendlich vom einzelnen Vulkan ab. Vulkane fördern Material aus großen Tiefen an die Erdoberfläche, das sonst nicht der Wissenschaft zugänglich wäre. Es liefert wertvolle Informationen zum Aufbau und zur Entwicklung von Vulkanen sowie der Lithosphäre, Asthenosphäre und ggf. auch des tiefen Mantels. Die häufig an vulkanische Gebiete angeschlossenen hydrothermalen Reservoirs sind zudem für Untersuchungen zur geothermischen Energiegewinnung von Interesse.

Die Vulkanforschung beschäftigte sich in der Vergangenheit vor allem mit Untersuchungen von und an der Erdoberfläche. Magmenbildung und Magmenaufstieg, d.h. Prozesse, welche zur Entstehung sowie zum Ausbruch eines Vulkans führen, laufen jedoch in der Tiefe ab. Letztlich kann ein besseres Verständnis dieser Prozesse, welches auch die Grundlage für eine mögliche Vorhersagbarkeit von Ausbrüchen darstellt, nur durch Untersuchungen in und an Proben aus der Tiefe gewährleistet werden. Das am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ angesiedelte Internationale Kontinentale Wissenschaftliche Bohrprogramm ICDP hat daher Vulkane als ein wichtiges Untersuchungsziel wissenschaftlicher Bohrkampagnen identifiziert. Bohren in aktive Vulkane kann aufgrund des erhöhten thermischen Gradienten eine Herausforderung sowohl an Bohrwerkzeug und Messgeräte als auch an die Bohrspülung darstellen. Die Bohrspülung zirkuliert während des Bohrens im Bohrloch (vgl. Artikel von Harms in diesem Heft), um Bohrwerkzeug und Messgeräte zu kühlen und kann sich im Extremfall so stark erhitzen, dass sie auf dem Weg zur Erdoberfläche zu sieden beginnt. Sie muss dann an der Oberfläche kondensiert und gekühlt werden. Sollte beim Bohren in Vulkane flüssiges Magma angetroffen werden, so muss die Bohrung unterbrochen werden. Es ist jedoch sehr unwahrscheinlich, dass dadurch ein Vulkanausbruch ausgelöst wird. Einen Risikofaktor stellt der unkontrollierte Zutritt von

gespannten Fluiden und Gasen in das Bohrloch dar, welcher jedoch mithilfe einer Bohrspülung hoher Dichte sowie sogenannter „Blowout-Preventer“, d.h. Absperrventile direkt über dem Bohrloch, kontrolliert werden kann.

Bis heute wurden im Rahmen von ICDP-Projekten sieben Bohrungen in bzw. an Vulkanen niedergebracht (Abb. 1), weitere sind in Planung. Im Folgenden werden drei Beispiele von wissenschaftlichen Bohrungen in Vulkane näher vorgestellt, an denen das GFZ beteiligt ist: Mauna Kea auf Hawaii (USA) als Vertreter des sogenannten Hotspot-Vulkanismus, Unzen (Japan), ein Schichtvulkan des pazifischen Feuerrings, sowie Campi Flegrei (Italien), ein Calderavulkan 20 km westlich von Neapel.

### ICDP Hawaii Scientific Drilling Project

Die Vulkankette der Hawaii-Inseln ist das klassische Beispiel für Intraplatten-Vulkanismus, der durch den Aufstieg basischer Schmelzen aus dem tiefen Erdmantel verursacht wird. Geophysikalische und geochemische Untersuchungen legen nahe, dass die Quelle dieses sogenannten „Mantel-Plumes“ im unteren Erdmantel liegt. Da sich hier die Pazifische Platte über den stationären Plume hinwegbewegt, verschiebt sich dessen relativer Austrittspunkt auf der Platte im Lauf der Jahrmillionen, was zur Bildung einer Inselkette mit von Südosten nach Nordwesten zunehmendem Alter geführt hat. Aktuell konzentriert sich die vulkanische Aktivität auf die Hauptinsel von Hawaii und dort insbesondere auf die Vulkane Mauna Loa (Abb. 2) und Kilauea sowie den unter der Meeresoberfläche befindlichen Loihi Seamount. Der im Norden der Hauptinsel gelegene Mauna Kea hat die Hauptphase seiner Aktivität bereits beendet; sein letzter Ausbruch fand vor etwa 4500 Jahren statt.

Um die zeitliche Entwicklung eines Hawaii-Vulkans im Detail zu untersuchen und mehr über die Eigenschaften des Hawaii-Plumes sowie von Mantelplumes allgemein zu erfahren, wurde im Jahr 1993 in der Nähe der Stadt Hilo auf der Hauptinsel Hawaii eine 1056 m tiefe Pilotbohrung niedergebracht. Die dicht daneben abgeteufte ICDP-Hauptbohrung erreichte im Jahr 1999 3109 m und wurde zwischen 2003 und 2007 auf 3519 m vertieft. Beide Bohrungen förderten zunächst Laven des Mauna Loa, unterhalb 250 bis 280 m Tiefe dann Lavaabfolgen des Mauna Kea. Bis 1090 m Tiefe handelt es sich um subaerisch eruptierte Laven, darunter wurden submarine Ablagerungen (Hyaloklastite und Kissenlaven) erbohrt.

Am GFZ wurden aus den Bohrkernen Olivine separiert (Abb. 3) und an diesen die Konzentrationen und Isotopenzusammensetzungen aller stabilen Edelgase untersucht. Edelgase sind ausgezeichnete Tracer für die Herkunft von Magmen sowie für die

*Links: Untersuchungen am Vulkan „Solfatara“ im Vorfeld der Tiefbohrung in der Campi-Flegrei-Caldera in Italien (Foto: T. Wiersberg, GFZ)*

*Left: Site survey at the “Solfatara” volcano in preparation of the deep drilling campaign in the Campi Flegrei Caldera, Italy*



**Kontakt: T. Wiersberg**  
(thomas.wiersberg@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Laufende und beendete ICDP-Vulkanbohrprojekte; von West nach Ost: Koolau (Hawaii), Mauna Kea (Hawaii), Long Valley (Kalifornien), Snake River Plain (Idaho), Krafla (Island), Campi Flegrei (Italien), Unzen (Japan)

Fig. 1: Running or completed ICDP volcano drilling projects from west to east: Koolau (HI, USA), Mauna Kea (HI, USA), Long Valley (CA, USA), Snake River Plain (ID, USA), Krafla (Iceland), Campi Flegrei (Italy), Unzen (Japan)



Abb. 2: Blick vom Mauna Kea (4205 m) auf den breiten Rücken des Mauna Loa (4170 m) auf der Hauptinsel Hawaii. Während Mauna Loa sich noch in der Hauptphase seiner Aktivität („Schildaufbauphase“) befindet, hat Mauna Kea diese bereits beendet, was sich u. a. an den im Vordergrund sichtbaren Schlackekegeln zeigt. (Foto: S. Niedermann, GFZ)

Fig. 2: View from Mauna Kea (4205 m) to the broad ridge of Mauna Loa (4170 m) on the Big Island of Hawaii. While Mauna Loa is still in its main activity phase (“shield building stage”), Mauna Kea has already ended that phase, as shown e.g. by the presence of cinder cones visible in the front.

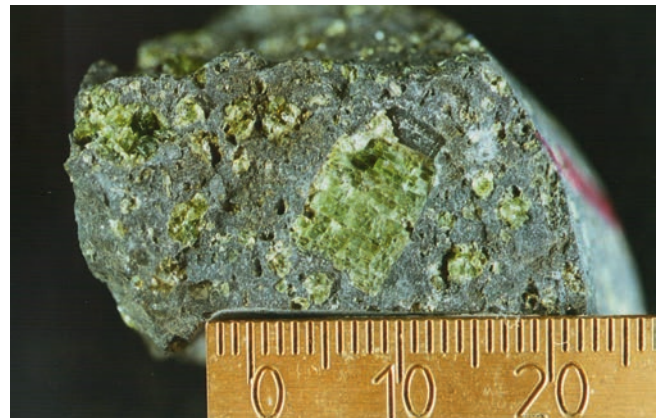


Abb. 3: Ansicht einer Bohrkernprobe mit in das Basaltgestein eingebetteten, bis zu zentimetergroßen Olivinkristallen. Olivine sind ausgezeichnete Edeltgasspeicher, welche die ursprünglichen Isotopenzusammensetzungen über geologische Zeiträume konservieren. (Foto: GFZ)

Fig. 3: View of a drill core sample with up to centimeter-sized olivine crystals embedded in the basalt matrix. Olivines retain noble gases very well, conserving their original isotope compositions over geological timescales.

Prozesse, denen diese beim Aufstieg zur Erdoberfläche ausgesetzt waren, wie etwa Aufschmelzen, Entgasung und Mischung mit anderen Komponenten. Im Folgenden soll dies anhand der Isotopendaten von Helium und Neon vorgestellt werden.

Hawaii ist gemeinsam mit Island bekannt für sehr hohe Isotopenverhältnisse von  $^3\text{He}/^4\text{He}$  bis zu etwa  $35 R_A = 1,39 \times 10^{-6}$  ( $R_A$  ist das  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis in Luft). Im Gegensatz dazu zeigen mittelozeanische Rückenbasalte (MORB), die typisch für den

konvergierenden oberen Erdmantel sind, weltweit  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse um  $8 R_A$ , während in der Kruste sehr geringe Werte um  $0,01 R_A$  gemessen werden. Ähnliche, wenn auch weniger deutliche Unterschiede gibt es in den Isotopenzusammensetzungen von Neon, Argon und Xenon.

Abb. 4a zeigt die  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse gegen die Tiefe; zusätzlich zu den eigenen Ergebnissen sind auch Literaturdaten dargestellt (Kurz et al., 1996, 2004; DePaolo et al., 2001).



Auffallend ist, dass sowohl im Mauna-Loa-Bereich als auch im subaerischen Teil der Mauna-Kea-Laven die  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse von zunächst MORB-ähnlichen Werten um  $8 R_A$  mit der Tiefe, d. h. mit dem Alter ansteigen. Unterhalb von etwa 800 m zeigen Mauna-Kea-Laven etwa 11 bis  $12 R_A$ , abgesehen von einigen erhöhten Werten bis  $>20 R_A$  insbesondere zwischen 2000 und 2600 m. Diese Beobachtung kann durch einen „zonierten Plume“ erklärt werden: Die für Hawaii charakteristische Isotopensignatur tritt nur im Zentrum des Plumes in reiner Form auf. Dort liegt heute der submarine Vulkan Loihi Seamount. Vor einigen 100 000 Jahren war das Zentrum noch weiter westlich unter dem Mauna Loa; der nördlich davon gelegene Mauna Kea befand sich jedoch immer am Rand des Plumes, wo Material aus dem umgebenden oberen Mantel eingemischt wird. Daher erreichen Mauna-Kea-Laven nicht die hohen  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse wie einige Proben von Loihi und Mauna Loa. Es gab aber offenbar Phasen erhöhter Aktivität, in denen auch die Außenbereiche des Plumes stärker mit Material aus dem Zentrum versorgt wurden.

Das Modell eines zonierten Plumes kann auch andere geochemische Trends der Hawaii-Laven wie z. B. die Isotopensignaturen von Sr und Nd erklären, jedoch zeigen die Neon-Daten ein anderes Bild: Das Dreisotopendiagramm  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  gegen  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  (Abb. 5) zeigt für die Olivine trotz z. T. relativ großer Fehlergren-

zen deutlich, dass sich bis auf einen singulären Wert alle Daten entlang der „Loihi-Kilauea-Linie“ gruppieren, die Mischungen zwischen Luft-Neon und der für den Hawaii-Plume typischen Zusammensetzung entspricht. Dagegen zeigen die Proben keinerlei Hinweise auf einen Einfluss von MORB-Neon, wie es aufgrund der teilweise sehr MORB-ähnlichen Heliumdaten insbesondere im subaerischen Mauna-Kea-Bereich zu erwarten wäre. Um die Neon-Daten in Abhängigkeit der Bohrlochtiefe zeigen zu können, werden die  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnisse auf das Mantel-Endglied, definiert durch  $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}=12,5$ , extrapoliert. Das Ergebnis ist in Abb. 4b dargestellt: Es ist keine Tiefenabhängigkeit festzustellen, fast alle Daten gruppieren sich um den für Loihi und Kilauea typischen Wert.

Diese Edelgasstudie an Proben der Hawaii-Tiefbohrung zeigt, dass die geochemische Struktur des Hawaii-Plumes (und anderer Mantelbereiche) durch das relativ einfach zu messende Helium nicht ausreichend beschrieben wird, da seine Isotopenzusammensetzung leicht durch sekundäre Prozesse wie Schmelzbildung und Mischung mit externen Komponenten verändert wird. Neon ist gegen solche Veränderungen weit weniger anfällig und liefert daher bedeutende zusätzliche Informationen. Die vollständigen Ergebnisse aus den Bohrphasen von 1993 und 1999 zeigen *Althaus et al. (2003)*.

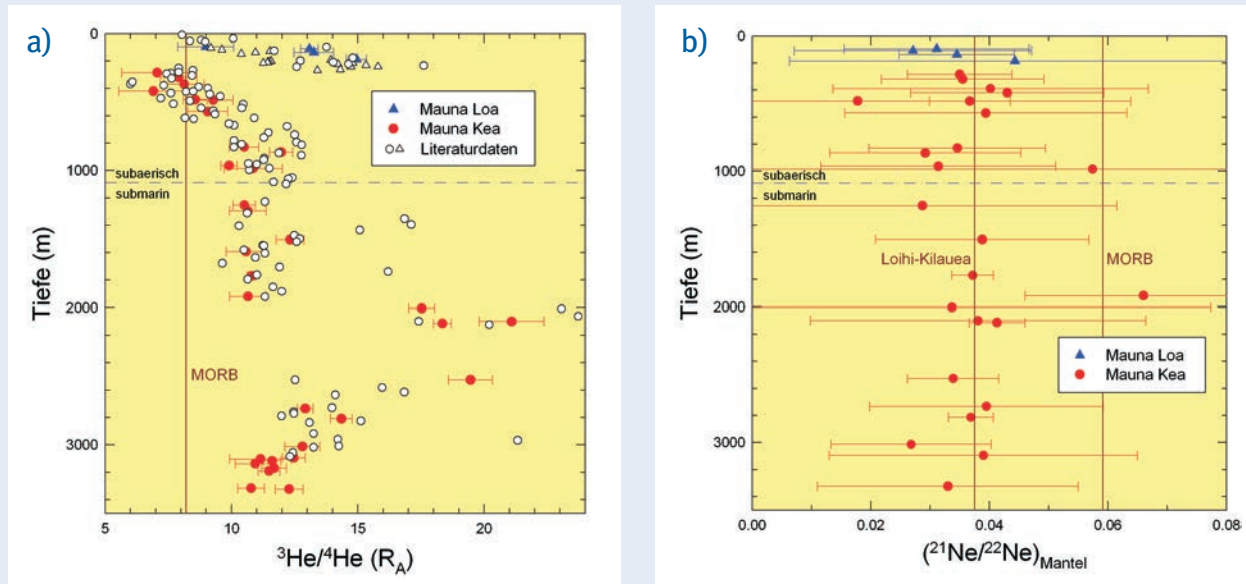


Abb. 4: Tiefenabhängigkeit von  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (a) und  $(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{Mantel}}$  (b) in den Bohrkernen der Hawaii-Tiefbohrungen.  $(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{Mantel}}$  ist das luftkorrigierte  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ -Verhältnis (siehe Text). Auffallend ist die starke Variation des Helium-Isotopenverhältnisses von MORB-ähnlichen zu höheren Werten, während die Neon-Daten über den gesamten Tiefenbereich im für Hawaii typischen Bereich verbleiben. Helium-Literaturdaten stammen von Kurz et al. (1996, 2004) und DePaolo et al. (2001). Eigene Daten sind mit  $2\sigma$ -Fehlergrenzen dargestellt.

Fig. 4: Depth dependence of  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (a) and  $(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{mantle}}$  (b) in the drill cores of the Hawaiian Scientific Drilling Project.  $(^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{mantle}}$  is the air-corrected  $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$  ratio (see text). Note the substantial variation of the helium isotope ratio from MORB-like to higher values, while neon data are constant at values typical for Hawaii over the whole depth range. Helium literature data are from Kurz et al. (1996, 2004) and DePaolo et al. (2001). Own data are shown with  $2\sigma$  error limits.

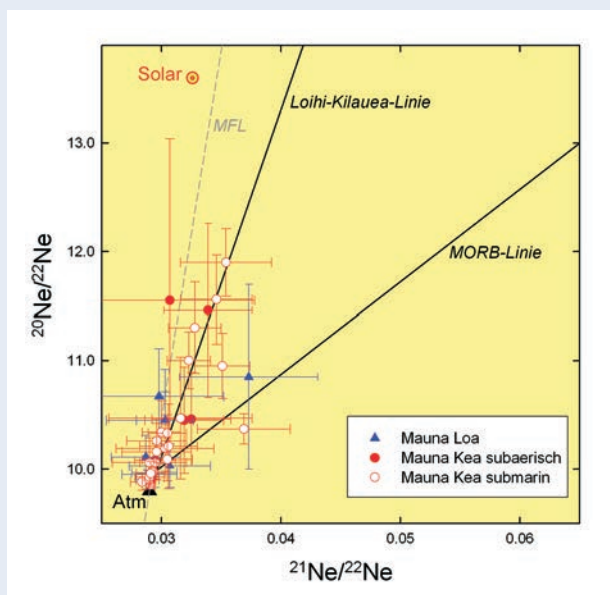


Abb. 5: Neon-Dreisisotopendiagramm für die Daten der Hawaii-Tiefbohrung mit  $2\sigma$ -Fehlergrenzen. Die Loihi-Kilauea-Linie repräsentiert Mischungen zwischen Luft-Neon und der für Hawaii typischen Zusammensetzung, die MORB-Linie zeigt Mischungen zwischen Luft und der Komponente in mittelozeanischen Rückenbasalten. Solares Neon und Luft-Neon (Atm) sowie die Massenfraktionierungslinie (MFL) sind ebenfalls eingezeichnet.

Fig. 5: Neon three-isotope plot for Hawaii Scientific Drilling Project data with  $2\sigma$  error limits. The Loihi-Kilauea line represents mixtures between air neon and the composition typical for Hawaii, the MORB line shows mixtures between air and the component found in mid-ocean ridge basalts. Solar and atmospheric (Atm) neon as well as the mass fractionation line (MFL) are shown also.

## ICDP Unzen Scientific Drilling Project

Der aufgrund seiner heftigen Eruptionen und der Nähe zu stark bevölkerten Gebieten von der UNESCO als Dekadenvulkan nominierte, 1360 m hohe Unzen liegt auf der Shimabara-Halbinsel auf Kyushu, der südlichsten der vier Hauptinseln Japans. Er entstand vor rund 500 000 Jahren am westlichen Ende des aktiven Beppu-Shimabara-Grabens und fördert hauptsächlich dazitische Magmen. Seine historischen Eruptionen waren durch dicke Lavaflüsse und Dombildung gekennzeichnet. Eine Lava-eruption am Gipfel führte 1792 zu einem großen Flankenabbruch ins Meer mit einem resultierenden Tsunami. Dieses Ereignis war die größte vulkanische Katastrophe in der Geschichte Japans und forderte 15 000 Menschenleben.

Vulkanischer Tremor westlich des Unzen zeugte nach 198 Jahren relativer Ruhe im Frühjahr 1990 von erneuter Aktivität. Innerhalb eines Jahres traten phreatische Eruptionen an mehreren Stellen

am Gipfel auf, die auf das Eindringen von frischem Magma in eine wahrscheinlich wassergesättigte Zone 1 bis 2,5 km unterhalb des Gipfels zurückgeführt wurden. 1991, etwa 18 Monate nach den ersten Erdbeben, trat Magma am Gipfel aus und bildete einen Lavadom, der über die nächsten vier Jahre kontinuierlich wuchs. Mehr als 10 000 pyroklastische Ströme entstanden in dieser Zeit, der größte erreichte am 3. Juni 1991 eine Länge von 4,3 km und tötete 43 Menschen in einer evakuierten Zone, darunter die bekannten Vulkanologen Katia und Mauris Krafft.

Nach der Eruptionsphase begann ein sechsjähriges umfangreiches ICDP-Bohrprogramm, um den Förderschlot von 1990 bis 1995 in mehr als 1 km Tiefe zu erkunden. In der ersten Phase des Forschungsvorhabens wurden zwei vertikale Bohrungen (USDP-1 mit 750 m und USDP-2, 1463 m) an der Ostflanke des Vulkans abgeteuf und teilweise gekernt, um die Struktur und Eruptionsgeschichte des Unzen zu erforschen. Im Anschluss an eine weitere Erprobungsbohrung wurde 2003 an der Nordflanke die Hauptbohrung (USDP-4) begonnen. Die bis zu  $75^\circ$  abgelenkte Bohrung traf in 1600 m den Schlot und erreichte im Juli 2004 die Endteufe von 1995 m bei einer vertikalen Tiefe unterhalb des Gipfels von 1500 m (Abb. 6).

Im Rahmen dieses ICDP-Bohrprojekts führte das GFZ beim Niederbringen von USDP-4 kontinuierliche Echtzeitanalysen der in der Bohrspülung gelösten Gasphase durch, um ein Tiefenprofil der Gasgehalte im Vulkangebäude zu erhalten und um Zuflusszonen zu detektieren. Das in der Bohrspülung gelöste Gas wurde dazu in einem Gas/Wasser-Separator mechanisch und unter leichtem Vakuum extrahiert. Die kontinuierliche Analyse des freigesetzten Gases erfolgte in einem Feldlabor direkt auf der Bohrlokation mit einem Quadrupol-Massenspektrometer und einem  $^{222}\text{Rn}$ -Alpha-Detektor (Abb. 7). Die Bohrspülungsgase bestanden aus gelöster Luft, Gasen, die mechanisch durch den Bohrmeißel aus den Gesteinen freigesetzt wurden und freien Gasen, die in das Bohrloch durch Klüfte eintraten.

Unsere Ergebnisse liefern einen Beitrag zum Verständnis des Entgasungsverhaltens des Unzen. Petrologische Untersuchungen zeigten, dass Unzen-Magma im Förderschlot rund 6 Gew.% Wasser enthält. Beim Ausfließen an der Oberfläche war aber nahezu kein Wasser mehr vorhanden. Nach Nakada et al. (1997) soll dieses magmatische Wasser in weniger als 1 bis 2 km Tiefe abgegeben werden und auf Brüchen und Klüften innerhalb des Vulkangebäudes zirkulieren.

Durch den Nachweis von Helium mit Mantelsignatur sowie von hohen  $\text{CH}_4$ -, He- und Rn-Konzentrationen und die Detektion von mehreren Fluidflüssen unterhalb 1470 m Bohrlochtiefe, die für ein effektives Entgasen des Magmas sprechen, konnte diese Theorie bestätigt werden. Der frühe Wasserverlust im Förderschlot führt zur Viskositätszunahme des Magmas, was folglich auch für die Dombildung am Unzen verantwortlich ist. Die Existenz mehrerer signifikanter Zuflusszonen zeigt, dass sich Lösungen und Gase innerhalb des Vulkangebäudes frei bewegen. Die Detektion die-

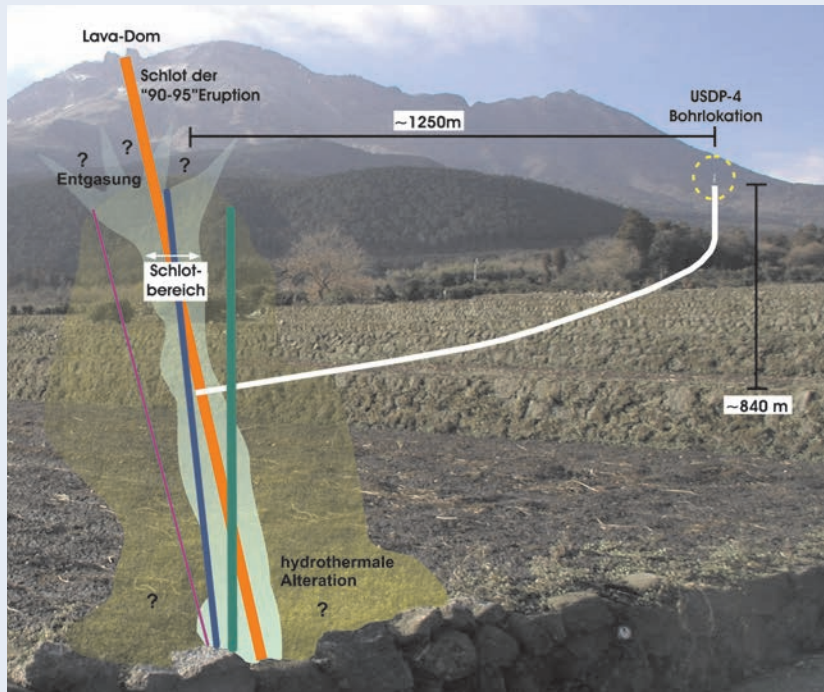


Abb. 6: Modell des Unzen mit Flankenbohrung USDP-4 (Foto: J. C. Eichelberger, Univ. of Alaska Fairbanks, USA)

Fig. 6: Schematic model of Unzen including the USDP-4 borehole

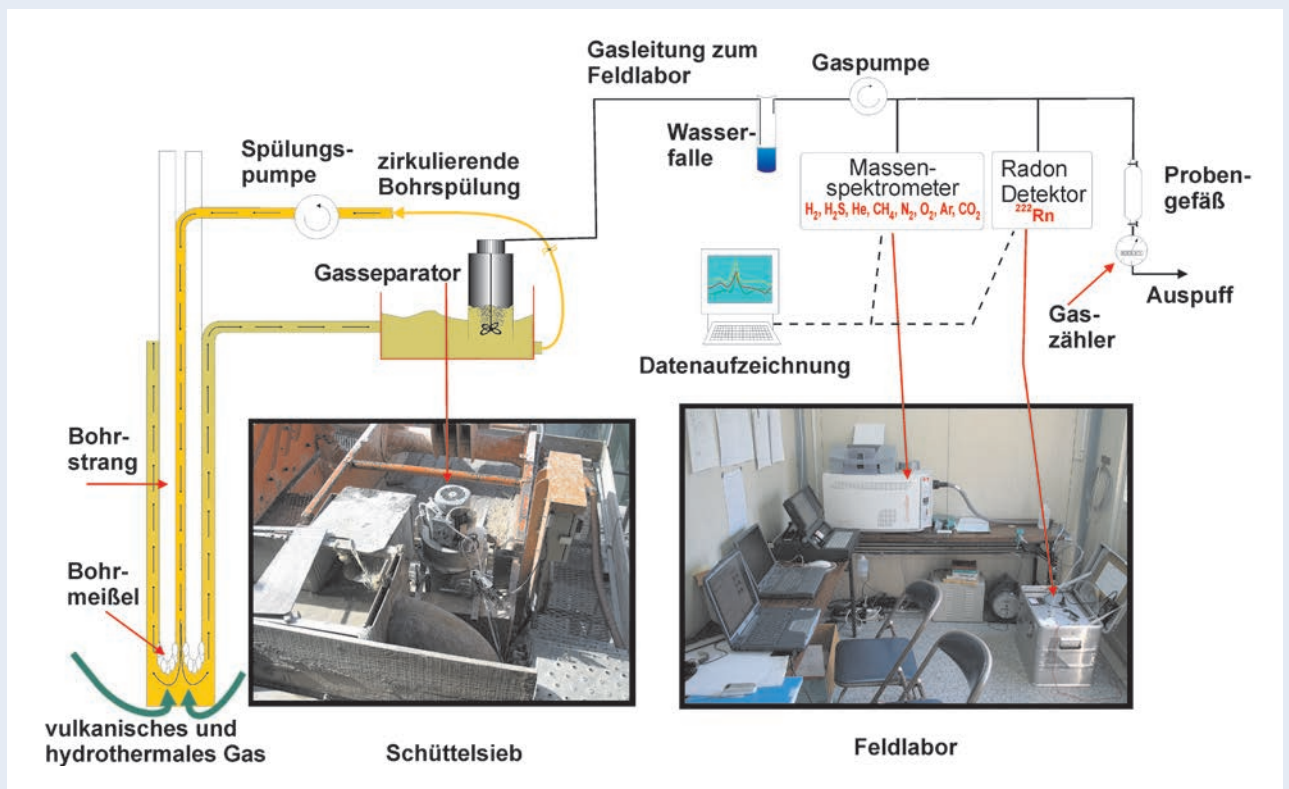


Abb. 7: Experimenteller Aufbau der Gasmesseinrichtung auf dem Bohrplatz

Fig. 7: Setup of the on-site gas-monitoring assembly

ser hydrothermalen Fluide unterstützt ein Modell von *Fujimitsu et al. (2008)*, das intensive hydrothermale Zirkulation für Temperaturen von etwa 175 °C im erbohrten Förderschlot von 1990 bis 1995 verantwortlich macht; deutlich geringer als prognostizierte Werte (500 bis 600 °C). Eine pyritreiche, hydrothermal alterierte Zone wurde ab Erreichen des Förderschlots in 1600 m Tiefe durch die kontinuierlich zunehmende H<sub>2</sub>S-Konzentration angezeigt (*Tretner et al., 2008*).

Bohrungen in einen aktiven und gut untersuchten Vulkan erschließen die Möglichkeit, *In-situ*-Untersuchungen durchzuführen, Gesteins- und Fluidproben zu sammeln sowie deren Tiefenverteilung zu messen. Durch die Unzen-Förderschlotbohrung und die wissenschaftlichen Begleitexperimente konnten prinzipielle Fragestellungen des Entgasungsverhaltens, des Eruptionsmechanismus und des Abkühlungsverhaltens geklärt werden, die für das Verständnis magmatischer Prozesse und damit für die Minimierung vulkanischer Gefahren essentiell sind.

### ICDP Campi Flegrei Deep Drilling Project

Große, kesselförmige Krater, sogenannte Calderen, sind Zeugen des vermutlich gefährlichsten Typs von Vulkanismus auf der Erde. Eine Caldera entsteht durch explosionsartiges Entleeren einer großen Magmenkammer, wobei bis zu mehrere hundert Kubikkilometer an Material freigesetzt werden. Dabei wird das über der Magmenkammer liegende Deckgestein entweder durch den Ausbruch weggesprengt oder stürzt unmittelbar nach dem Ausbruch ein und erzeugt so die typische Kesselstruktur, die Durchmesser von über 50 km aufweisen kann.

Die Campi-Flegrei-Caldera (Campi Flegrei = Brennende Felder) hat einen Durchmesser von rund 14 km und liegt etwa 20 km westlich von Neapel in der süditalienischen Region Kampanien. Geochemisch unterscheidet sich die Campi-Flegrei-Caldera vom benachbarten Vesuv sowohl in der Zusammensetzung rezenter Fluide und Gase als auch im geförderten Material vergangener Eruptionen. Dennoch gibt es geophysikalische Hinweise, dass die Magmenkammern beider Vulkane miteinander wechselwirken.

Der früheste Ausbruch der Caldera, datiert auf 37 000 v. Chr., setzte bis zu 200 km<sup>3</sup> Ignimbrit frei. Dieser Ausbruch wird als Ursache eines Klimawandels (Heinrich-Event IV), der zum Aussterben der Neandertaler führte, diskutiert. Ein weiterer Ausbruch vor etwa 15 000 Jahren ließ das Innere der Caldera um mehrere hundert Meter einstürzen. Vor etwa 4 000 Jahren entstand in der Caldera ein neuer Vulkan, die Solfatara. Die letzten magmatischen Aktivitäten der Caldera im Jahr 1538 führten zur Entstehung und Eruption des Monte Nuovo. Die Fumarolen „Bocca Grande“ und „Bocca Nuova“ in der Solfatara sowie das Fumarolenfeld in Pisciarelli an der östlichen Flanke der Solfatara belegen jedoch eindrucksvoll, dass die Caldera weiterhin aktiv ist. Campi Flegrei war in der jüngeren Vergangenheit Schauplatz seismischer Aktivitäten und zweier intensiver Hebungsphasen (1968 bis 1972 sowie 1982 bis 1984), in denen sich der Untergrund innerhalb weniger Jahre um jeweils knapp 2 m hob. Beide Hebungsphasen waren begleitet von Temperaturerhöhungen der Fumarolen, erhöhten Anteilen an Gasen magmatischer Herkunft, Anomalien im Schwerfeld sowie Schwarmbeben. Regelmässige Variationen in der Zusammensetzung der Gase korrelieren mit Gezeiten (Abb. 8), welche

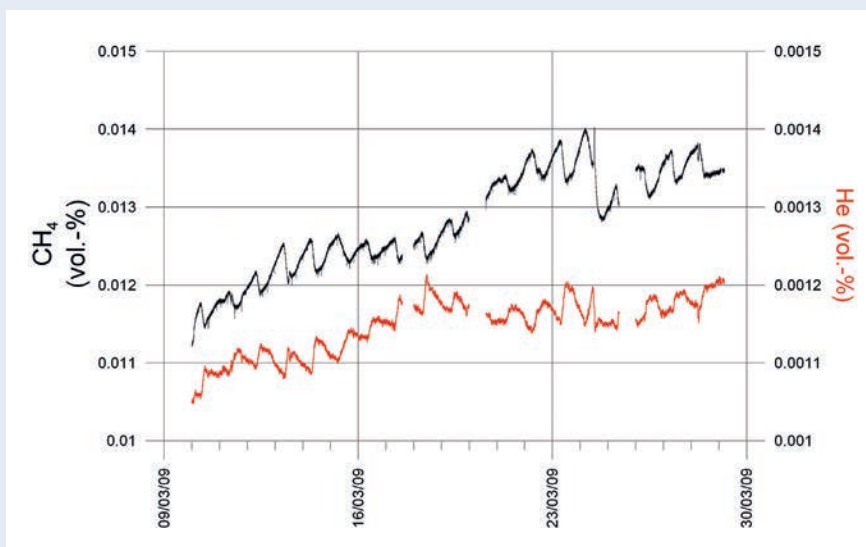


Abb. 8: Tagesschwankungen der Gaszusammensetzung während einer dreiwöchigen Messkampagne am Fumarolenfeld in Pisciarelli. Der allgemein ansteigende Trend deutet entweder verstärkte vulkanische Aktivitäten oder gezeitenbedingte monatliche Schwankungen an. Rot: Helium (magmatisch), schwarz: Methan (hydrothermal). Modifiziert von Wiersberg et al. (2009)

Fig. 8: Daily variations in the gas composition during a three week gas monitoring survey in the Pisciarelli fumarolic field. The generally increasing trend is either due to intensified volcanic activities or monthly tidal variations. Red: helium (magmatic), black: methane (hydrothermal). Modified from Wiersberg et al. (2009)

auch seismische Aktivitäten im Hydrothermalfeld der Campi-Flegrei-Caldera verursachen (De Lauro et al., 2013).

Die Ursache der Bewegungen im Untergrund und ein möglicher Zusammenhang mit dem Zufluss neuen Magmas in die Magmenkammer ist Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Allgemein wird angenommen, dass sich beim Aufstieg heiße, magmatische Fluide (überwiegend CO<sub>2</sub>) mit kalten, meteorischen Wässern (d.h. versickernden Oberflächenwässern) in einer Tiefe von etwa 2000 bis 2500 m mischen (De Natale et al., 2001; Troise et al., 2007). In dieser Tiefe wurden auch die Hypozentren der Schwarmbeben lokalisiert. Die eigentliche Magmenkammer wird anhand seismischer Messungen in mindestens 6 km Tiefe vermutet.

Das ICDP-Projekt Campi Flegrei Deep Drilling (CFDDP) will offene Fragen zum Calderenvulkanismus mithilfe zweier Bohrungen in der Campi-Flegrei-Caldera näher untersuchen. Eine 3 bis 4 km tiefe Bohrung soll am östlichen Rand der Caldera abgelenkt werden, welche sich unterhalb des Golfs von Pozzuoli befindet. Bohrkerne sowie Fluid- und Gasproben aus dem Bohrloch sollen wertvolle Informationen über Fluidtransport und -zirkulation sowie Wechselwirkungen mit anstehendem Gestein liefern. Für Langzeitmessungen wird das Bohrloch mit hochtemperaturfester faseroptischer und konventioneller Sensorik zur Bestimmung von Wärmefluss, seismischer Aktivität, Stressfeld und weiteren Parametern ausgestattet, deren Entwicklung einen weiteren Schwerpunkt des Projekts darstellt. Eine 500 m tiefe, senkrechte Vorbohrung wurde im Jahr 2012 in zwei Phasen erfolgreich niedergebracht. Befürchtungen, dass die Bohrung vulkanische Aktivitäten auslösen könnte, erwiesen sich, wie im Vorfeld untersucht, als unbegründet. Das GFZ war an der Vorbohrung durch Messungen zur Geochemie von Gasen, die beim Bohren gefördert wurden, beteiligt (näheres zur Methode im Abschnitt über Unzen). Hierbei ergab sich ein insgesamt sehr geringer Gasgehalt in der Tiefe, in der CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> dominieren. Gaszutritte hängen von der Porosität der durchteuften Gesteinsschichten ab, ein Zufluss durch Risse und Spalten spielt keine Rolle. Die Ergebnisse sind ein erster Hinweis darauf, dass die Hebungen ihre Ursache nicht in variablen Permeabilitäten im flachen Untergrund bis 500 m Tiefe haben. Geplante Gasuntersuchungen beim Abteufen der Hauptbohrung, die in den nächsten Jahren geplant ist, können weitere wichtige Hinweise zum Ursprung der Fluide und ihrer Bewegung im Untergrund liefern und letztlich die Frage klären helfen, ob und wie magmatische Volatile im Hydrothermalfeld die Hebungsprozesse an der Oberfläche beeinflussen.

## Ausblick

Wissenschaftliche Bohrungen in Vulkanen sind Unternehmungen am Rand des gegenwärtig technisch Möglichen und Machbaren, liefern aber auch einzigartige Einblicke in Aufbau und

Entwicklung von Vulkanen. Zusammen mit Methoden der Geochemie, Petrologie, Geophysik sowie luft- und satellitengestützten Messungen, die ebenfalls von Forscherinnen und Forschern am GFZ weiterentwickelt und angewendet werden, ergibt sich so ein detailliertes Bild der untersuchten Vulkane von der Erdoberfläche bis in den Erdmantel und der ablaufenden Prozesse auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen. Dieses Wissen kann helfen, die unmittelbar von Vulkanen ausgehenden Gefahren für die Bevölkerung zu erkennen und zu minimieren.

## Literatur

- Althaus, T., Niedermann, S., Erzinger, J. (2003): Noble gases in olivine phenocrysts from drill core samples of the Hawaii Scientific Drilling Project (HSDP) pilot and main holes (Mauna Loa and Mauna Kea, Hawaii). - *Geochemistry Geophysics Geosystems* (G3), 4, 1, 1-22. DOI: <http://doi.org/10.1029/2001GC000275>
- DePaolo, D. J., Bryce, J. G., Dodson, A., Shuster, D. L., Kennedy, B. M. (2001): Isotopic evolution of Mauna Loa and the chemical structure of the Hawaiian plume. - *Geochemistry Geophysics Geosystems* (G3), 2, 7, 2000GC000139. DOI: <http://doi.org/10.1029/2000GC000139>
- De Lauro, E., De Martino, S., Falanga, M., Petrosino, S. (2013): Synchronization between tides and sustained oscillations of the hydrothermal system of Campi Flegrei (Italy). - *Geochemistry Geophysics Geosystems* (G3), 14, 8, 2628-2637. DOI: <http://doi.org/10.1002/ggge.20149>
- De Natale, G., Troise, C., Pingue, F. A. (2001): A mechanical fluid-dynamical model for ground movements at Campi Flegrei caldera. - *Journal of Geodynamics*, 32, 4-5, 487-517. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0264-3707\(01\)00045-X](http://doi.org/10.1016/S0264-3707(01)00045-X)
- Fujimitsu, Y., Ehara, S., Oki, R., Kanou, R. R. (2008): Numerical model of the hydrothermal system beneath Unzen volcano, Japan. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 1-2, 35-44. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.032>
- Kurz, M. D., Kenna, T. C., Lassiter, J. C., DePaolo, D. J. (1996): Helium isotopic evolution of Mauna Kea Volcano: First results from the 1-km drill core. - *Journal of Geophysical Research*, 101, B5, 11781-11791. DOI: <http://doi.org/10.1029/95JB03345>
- Kurz, M. D., Curtice, J., Lott III, D. E., Solow, A. (2004): Rapid helium isotopic variability in Mauna Kea shield lavas from the Hawaiian Scientific Drilling Project. - *Geochemistry Geophysics Geosystems* (G3), 5, 4, Q04G14. DOI: <http://doi.org/10.1029/2002GC000439>
- Nakada, S., Eichelberger, J. C., Shimizu, H. (1997): Report on Unzen International Workshop at Shimabara, May 26-29, 1997, Shimabara.
- Tretner, A., Zimmer, M., Erzinger, J., Nakada, S., Saito, M. (2008): Real-time drill mud gas logging at the USDP-4 drilling, Unzen volcano, Japan. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 1-2, 28-34. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.03.031>
- Troise, C., De Natale, G., Pingue, F., Obrizzo, F., De Martino, P., Tammaro, U., Boschi, E. (2007): Renewed ground uplift at Campi Flegrei caldera (Italy): new insight on magmatic processes and forecast. - *Geophysical Research Letters*, 34, 3, L03301. DOI: <http://doi.org/10.1029/2006GL028545>
- Wiersberg, T., Somma, R., Rocco, A., Quattrocchi, F., Zimmer, M., De Natale, G., De Natale, P., Boschi, E. (2009): Continuous in-situ measurements of volcanic gases at Pisciarelli-Phelgrea Field (Italy): a new experimental approach. (Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-6826, 2009), General Assembly European Geosciences Union (Vienna, Austria 2009).

# Hydraulische Stimulationskonzepte zur Entwicklung von Enhanced Geothermal Systems (EGS)

Günter Zimmermann <sup>1</sup>, Guido Blöcher <sup>1</sup>, Andreas Reinicke <sup>2</sup>, Fiorenza Deon <sup>1</sup>, Simona Regensburg <sup>1</sup>, Jeoung Seok Yoon <sup>1</sup>, Arno Zang <sup>1</sup>, Oliver Heidbach <sup>1</sup>, Inga Moeck <sup>1,3</sup>, Ernst Huenges <sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Shell Global Solutions International B.V.

<sup>3</sup> University of Alberta, Earth and Atmospheric Sciences, Edmonton, Kanada

*The scientific principles of reservoir engineering are a decisive key for an appropriate development of geothermal resources. Conventional geothermal resources cover a wide range of uses for power production and direct application. For unconventional systems a large scientific and industrial community has been involved in developing so-called Enhanced Geothermal Systems (EGS). The concept involves different ways to increase access to heat at depth by improving exploration methods, drilling and reservoir assessment technologies for deep geothermal resources, and ultimately the stimulation of low-permeability reservoirs. These stimulation treatments are a well established and well understood method with long experience in the oil and gas industry. They should be designed individually depending on the reservoir rock properties, stratigraphic sequences, and structural geological setting to achieve the best results in terms of developing an appropriate down hole heat exchanger and a strategy to reduce the risk of undesired seismic events. Designing a special concept of the well path, including sub horizontal sections in the reservoir and special alignment according to the stress field, offers the possibility for multiple fracture treatments in a well to develop the geothermal field. In case of generating mostly tensile fractures with minor shear displacement, sustainability of fracture opening can be assured by adding proppants (meshed sand or man-made ceramics). A cyclic injection design in combination with the multi-frac concept tends to produce less seismic events with significant lower total seismic energy release if compared to a constant flow rate and a single fracture treatment.*



Die nachhaltige und umweltverträgliche Nutzung des unterirdischen Raums gehört zu den gesellschaftlichen Herausforderungen, denen sich das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ in den Programmbereichen „Erde und Umwelt“ und „Erneuerbare Energien“ der Helmholtz-Gemeinschaft stellt. Im Rahmen der für Deutschland angestrebten Energiewende, die eine strukturelle Kehrtwende in der Energieversorgung darstellen wird, spielen die Erneuerbaren Energien eine Schlüsselrolle. In diesem Kontext kann die Entwicklung der Geothermischen Technologie einen signifikanten Beitrag leisten.

Die Nutzung konventioneller geothermischer Ressourcen umfasst eine große Spanne unterschiedlicher Anwendungen von der direkten Wärmenutzung bis hin zur Stromerzeugung. Ist die thermische Leistung ohne ergänzende Maßnahmen für eine ökonomische Nutzung nicht ausreichend, spricht man von unkonventionellen geothermischen Ressourcen. Die effiziente Nutzung dieser Ressourcen ist Bestandteil der wissenschaftlichen und industriellen Forschung und lässt sich unter dem Begriff „Enhanced Geothermal Systems (EGS)“ zusammenfassen (Tester et al., 2006). Die ökonomische Nutzung von EGS kann durch Erforschung und Optimierung der einzelnen Teilsysteme erreicht werden. Dazu gehört die Kenntnis des geologischen Systems und der zugrundeliegenden Prozesse und Wechselwirkungen im System des „Bohrloch-Reservoirs“. Ein standortangepasstes Erschließungskonzept (z. B. Huenges, 2010) beinhaltet den Einsatz lokationsabhängiger Explorationsmethoden, innovativer Bohrtechnik und den Ausbau von gering permeablen geothermischen Reservoiren mit Hilfe von geeigneten Stimulationsmaßnahmen. Generell kann eine EGS-Lokation als ein System betrachtet werden, in dem eine kommerzielle Nutzbarmachung nur durch eine aktive Verbesserung der hydraulischen Durchlässigkeiten erreicht werden kann. Dieses wird durch geeignete Stimulationsmaßnahmen zur Produktivitätssteigerung erzielt, die standortspezifisch konzipiert und umgesetzt werden müssen.

Durch Stimulationsmaßnahmen werden neue künstliche Wegsamkeiten in Form von Rissen und Rissystemen geschaffen, die für die Erhöhung der Produktivität der Bohrungen in geringpermeablen geothermischen Reservoiren notwendig sind.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Stimulationsmaßnahme ist die Kenntnis bzw. Charakterisierung der Reservoireigenschaften, die mit Hilfe von Laboruntersuchungen an Kernmaterial, Bohrlochmessungen und Monitoring bestimmt werden. Ziel dieser Untersuchungen ist die quantitative Erfassung des hydraulischen Fließverhaltens, der Fluid-Gesteinswechselwirkung, der mechanisch-hydraulischen, thermisch-hydraulischen und chemischen Prozesse, des rezenten Spannungsfelds und der Bohrlochstabilität. Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass die geologische Formation derart beschaffen ist, dass das vertikale Risswachstum durch ein undurchlässiges Deckgebirge begrenzt wird, um mögliche Süßwasser-Kontaminationen auszuschließen.

Die Erfahrungen aus verschiedenen geothermischen Forschungsbohrungen weltweit haben gezeigt, dass der hydraulische Scherprozess und nicht die Erzeugung von Zugrissen der dominante Effekt ist, um geeignete Wegsamkeiten zu erzeugen. Die Erzeugung von Scher- bzw. Zugrissen hängt von der Klüftigkeit des Gesteins und deren Orientierung im rezenten Spannungsfeld ab. Natürliche Risse, auf die eine hohe Differentialspannung wirkt, besitzen ein potenziell höheres Scherversagen (Moeck et al., 2009). Aus diesem Grund sind Formationen mit einer hohen Spannungsanisotropie und damit hohen potenziellen Scherspannungen am besten für eine hydraulische Stimulation in geringpermeablen Gesteinen geeignet.

## Stimulationskonzepte

Für die Stimulation werden verschiedene Verfahren verwendet: die hydraulische, die thermische und die chemische oder auch Säurestimulation (z. B. Economides und Nolte, 2000). Während der hydraulischen Stimulation werden Fluide unter hohen Drücken in das Gebirge verpresst und neue Wegsamkeiten in Form von Rissen und Rissystemen generiert oder reaktiviert (Abb. 1). Hier wird zwischen Stimulationen mit Wasser (Wasserfrac), mit einem Gel-Stützmittelgemisch (Gel-Stützmittel-Frac) oder eine Kombination von beiden, welches als Hybrid-Frac bezeichnet wird, unterschieden. Die Wahl des anzuwendenden Verfahrens hängt von den Rahmenbedingungen im Reservoir und von den mit der Behandlung verbundenen Zielen ab.

Eine Wasserfrac-Stimulation wird in gering permeablen Gesteinen durchgeführt. Hierbei werden große Mengen Wassers – in der Größenordnung von 10 000 m<sup>3</sup> und mehr – verwendet und Risse mit Risslängen von bis zu mehreren hundert Metern erzeugt. Die nachhaltig erzeugte Rissöffnungsweite hängt vom erzielten Scherversatz ab und liegt in der Größenordnung von 1 mm. Die Fließrate während der Stimulation kann konstant gehalten oder auch variiert werden, z. B. durch zyklische Änderung (siehe Abb. 2). Dadurch kann die Rissausbildung gezielt

Links: Modifizierter Bohrerkopf für Stimulationsarbeiten und hydraulische Tests (Foto: G. Zimmermann, GFZ)

Left: Modified well head for stimulation treatments and hydraulic tests



Kontakt: G. Zimmermann  
(guenter.zimmermann@gfz-potsdam.de)

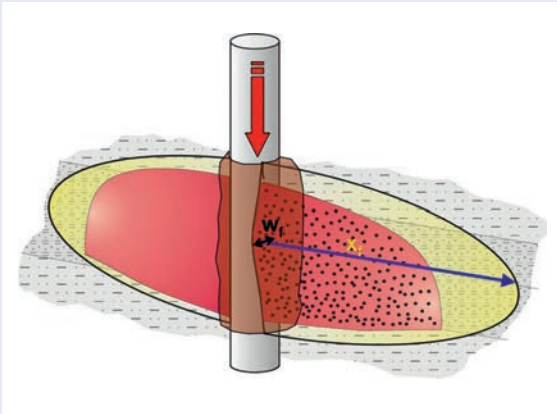


Abb. 1: Erzeugung eines Risses im Gebirge durch Injektion von Fluiden und Stützmitteln ( $w_f$  = Rissöffnungswide;  $x_f$  = Risshalbblänge; Abb.: GFZ)

Fig. 1: Fracture generation due to injection of fluids and proppants ( $w_f$  = fracture width;  $x_f$  = fracture half length)

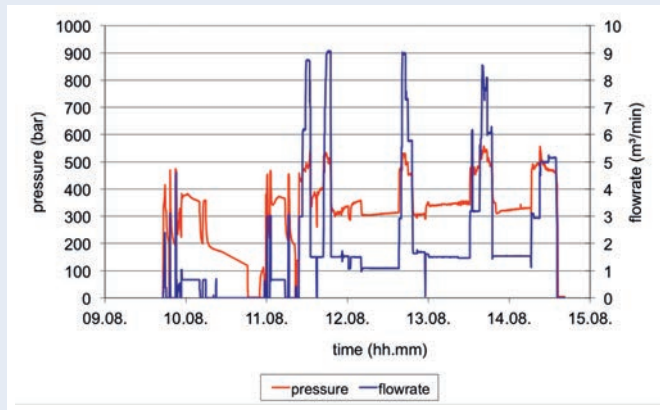


Abb. 2: Wasserfract-Stimulation mit zyklischer Variation der Fließrate (aus Zimmermann et al., 2010)

Fig. 2: Waterfrac treatment with cyclic variation of flow rate (from Zimmermann et al., 2010)

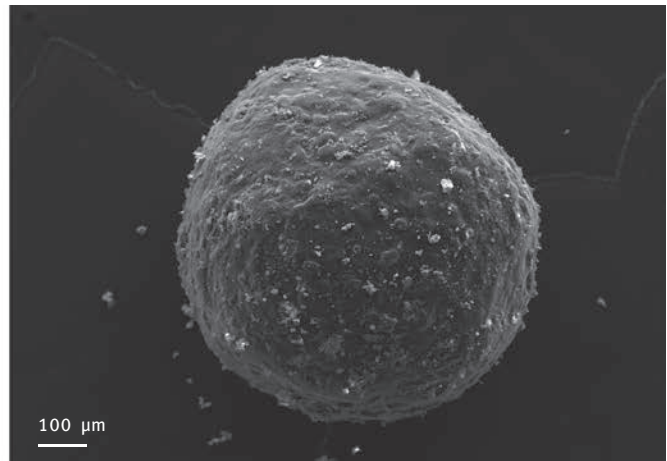
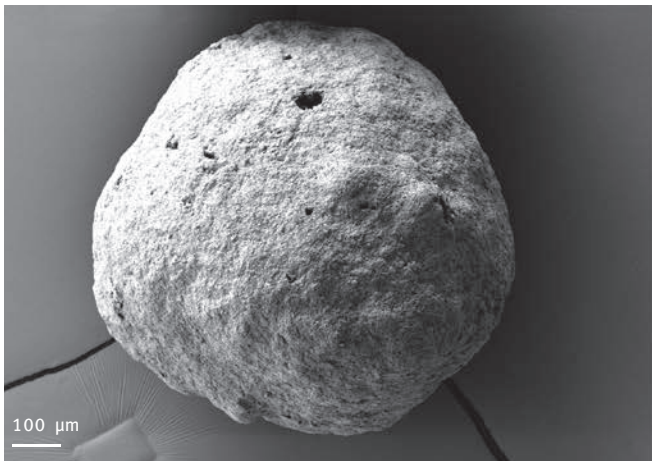


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen eines Stützmittels. Links: Korund-basiertes Stützmittel vor dem Einbringen in die Bohrung (aus Deon et al., 2013); rechts: zurückgeholtes Stützmittel nach jahrelangem Verbleib in der Bohrung

Fig. 3: Scanning electron microscope images of proppants. Left: corundum based proppant before positioning in the well (from Deon et al., 2013) right: retrieved proppant after several years in the well

beeinflusst werden. In Ergänzung zu der Wasserinjektion können in einem erweiterten Verfahren während hoher Fließraten Sand oder keramische Stützmittel zugegeben werden, die mit dem Wasser in die erzeugten Risse transportiert werden. Dieses wirkt unterstützend für das Offenhalten der Risse und damit für eine hohe Rissleitfähigkeit.

Gel-Stützmittelstimulationen werden durchgeführt, um den bohrlochnahen Bereich zu aktivieren und ein hochpermeables

Reservoir hydraulisch an eine Bohrung anzuschließen. Die erzeugten Risse sind im Allgemeinen gegenüber der Risserzeugung mit Wasser (Wasserfracs) kürzer (etwa 50 m), besitzen aber eine größere Öffnungswide. Diese kann je nach Stützmittelpackung bis zu 10 mm betragen. Die Stützmittel bestehen aus kugelförmigen, beschichteten oder unbeschichteten Keramiken (Abb. 3), die je nach Festigkeit anteilig aus Korund ( $Al_2O_3$ ) und amorphem  $SiO_2$  bestehen und einen Durchmesser von etwa 0,5 bis 2 mm besitzen. Ein wichtiger Aspekt bei



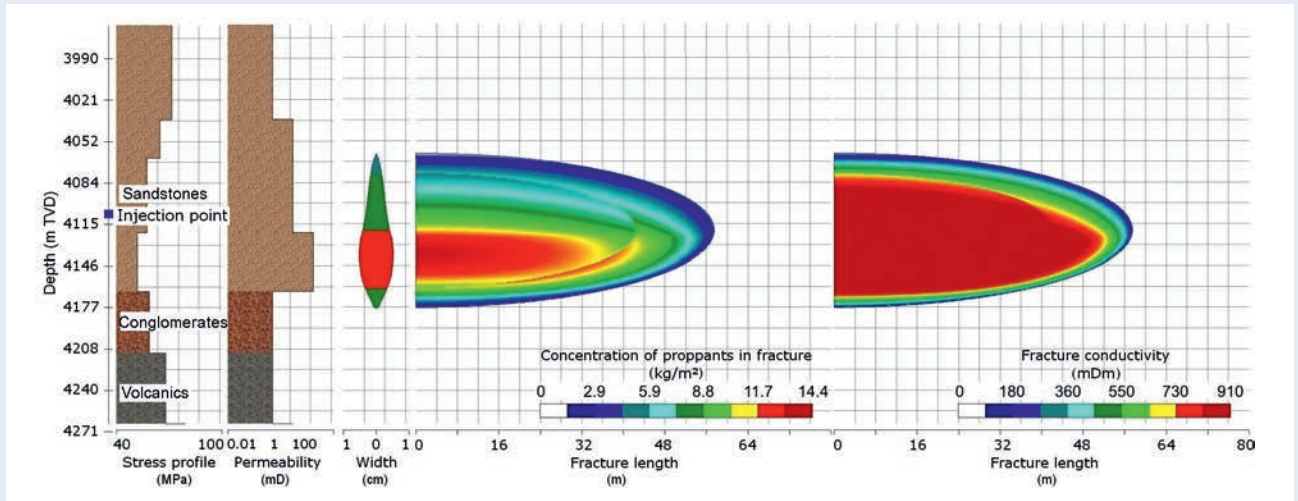


Abb. 4: Ergebnisse der Computersimulation eines Gel-Stützmittel-Fracs. Dargestellt ist die erzeugte Packungsdichte und zugehörige Rissleitfähigkeit der Stimulation (modifiziert aus Zimmermann und Reinicke, 2010).

Fig. 4: Results from the simulation of a gel-proppant frac. Illustration of the proppant concentration and the achieved fracture conductivity from the stimulation treatment (modified from Zimmermann and Reinicke, 2010).

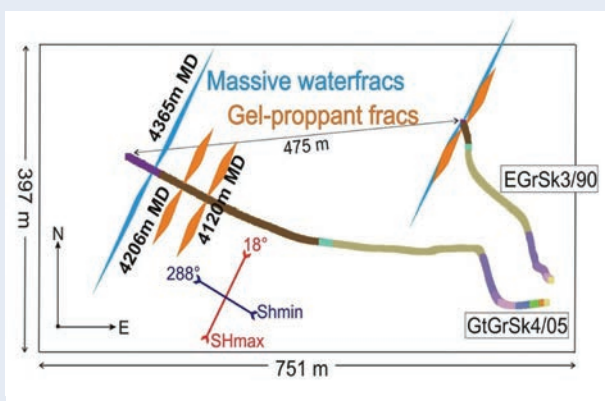


Abb. 5: Beispiel einer Multi-Frac-Behandlung in der Bohrung GrSk4/05 in Groß Schönebeck. Die Bohrung wurde in Richtung der kleinsten horizontalen Hauptspannung abgelenkt (in einem Abschiebungsregime), so dass sich die erzeugten Risse parallel anordnen.

Fig. 5: Example of a multi-frac treatment in the well GrSk4/05 of the Groß Schönebeck site. The well was drilled in the orientation of minimum horizontal stress (in a normal faulting regime) so that the fractures can be arranged in a parallel way.

diesem Typ von Stützmittel ist eine garantierte mechanische und chemische Integrität während der Zeit des Einsatzes, um ein Wiederverschließen der erzeugten Risse oder unerwünschte Reaktionen mit dem Reservoirfluid und daraus resultierende sekundäre Ausfällungen im Reservoir zu vermeiden (Deon et al., 2013). Der langjährige erfolgreiche Einsatz von Stützmitteln in einem Sandsteinreservoir konnte im Rahmen der GFZ-Geothermie-Forschungsplattform Groß Schönebeck gezeigt werden. Dort konnte ein kleiner Teil der Stützmittel wieder aus dem Bohrloch zurückgeholt werden, die keine Schäden trotz des langjährigen Verbleibs in der Bohrung aufwiesen (Abb. 3 rechts).

Die Stützmittel werden mit Hilfe von hochviskosen Gelen als Gemisch bis in die Risse transportiert. Nach erfolgreicher

Platzierung werden die Polymerketten des Gels durch einen retardierend wirkenden Zusatz gelöst und sorgen damit für eine Reduktion der Viskosität. So kann das Fluid wieder gefördert werden und die Stützmittel verbleiben im Riss.

Während einer typischen Stimulation werden Stützmittel in der Größenordnung von 10 bis 100 t mit Hilfe des hochviskosen Gels in den erzeugten Riss transportiert. Durch eine schrittweise Erhöhung der Stützmittelkonzentration kann eine optimale Packungsdichte im Riss erzeugt werden. Mit Hilfe von Computersimulationen kann vor einem Maßnahmebeginn die optimale Strategie für eine Stimulation ermittelt werden. Dabei werden Fließraten und Stützmittelkonzentrationen so lange zeitlich variiert, bis ein optimales Ergebnis erzielt wird

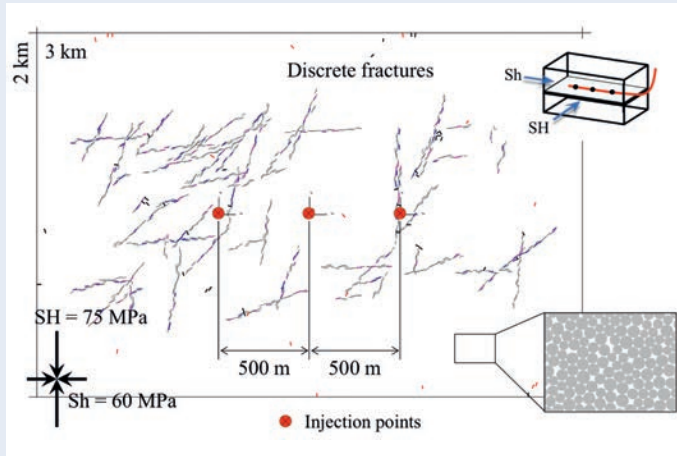


Abb. 6: Darstellung eines geklüfteten 2-D-Reservoirmodells. Die Modelldimensionen betragen 3 km x 2 km in einem anisotropen In-situ-Spannungsfeld mit den Horizontalspannungen  $SH=75$  MPa und  $Sh=60$  MPa. Die drei Injektionsbohrungen befinden sich im Abstand von jeweils 500 m zueinander.

Fig. 6: Representation of a fractured 2-D reservoir model. The model dimensions are 3 km x 2 km in an anisotropic in-situ stress field with the horizontal stresses  $SH=75$  MPa and  $Sh=60$  MPa. The three injection wells are located in a distance of 500 m to each other.

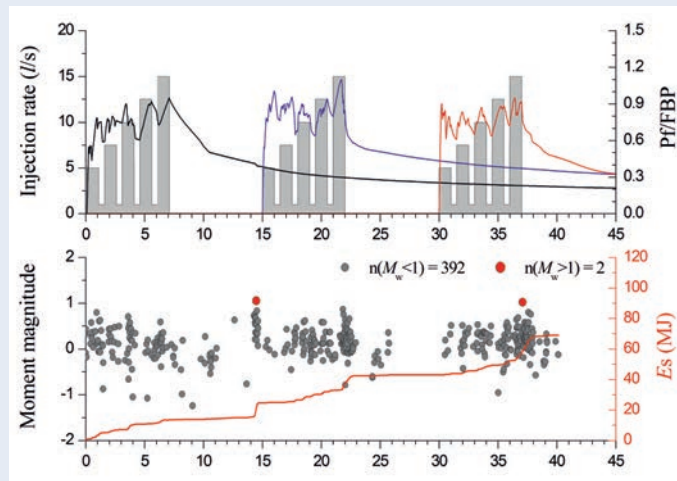


Abb. 7: Ergebnisse der Simulation mit zyklischer Injektionsrate. Dargestellt sind die Injektionsrate (Achse oben links), der auf den Formationsversagensdruck FBP normierte Fluiddruck an den drei Injektionspunkten (in unterschiedlichen Farben; Achse oben rechts), die Momenten-Magnitude  $M_w$  (Achse unten links) und die kumulative seismisch abgestrahlte Energie  $E_s$  (Achse unten rechts) der induzierten seismischen Ereignisse. Induzierte seismische Ereignisse mit  $M_w > 1$  sind mit roten Kreisen gekennzeichnet.

Fig. 7: Results from cyclic rate injection. Rate of injection (top left axis), fluid pressure normalized by the fracture breakdown pressure (FBP) at the three injection points (top right axis), moment magnitudes  $M_w$  (bottom left axis) and cumulative amount of seismic radiated energy  $E_s$  (bottom right axis) of the induced seismic events. Induced seismic events with  $M_w > 1$  are marked by red dots.

(Abb. 4). Um den Erfolg von Stimulationen zu bewerten, werden vor und nach einer Behandlung Fördertests durchgeführt. Das Verhältnis der Produktivitäten beider Tests ist ein Maß für den Erfolg und wird als Fold of Increase (FOI) bezeichnet.

## Multi-Riss-Konzept

Eine Möglichkeit der Vergrößerung der zu erzeugenden Wärmetauscherfläche im Reservoir bietet die Methode der multiplen Risserzeugung. Hier wird die Tatsache genutzt, dass sich Zugrisse mit zugehörigen Scherungsbrüchen hauptsächlich senkrecht zur kleinsten Hauptspannung ausbreiten und bohrt im Zielhorizont des Reservoirs eine geneigte oder horizontale Strecke in Richtung der kleinsten Hauptspannung. Indem einzelne Abschnitte dieses Teils der Bohrung isoliert und getrennt stimuliert werden, ist es möglich, mehrere Risse sukzessive in einer parallelen Anordnung zu generieren. Abbildung 5 zeigt die Vorgehensweise für drei nacheinander durchgeführte Stimulationsmaßnahmen am Standort Groß Schönebeck (Zimmermann et al., 2010). Mit dieser Methode können im Vergleich zu einer massiven Behandlung größere, effektive Rissflächen erzeugt werden. Gleichzeitig kann diese Vorgehensweise die dabei freigesetzte seismische Energie in kritisch gespannten Reservoirs deutlich reduzieren und somit auch die Auftretenswahrscheinlichkeit von spürbaren Ereignissen verringern.

Um die Mechanismen und Ausbreitung der Risse im Detail zu studieren, wurde ein konzeptionelles, zweidimensionales Reservoirmodell zur Simulation dieser multipel zu stimulierenden Rissysteme mit drei Bohrungen im Abstand von 500 m erstellt (Abb. 6, sogenanntes Multi-Frac-Konzept). Das Spannungsfeld ist anisotrop gewählt und es wurden nur die Horizontalspannungen berücksichtigt. Verschiedene Injektionsszenarien mit konstanten Raten wurden gerechnet und bezüglich der raum-zeitlichen Verteilung der induzierten Risse verglichen. Ziel ist die Optimierung von hydraulischen Stimulationen hinsichtlich der Generierung eines effektiven Wärmetauschers (Yoon et al., 2013).

## Vergleich von zyklischer Stimulation und Stimulation mit konstanten Fließraten

Es wurden verschiedene Parameterstudien mit Variationen der Injektionsparameter durchgeführt. Ziel dieser Sensitivitätsanalyse ist es herauszufinden, welche Parameter den größten Einfluss auf die Optimierung des Stimulationsprozesses und die Generierung des zu aktivierenden Volumens haben (siehe auch Zang et al., 2013). Zum Vergleich wurde der zeitliche Verlauf von zwei unterschiedlichen Szenarien simuliert. Zunächst erfolgte die simulierte Injektion bei konstanter Fließrate an drei unterschiedlichen Injektionspunkten im Reservoir. Im zweiten Experiment wurde eine zyklische Injektion mit Steigerung der Fließrate, ebenfalls an drei unterschiedlichen Injektionspunkten im Reservoir simuliert. Abbildung 7 zeigt die zyklische

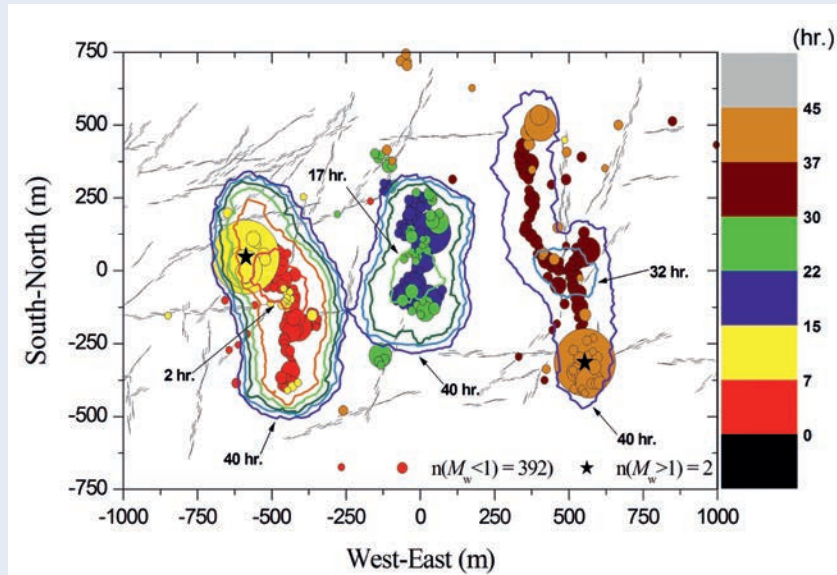


Abb. 8: Räumlich-zeitliche Verteilung der induzierten seismischen Ereignisse bei zyklischer Injektionsrate. Die unterschiedlichen Farben repräsentieren den zeitlichen Verlauf (in Stunden); die Größe der Kreise ist proportional zur seismischen abgestrahlten Energie  $E_s$ . Die Konturlinien zeigen die räumlich-zeitliche Entwicklung des Fluiddrucks.

Fig. 8: Spatio-temporal distributions of the induced events resulting from cyclic rate injection. Symbol color represents the time of occurrence (in hours) and size is proportional to the seismic radiated energy  $E_s$ . Spatio-temporal fluid pressure distribution is documented by the contour lines.

Simulation mit dem Verlauf des Fluidrucks an den Injektionspunkten, der Momenten-Magnitude, der abgestrahlten seismischen Energie, der eingebrachten hydraulischen Energie und der kumulativen seismischen Energie. Die räumliche Ausdehnung des aktivierten Volumens ist in Abb. 8 dargestellt.

Die Simulationen zeigen, dass bei zyklischer Injektion die Anzahl der seismischen Ereignisse geringer ist, als bei einer Injektion mit konstanter Fließrate. Darüber hinaus ist auch die Anzahl der Ereignisse, die einen bestimmten Schwellenwert überschreiten (hier  $M_w > 1$ ), für die zyklische Injektion geringer. Die abgestrahlte seismische Energie ist bei vergleichbarem Fluidvolumen ebenfalls bei der zyklischen Injektion geringer.

## Fazit und Ausblick

Hydraulische Stimulationen in EGS-Systemen werden gezielt, einmalig und kontrolliert eingesetzt, um wirtschaftlich sinnvolle Fließraten zur Nutzung von Erdwärme und zur Bereitstellung von grundlastfähigem Strom zu erzielen. Ein Ziel der Forschung im Bereich der geothermischen Technologieentwicklung am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ ist es, die Kontrollierbarkeit der Stimulationsmethoden für EGS-Systeme durch gezielte Maßnahmen weiter zu optimieren, die unerwünschten Nebeneffekte wie z.B. die induzierte Seismizität und damit die Eintretenswahrscheinlichkeit von deutlich spürbaren seismischen Ereignissen weiter zu reduzieren – bei gleichzeitiger Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. Zu diesem Zweck werden spezielle Stimulationstechniken wie die zyklische Stimulation und das Multi-Frac-Konzept betrachtet und die zugrundeliegenden Mechanismen mit Hilfe komplexer Modelle simuliert. Auf Grundlage dieser Forschungsergebnisse können auf die jeweiligen geothermischen Reservoirs optimal abgestimmte Stimulationsmaßnahmen geplant und umgesetzt werden, die das Risiko für das Eintreten spürbarer seismischer Ereignisse deutlich verringern.

## Literatur

- Deon, F., Regenspurg, S., Zimmermann, G. (2013): Geochemical interactions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based proppants with highly saline geothermal brines at simulated in situ temperature conditions. - *Geothermics*, 47, 53-60.  
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.02.003>
- Economides, M. J., Nolte, K. G. (2000): *Reservoir Stimulation*, 3rd ed., Wiley, 856 p.
- Huenges, E. (Ed.) (2010): *Geothermal Energy Systems: Exploration, Development and Utilization*, Weinheim: Wiley-VCH, 463 p.  
DOI: <http://doi.org/10.1002/9783527630479>
- Moeck, I., Kwiatek, G., Zimmermann, G. (2009): Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir. - *Journal of Structural Geology*, 31, 10, 1174-1182.  
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.06.012>
- Massachusetts Institute of Technology (2006): *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st century*, Massachusetts Institute of Technology, [https://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future\\_geo\\_energy.pdf](https://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future_geo_energy.pdf)
- Yoon, J. S., Zimmermann, G., Zang, A. (2013): Multi-fracturing in geothermal reservoir and induced seismicity using particle based, discrete element-fracture network model, 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (Stanford, USA 2013).
- Zang, A., Yoon, J. S., Stephansson, O., Heidbach, O. (2013): Fatigue hydraulic fracturing by cyclic reservoir treatment enhances permeability and reduces induced seismicity. - *Geophysical Journal International*, 195, 2, 1282-1287. DOI: <http://doi.org/10.1093/gji/ggt301>
- Zimmermann, G., Moeck, I., Blöcher, G. (2010): Cyclic waterfrac stimulation to develop an enhanced geothermal system (EGS): Conceptual design and experimental results. - *Geothermics*, 39, 1, 59-69.  
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.10.003>
- Zimmermann, G., Reinicke, A. (2010): Hydraulic stimulation of a deep sandstone reservoir to develop an Enhanced Geothermal System: Laboratory and field experiments. - *Geothermics*, 39, 1, 70-77.  
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.12.003>

# Überwachung der Bohrungsintegrität – Voraussetzung für die sichere und effiziente Nutzung geothermischer Energie

Thomas Reinsch und Jan Henniges  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Geothermal energy can play a major role within the future energy supply. For a safe and sustainable provision of geothermal energy, the structural wellbore integrity is an important issue. In order to monitor processes affecting the wellbore integrity, a fibre optic cable has been permanently installed behind the anchor casing of a geothermal well in Iceland. Distributed temperature sensing data has been recorded during the cementation of that casing as well as during the onset of a flow test. Together with numerical studies, temperature data from the cementation could be used to investigate the cement quality behind casing and evaluate the success of the cementation process. Data from the flow testing period could be used to identify a fracture evolution within the cemented annulus during the production of high temperature geothermal fluid. A process influencing the isolation of the cemented annulus, therefore, could be monitored on-line. The application of the distributed temperature sensing technique together with numerical studies proved to be successful in identifying processes affecting the wellbore integrity of a geothermal well.*



Die geothermische Energiebereitstellung kann einen signifikanten Beitrag zum Energiemix der Zukunft leisten. Das weltweit technisch verfügbare Potenzial wurde in dem im Mai 2011 erschienenen Special Report Renewable Energy Sources (SRREN) des Weltklimarats IPCC deutlich höher eingeschätzt, als der weltweite Bedarf an Wärme und elektrischer Energie zusammen (Goldstein *et al.*, 2011). Zur Nutzung dieser Ressource muss ein geothermisches Reservoir in der Regel durch eine Bohrung erschlossen werden. Eine nachhaltige und sichere Bewirtschaftung eines Untergrundreservoirs setzt eine hohe Lebensdauer der Bohrung voraus, wobei die hydraulische Isolation verschiedener geologischer Horizonte, insbesondere gegenüber Trinkwasserleitern, gewährleistet sein muss.

Zu diesem Zweck wird eine Bohrung verrohrt und der Ringraum zwischen Verrohrung und Gebirge mit Zement abgedichtet. Der Zement ist ein essentielles Strukturelement um die Langzeitstabilität einer Bohrung und die Isolation zwischen verschiedenen geologischen Horizonten zu gewährleisten. Der Prozess der Ringraumzementierung ist daher eine der wichtigsten Arbeitsschritte beim Niederbringen einer Bohrung. Nicht nur die Zementierung selbst, sondern auch der spätere Betrieb einer Bohrung stellen besondere Anforderungen an die Qualität der durchgeführten Arbeiten. Besonders bei tiefen geothermischen Bohrungen kann es während des Betriebs zu starken Temperatur- und Druckschwankungen kommen, die eine Belastung für die Bohrungsintegrität, vor allem für den Zement darstellen (z.B. Goodwin und Crook, 1992). Auch chemische Prozesse können die Integrität beeinflussen. Daten aus der Erdöl- und Erdgasindustrie von Tiefbohrungen im Golf von Mexiko zeigen beispielsweise, dass die Anzahl der Bohrungen mit einem anhaltenden Ringraumdruck mit zunehmendem Alter der Bohrungen stark ansteigt (Nelson, 2006). Ein anhaltender Ringraumdruck ist ein Indiz für eine hydraulische Verbindung zwischen tiefer gelegenen Schichten und der Erdoberfläche. Eine solche Verbindung kann entlang des Ringraums, insbesondere an der Grenzfläche zwischen Zement und Verrohrung, sowie zwischen Zement und Formation oder durch Risse im Zement selbst hervorgerufen werden. Neben der Integrität der Ringraumzementierung können auch Leckagen in der Verrohrung oder eine Fluidmigration in der Auflockerungszone im unmittelbar an die Bohrung angrenzenden Gebirge für einen anhaltenden Ringraumdruck verantwortlich sein (Abb. 1). Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine hyd-

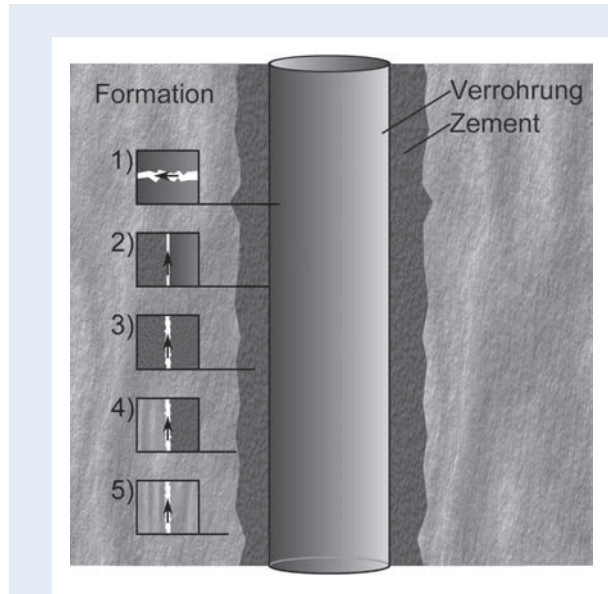


Abb. 1: Mögliche Migrationswege für Fluide entlang des Bohrpfad (verändert nach Gasda *et al.* 2004):

- 1) durch die Verrohrung,
- 2) zwischen Verrohrung und Zement,
- 3) durch den Zement,
- 4) zwischen Zement und Formation und
- 5) durch die Formation.

Fig. 1: Possible leakage pathways for wellbore fluids (modified from Gasda *et al.* 2004):

- 1) through the casing,
- 2) between casing and cement,
- 3) through the cement,
- 4) between cement and formation and
- 5) through the formation.

raulische Verbindung nicht gleichzeitig einer hohen Leckagerate entlang dieser Verbindung entspricht. Um jedoch einen nachhaltigen, sicheren und wirtschaftlichen Betrieb einer Tiefbohrung zu gewährleisten, ist die Überwachung der Zementierung sowie der Langzeitintegrität der Bohrung von großer Bedeutung.

Neben der Messung von Ringraumdrücken wird die Integrität der Ringraumzementierung sowie auch der einzelnen Verrohrungen in der Regel direkt im Anschluss an deren Einbau mit Hilfe akustischer Bohrlochmessverfahren überprüft. Weiterhin können Drucktests eine Aussage über die technische Dichtigkeit der Verrohrungen geben. Eine Aussage kann hierbei in der Regel fast ausschließlich über die Integrität der innersten Rohrtour und den umgebenden Ringraum gemacht werden.

Zur Abdichtung des Ringraums wird nach Einbau der Verrohrung in der Regel eine Zementsuspension durch die Verrohrung

Links: Nutzung eines geothermischen Reservoirs. Produktionstest in der Bohrung Hellisheiði HE-53 auf Island (Foto: T. Reinsch, GFZ)

Left: Utilization of a geothermal Reservoir. Flow test in well Hellisheiði HE-53, Iceland



Kontakt: T. Reinsch  
(thomas.reinsch@gfz-potsdam.de)

in die Tiefe gepumpt und steigt dann von unten im Ringraum zwischen Verrohrung und Gebirge nach oben. Durch die hohe Dichte des Zements wird dabei im Ringraum vorhandenes Fluid verdrängt. Die Zementsuspension wird dafür so aufbereitet, dass der Zement erst nach Ende des Verpressvorgangs im Ringraum aushärtet und diesen somit hydraulisch abdichtet.

Zur Überwachung des Zementierungsprozesses werden seit langem Temperaturmessungen verwendet. Beim Aushärten des Zements wird Wärme freigesetzt (exotherme Hydratationsreaktion), daher können Temperaturmessungen zur Lokalisierung des Zements im Ringraum genutzt werden. Eine quantitative Aussage über die Zementmenge und den Zustand des Zements ist anhand einzelner Temperaturmessungen allerdings nur eingeschränkt möglich.

Eine neue Möglichkeit zur Überwachung der Bohrungsintegrität während der Zementierung bietet die permanente Installation eines faseroptischen Messkabels im zementierten Ringraum. Dieses kann zusammen mit der Verrohrung eingebaut und zementiert werden und steht dann im Folgenden dauerhaft für Messaufgaben zur Verfügung. Die Expertise zum Einsatz solcher permanent installierten Messkabel wurde am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ innerhalb der Forschungsbohrprojekte Mallik (Henninges et al., 2005) und am Pilotstandort Ket-zin (Prevedel et al., 2008), sowie im Geothermiefeld Hellisheiði in Island (Reinsch et al., 2013), auf das später näher eingegangen wird, entwickelt.

Die thermische Situation im Ringraum kann hierbei mit Hilfe des Verfahrens der ortsverteilten Temperaturmessungen (Distributed Temperature Sensing, DTS) überwacht werden. Zur Messung der Temperatur wird ein Laserpuls in die Glasfaser des Messkabels eingekoppelt. Die ausgesandten Photonen streuen auf ihrem Weg entlang der Glasfaser an einzelnen Molekülen. Das Streusignal wiederum weist eine charakteristische Signatur auf, die von der Temperatur der Faser abhängig ist. Über die Laufzeit zwischen der Aussendung des Signals und der Detektion am Messgerät kann eine Aussage über den Ort des Streuprozesses und somit über den Messpunkt getroffen werden. Hierdurch können quasi-kontinuierliche Temperaturprofile entlang des Kabels mit einer hohen räumlichen Auflösung gemessen werden.

Während der Produktion von Thermalwasser kann es zu starken Temperaturänderungen entlang des Bohrpfads kommen. Die thermische Expansion der verschiedenen Strukturelemente einer Bohrung (Zement und Stahlverrohrung) in Kombination mit starken thermischen Gradienten in den Materialien von der Innen- zur Außenseite führt hierbei zu einer großen mechanischen Beanspruchung des Zements. Eine starke Beanspruchung kann eine Beeinträchtigung der Zementintegrität zur Folge haben. Auch hier können Temperaturmessverfahren, wie beispielsweise DTS-Messungen, genutzt werden, um integritätsrelevante Prozesse zu beobachten, sofern diese eine thermische Signatur haben.

Die Anwendung der Methode der ortsverteilten Temperaturmessungen zur Überwachung der Bohrlochintegrität wird im Folgenden anhand einer Installation in einer Hochenthalpiebohrung auf Island erläutert. In der Bohrung HE53 im Geothermiefeld Hellisheiði im Südwesten von Island wurde im Frühjahr 2009 ein faseroptisches Messkabel permanent installiert. Temperaturmessungen wurden während der Zementierung sowie zu Beginn eines Produktionstests durchgeführt und bewertet (Reinsch, 2012; Reinsch et al., 2013).

## Kabelinstallation

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts HITI (Asmundsson et al., 2014) wurde im Mai 2009 ein faseroptisches Messkabel hinter der Verrohrung der Bohrung HE-53 bis in eine Tiefe von 261 m installiert (Abb. 2). Zur Verbesserung der Messgenauigkeit ist es vorteilhaft, Messungen von beiden Enden der Faser durchzuführen. Hierfür wurde das Messkabel in einer Schleife an der Verrohrung befestigt (Abb. 2, rechts). Zur Zentrierung der Verrohrung und zur Fixierung des Messkabels wurde unterhalb jedes Rohrverbinders ein Zentrierkorb installiert. Zwischen den Rohrverbindern ist das Kabel zusätzlich direkt an den Rohren befestigt. Hierdurch variiert der Abstand zwischen Kabel und Verrohrung mit der Tiefe, was einen Einfluss auf das gemessene Temperaturprofil hat.

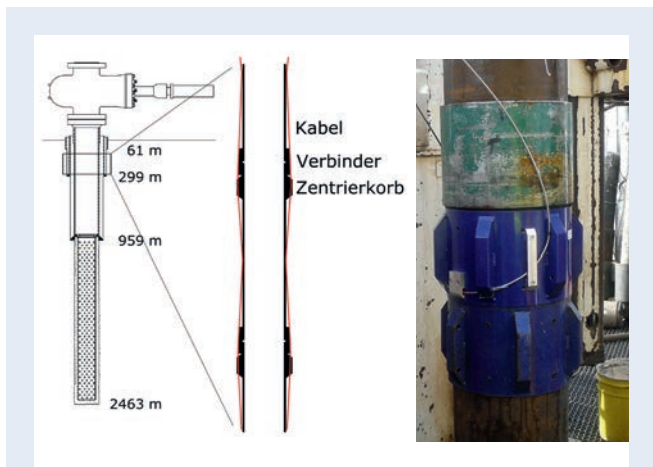


Abb. 2: Links: Darstellung der Installation des Messkabels (rot) in der Bohrung HE-53 (verändert nach S. Thorhallsson; Ausbaumangaben mit freundlicher Genehmigung von Reykjavik Energy). Rechts: Umlenkung der Kabelschleife am Ende des installierten Kabels (Foto: T. Reinsch, GFZ)

Fig. 2: Left: Installation of the fibre optic cable (red) in well HE-53 (modified from S. Thorhallsson; well information with kind courtesy of Reykjavik Energy). Right: Cable loop at the bottom of the installed fibre optic cable.

Die Installation des Messkabels zusammen mit der Verrohrung ermöglichte die Überwachung sowohl des Zementierungsprozesses, als auch der Temperaturentwicklung während eines Produktionstests nach Fertigstellung der Bohrung im Sommer 2009. Da das Kabel hinter der Verrohrung installiert wurde, konnten DTS-Messungen während der beiden Messkampagnen ohne Beeinträchtigung weiterer Arbeiten an der Bohrung durchgeführt werden.

## Zementierung

Abbildung 3 zeigt die Temperaturentwicklung während des Zementierungsprozesses und der Hydratation des Zements im Ringraum. In den ersten zehn Stunden der Messung sind mehrere Temperatursignaturen zu erkennen, die sich von unten nach oben und im Anschluss von oben nach unten im Ringraum ausbreiten. Über die Temperaturentwicklung lässt sich die Dynamik der Zementsuspension im Ringraum während des Verpumpens sehr gut untersuchen. Im weiteren Verlauf der Messung stiegen die Temperaturen dann durch die Hydratation des Zements stark an. Einfluss auf die tatsächlich gemessene Temperatur haben hierbei sowohl die Position des Kabels im Ringraum, als auch die thermischen Eigenschaften des Bohrlochfluids und des umgebenden Gebirges. Darüber hinaus ist die Temperaturentwicklung von der Zusammensetzung der Zementsuspension abhängig. Für die Hydratation spielt hierbei die zur Verfügung stehende Menge an Wasser eine entscheidende Rolle. Zu wenig Wasser führt zu einer unvollständigen Hydratation, zu viel Wasser zu einer schnellen Hydratation mit geringer Wärmeentwicklung. Die Kinetik und die bei der Reaktion maximal auftretenden Temperaturen stehen daher in direktem Zusammenhang mit dem Mischungsverhältnis von Wasser und Zement und damit der Zementdichte. Die kontinuierliche Überwachung der Temperaturentwicklung mittels der Methode der ortsverteilten Temperaturmessungen ermöglicht daher die detaillierte Untersuchung des Hydratationsprozesses im Ringraum. Die in der Abbildung sichtbare starke Temperaturerniedrigung nach etwa 30 Stunden in den obersten 110 m wurde durch ein Auffüllen der Bohrung mit kaltem Fluid verursacht.

## Produktionstest

Das vorrangige Ziel einer geothermischen Bohrung ist die Förderung von Thermalwasser mit einer möglichst hohen Temperatur. Abbildung 4 stellt die Temperaturentwicklung im Ringraum hinter der Verrohrung zu Beginn eines Produktionstests dar, bei dem über einen Zeitraum von mehreren Wochen heißes Thermalwasser gefördert wurde. Auch hier haben die Kabelposition sowie die thermischen Eigenschaften des Bohrlochausbaus und des Gebirges einen großen Einfluss auf die gemessenen Temperaturen.

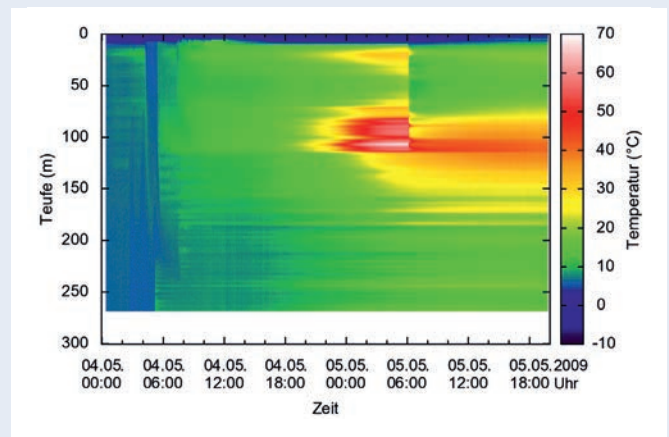


Abb. 3: Temperaturentwicklung während der Zementierung der Verrohrung in der Bohrung Hellisheiði HE-53

Fig. 3: Temperature evolution during the cementation of the anchor casing in well Hellisheiði HE-53

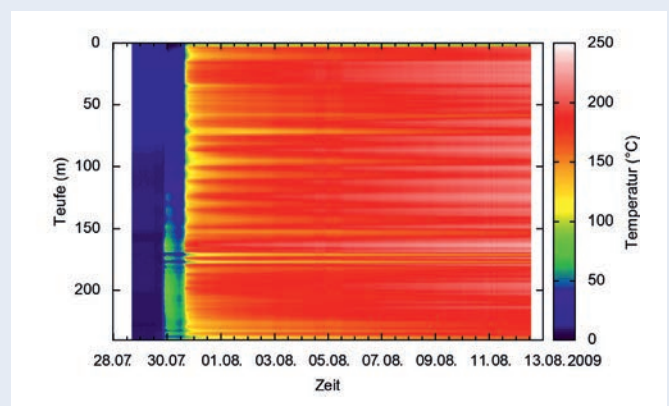


Abb. 4: Temperaturmessungen zu Beginn eines Produktionstests in der Bohrung HE-53

Fig. 4: Temperature evolution at the beginning of a flow test in well HE-53

Am ersten Tag der Messung konnten statische Formationstemperaturen gemessen werden. Das Profil ist annähernd isothermal. Zu Beginn des Produktionstests wurde erst Gas, welches sich am Kopf der Bohrung gesammelt hatte, abgelassen. Dies führte zu einem Anstieg des Wasserspiegels und einer moderaten Temperaturerhöhung im unteren Teil der Messstrecke. Nach einem weiteren Tag startete die massive Förderung von Thermalwasser. Innerhalb kurzer Zeit stieg die Temperatur des gefördert Fluides um etwa 200 °C an. Gleichzeitig wurde im

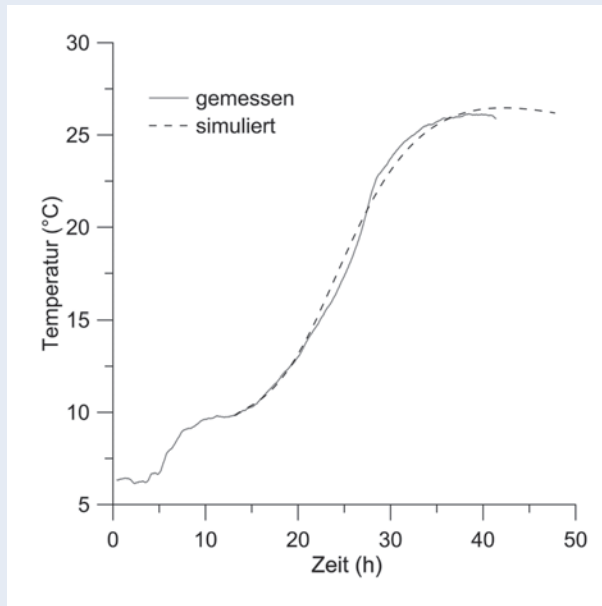


Abb. 5: Gemessene und simulierte Temperaturentwicklung für ein Teufenintervall der Bohrung HE-53 (Reinsch, 2012)

Fig. 5: Measured and simulated temperature evolution for a specific depth in well HE-53 (Reinsch, 2012)

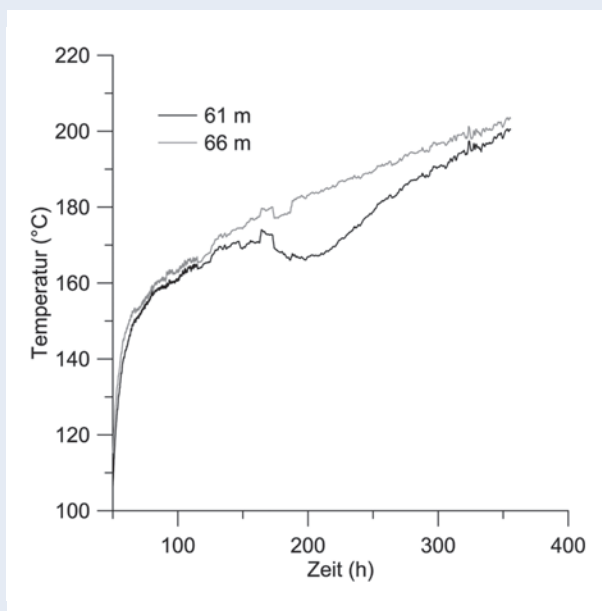


Abb. 6: Temperaturentwicklung während eines Produktionstests im Ringraum der Bohrung HE-53 für zwei verschiedene Teufenintervalle (Reinsch, 2012)

Fig. 6: Temperature evolution at two different depths within the annulus of well HE-53 during a flow test (Reinsch, 2012)

Ringraum eine Temperaturerhöhung um etwa 150 °C festgestellt. Im weiteren Verlauf der zweiwöchigen Messkampagne stieg die Fluidtemperatur am Bohrlochkopf linear auf über 250 °C an. Im Ringraum war dabei ein Temperaturanstieg bis auf 230 °C zu beobachten.

## Bewertung der Zementintegrität

**Zementierungsprozess:** Wie zuvor beschrieben, ist die Temperaturentwicklung im Ringraum abhängig von dem Mischungsverhältnis von Wasser und Zement. Die Kopplung einer thermischen Simulation mit einem theoretischen Hydratationsmodell (Lin und Meyer, 2009) ermöglicht daher die Berechnung der Ringraumtemperatur in Abhängigkeit von der Zementdichte.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch für eine Teufe die Temperaturentwicklung während des Verpumpens und der anschließenden Hydratation der Zementsuspension. Die gekoppelte Simulation wurde genutzt, um aus dem Temperaturverlauf eine Aussage über das Mischungsverhältnis von Wasser und Zement zu treffen. Dafür wurden Simulationen mit verschiedenen Zementdichten durchgeführt und die berechnete Temperaturentwicklung mit den Messwerten verglichen. Hierdurch war es möglich, sowohl die Zementdichte als auch den Grad der Hydratation an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt der Messung zu ermitteln.

**Produktionstest:** Während der Förderung heißen Thermalwassers wurde eine lokal begrenzte Temperaturanomalie im Zement beobachtet. Obwohl die Temperatur des produzierten Fluids stieg, wurden im Ringraum lokal begrenzt und zeitlich fortschreitend in angrenzenden Teufenintervallen sinkende Temperaturen gemessen. Abbildung 6 zeigt dazu exemplarisch die Temperaturentwicklung in zwei Teufenintervallen. Während die Temperatur in der Teufe 66 m kontinuierlich ansteigt, sinkt die Temperatur in 61 m innerhalb einiger Stunden um etwa 10 °C, bevor sie im Anschluss wieder langsam ansteigt.

Die Hypothese zur Erklärung dieses Phänomens ist eine Rissbildung im zementierten Ringraum, verbunden mit der Evaporation von Porenfluid im Zement. Zement weist eine sehr geringe Permeabilität auf, daher wird er auch zur hydraulischen Isolation der Verrohrung verwendet. Das Porenfluid kann während des Temperaturanstiegs zu Beginn der Thermalwasserproduktion nicht verdampfen. Erst durch die Ausbildung von Rissen, welche die Poren im Zement verbinden, kann das Fluid schlagartig verdampfen. Hierdurch kommt es zu einer Austrocknung des Zements. Diese Hypothese konnte durch eine thermische Simulation bestätigt werden (Reinsch, 2012).



## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Durch die Kombination der faseroptischen, ortsverteilten Temperaturmessung mit numerischen Simulationen ist es möglich, thermische Effekte, die einen Einfluss auf die Integrität einer Bohrung haben, zu analysieren. Es konnte gezeigt werden, dass sich dieses neu entwickelte Messverfahren sehr gut eignet, um Aussagen über die Qualität des Zements hinter der Verrohrung zu treffen. Durch den Vergleich der gemessenen Temperaturentwicklung in einzelnen Teufen mit den Simulationsergebnissen konnten die Zementdichte und der Grad der Hydratation ermittelt werden. In Kombination mit Standardverfahren zur Evaluierung der Zementierung, wie z. B. akustische Bohrlochmessverfahren, können die ermittelten Daten ein sehr viel genaueres Bild über die Qualität des Zements im Ringraum liefern.

Neben der Überwachung der Zementierung war es darüber hinaus möglich, während der Produktion von Thermalwasser einen integritätsrelevanten Prozess im Ringraum zu untersuchen. Erstmals konnte die thermische Signatur einer Rissbildung im Zement in Echtzeit beobachtet werden. Durch die permanente Überwachung des Ringraums mittels dieser neuartigen Messmethode ergibt sich daher eine Möglichkeit, integritätsrelevante Prozesse zu identifizieren und potenzielle Risiken für die Umwelt, die mit einem Verlust der Integrität einer Bohrung einhergehen, zu minimieren.

## Danksagung

Diese Arbeiten wurden im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten Projekts HiTI (Proposal/Contract no.: 019913) und dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts GeoEn Phase 2 (BMBF, 03G0767A) durchgeführt. Darüber hinaus möchten sich die Autoren bei E. Huenges, K. Reinicke und C. Teodoriu für die fachliche Begleitung dieser Arbeit bedanken. Die Autoren möchten darüber hinaus folgenden Personen danken: M. Poser, J. Schrötter und C. Cunow für die Unterstützung bei den Feldarbeiten, R. Asmundsson für die Koordination der Feldarbeiten, M. Loizzo für die Diskussionen über die Zementhydratation. Darüber hinaus gebührt folgenden Unternehmen Dank: Reykjavik Energy (OR) für die Bereitstellung einer Bohrung, sowie dem Iceland GeoSurvey (ISOR) und Mannvit für die Unterstützung bei den operativen Arbeiten.

## Literatur

- Ásmundsson, R., Pezard, P., Sanjuan, B., Henninges, J., Deltombe, J.-L., Halladay, N., Lebert, F., Gadalia, A., Millot, R., Gibert, B., Violay, M., Reinsch, T., Naisse, J.-M., Massiot, C., Azais, P., Mainprice, D., Karytsas, C., Johnston, C. (2014): High temperature instruments and methods developed for supercritical geothermal reservoir characterisation and exploitation - The HiTI project. - *Geothermics*, 49, 90-98. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.07.008>
- Gasda, S. E.; Bachu, S., Celia, M. A. (2004): Spatial characterization of the location of potentially leaky wells penetrating a deep saline aquifer in a mature sedimentary basin. - *Environmental Geology*, 46, 6-7, 707-720. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00254-004-1073-5>
- Goldstein, B., Hiriart, G., Bertani, R., Bromley, C., Gutierrez-Negrin, L., Huenges, E., Muraoka, M. A., Ragnarsson, A., Tester, J., Zui, V. (2012): Geothermal Energy - In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., Stechow, C. v., Matschoss, P. (Eds.), *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, 401-436.
- Goodwin, K., Crook, R. (1992): Cement Sheath Stress Failure. - *SPE Drilling Engineering*, 7, 4, 291-296. DOI: <http://doi.org/10.2118/20453-PA>
- Henninges, J., Huenges, E., Burkhardt, H. (2005): In situ thermal conductivity of gas-hydrate-bearing sediments of the Mallik 5L-38 well. - *Journal of Geophysical Research*, 110, B11206. DOI: <http://doi.org/10.1029/2005JB003734>
- Lin, F., Meyer, C. (2009): Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure. - *Cement and Concrete Research*, 39, 4, 255-265. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.014>
- Nelson, E. B., Guillot, D. (Eds.) (2006): *Well Cementing*, 2. ed., Sugar Land, Tex.: Schlumberger, 773 p.
- Prevedel, B., Wohlgemuth, L., Henninges, J., Krüger, K., Norden, B., Förster, A., CO2SINK Drilling Group (2008): The CO2SINK boreholes for geological storage testing. - *Scientific drilling: reports on deep earth sampling and monitoring*, 6, 32-37. DOI: <http://doi.org/10.2204/iodp.sd.6.04.2008>
- Reinsch, T. (2012): Structural integrity monitoring in a hot geothermal well using fibre optic distributed temperature sensing, PhD Thesis, Clausthal-Zellerfeld: Universitätsbibliothek Clausthal, 219 p. URN: <urn:nbn:de:gbv:104-1111221>
- Reinsch, T., Henninges, J., Asmundsson, R. (2013): Thermal, mechanical and chemical influences on the performance of optical fibres for distributed temperature sensing in a hot geothermal well. - *Environmental Earth Sciences*, 70, 8, 3465-3480. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12665-013-2248-8>

# Intelligente Bohrungen zur Exploration, Standortcharakterisierung und Speicherüberwachung

Axel Liebscher, Jan Henniges, Stefan Lüth, Sonja Martens, Fabian Möller, Bernhard Prevedel, Cornelia Schmidt-Hattenberger  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The utilization of the subsurface for storage of energy and matter is increasingly important. Central to any storage operation are wellbores, not only for exploration, characterization and development of the storage site itself but also for monitoring the storage operation and the storage complex during and after the injection activities. Smart wellbores, which are equipped with permanent sensors at or near reservoir depth, are an integral part of such a monitoring system and provide important data for the storage operation itself but also for monitoring the long-term behaviour of the storage complex. At the GFZ pilot site for the geological storage of CO<sub>2</sub> at Ketzin, over 67 kt of CO<sub>2</sub> have been stored successfully in a deep saline aquifer. Here, smart wells that are equipped with i) glass fibre cables for distributed temperature sensing, ii) electrical heater cables for heating experiments, iii) pressure and temperature sensors at or near reservoir depth, and iv) permanent electrodes for geoelectric measurements enabled a smooth and safe injection operation and provided essential data on the subsurface behaviour of the injected CO<sub>2</sub>.*



Die Nutzung des geologischen Untergrunds zu Speicherzwecken gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die geologische Untergrundspeicherung von zunächst Stadtgas und später Erdgas in Salzkavernen oder Porenspeichern ist eine seit Jahrzehnten etablierte Technik und wird zum Ausgleich saisonaler und kurzfristiger Schwankungen zwischen Gasangebot und -nachfrage sowie als strategische Reserve eingesetzt. Auch die Verpressung von Sole in tiefliegende Aquifere, wie sie z. B. beim Bau von Salzkavernen seit Jahrzehnten erfolgreich angewandt wird, ist eine etablierte und umweltschonende Technologie. Im Zuge der für Deutschland angestrebten Energiewende und der Diskussion um Maßnahmen gegen den anthropogen forcierten Klimawandel steigt jedoch der Bedarf an weiteren Speichertechnologien, wie der dauerhaften geologischen Speicherung von CO<sub>2</sub> oder der stofflichen Speicherung von Energie z. B. in Form von Wasserstoff oder synthetischem Erdgas. Zur Erforschung und Entwicklung dieser neuen Speichertechnologien sind wissenschaftlich ausgerichtete Pilotstandorte unabdingbar. Nur hier können die erforderlichen Grundlagenkenntnisse gewonnen und die benötigten Untergrundtechnologien für den Betrieb und die Überwachung der Speicher entwickelt und getestet werden. Integraler Bestandteil aller Speichertechnologien sind Tiefbohrungen, zum einen für die geologische Exploration, Charakterisierung und Entwicklung der Speichergesteine und zum anderen für die Überwachung der Speicher und der Speicheraktivitäten während und nach der aktiven Speicherphase. Bohrungen sind der einzige direkte Zugang zum Speicher und bieten damit die einzige Möglichkeit, Proben und Daten direkt aus dem Speicher und seinem Abdeckgestein zu gewinnen. Diese Proben und Daten sind eine unverzichtbare Ergänzung zu den indirekten, von der Erdoberfläche ausgeführten Überwachungsmethoden.

Generell entspricht die bei Speicherprojekten zur Anwendung kommende Tiefbohrtechnik den etablierten Standards der Öl- und Gasindustrie. Insbesondere bei wissenschaftlichen Pilotstandorten gibt es jedoch wesentliche Unterschiede hinsichtlich des Ausbaus und der technischen Ausstattung der Bohrungen, da diese nicht nur der Ein- und Ausspeicherung, sondern auch

der wissenschaftlichen Untersuchung und Überwachung der Speicherlagerstätte dienen. Für diese Aufgaben werden in Verbindung mit einzelnen Rohrtouren unterschiedliche Messkabel und Sensoren in den Bohrungen fest eingebaut. Bei einer solchen „intelligenten“ Verrohrung werden die Sensoren entweder direkt als spezielles Rohrelement in die jeweilige Rohrtour integriert (z. B. Druck- und Temperatursensoren), oder mittels Schellen und Manschetten üblicherweise außen auf der Rohrtour befestigt. Dabei kann es sich um Permanentelektroden für geoelektrische Messungen, Glasfaserkabel zur Messung von Temperaturprofilen entlang der Bohrung und zur Aufzeichnung seismischer Signale oder aber um elektrische Heizkabel handeln. Mit Ausnahme der Glasfaserkabel, die gleichzeitig zur Übertragung des Messsignals nach obertage dienen, werden die verschiedenen Messsignale über außen an der Bohrung verlaufende Kabel nach obertage gesendet und dort ausgewertet. Die Messinstrumente, Sensoren und Kabel werden zusammen mit der Verrohrung üblicherweise einzementiert oder verlaufen im unzementierten Ringraum bis zum Bohrlochkopf obertage.

### Pilotstandort Ketzin

Der vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ betriebene Pilotstandort Ketzin zur geologischen Speicherung von CO<sub>2</sub> (Abb. 1) liegt etwa 22 km nordwestlich von Potsdam und war der erste europäische und ist immer noch der einzige deutsche CO<sub>2</sub>-Speicherstandort an Land (Liebscher et al., 2013a). Von Juli 2008 bis August 2013 wurden hier etwas mehr als 67 kt CO<sub>2</sub> in Sandsteine der obertriassischen Stuttgart-Formation eingespeichert. Der Hauptspeicherhorizont liegt in einer Tiefe von etwa 630 bis 650 m und wird von mehr als 165 m mächtigen Tonsteinen der obertriassischen Weser- und Arnstadt-Formationen überlagert, die den Speicher nach oben abdichten. Strukturell befindet sich der Speicher an der Südostflanke der Roskow-Ketzin-Doppelantiklinale, einer kretazisch gebildeten Salzstruktur innerhalb des Nordostdeutschen Beckens.

Zur Exploration, Standortcharakterisierung und Speicherüberwachung wurden am Standort Ketzin insgesamt vier Tiefbohrungen bis in etwa 700 bis 800 m abgeteuft (Abb. 1, 2), die den gesamten Speicherkomplex erschließen (Prevedel et al., 2009; Liebscher et al., 2013b). Die Bohrungen Ktzi 200, 201 und 202 wurden vor Beginn der Injektion erstellt, die Bohrung Ktzi 203 wurde nach vier Jahren Injektionsbetrieb durch den CO<sub>2</sub>-gefüllten Speicher gebohrt. Alle vier Bohrungen sind intelligent ausgebaut (Abb. 2): Zur Überwachung der Temperaturentwicklung im Speicher verlaufen außen an den Produktionsrohrturen der vier Bohrungen über die gesamte Länge Glasfaserkabel für Temperaturmessungen (DTS = distributed temperature sensing); in den Bohrungen Ktzi 201, 202 und 203 sind zusätzlich Heizkabel installiert, um Wärmepulsmessungen durchführen

Links: Panoramabild des Standorts Ketzin während der Bohrarbeiten zur Bohrung Ktzi 203. Rechts sind die CO<sub>2</sub>-Speichertanks und die Injektionsanlage mit den Luftverdampfern zu erkennen. (Foto: A. Jurczyk, GFZ)

Left: Panorama view of the Ketzin pilot site during drilling of well Ktzi 203. On the right the CO<sub>2</sub> storage tanks and the injection facility with the ambient air heaters.



Kontakt: A. Liebscher  
(axel.liebscher@gfz-potsdam.de)

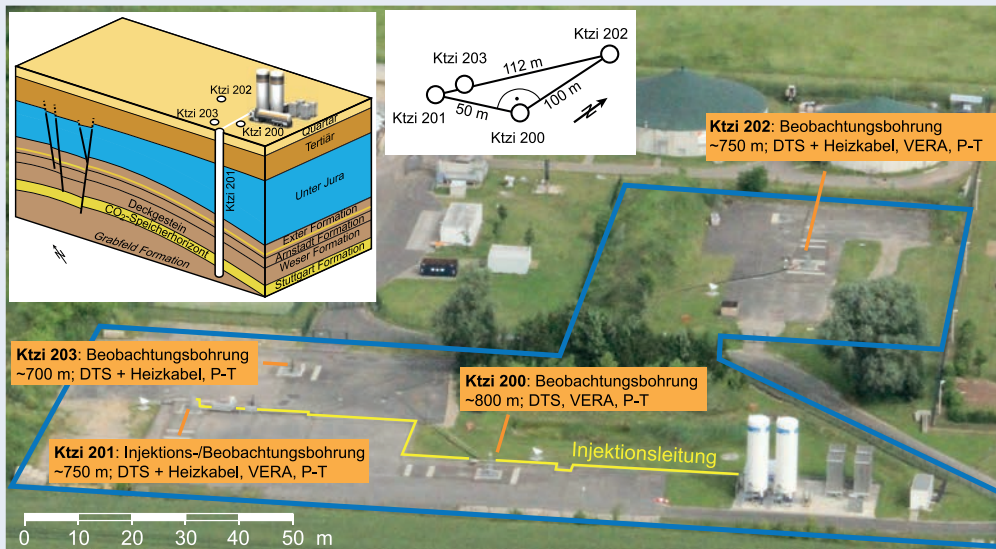


Abb 1: Luftbild des Pilotstandorts Ketzin mit der Lage der vier Tiefbohrungen zur Injektion und Beobachtung. Das Blockdiagramm zeigt schematisch die geologischen Gegebenheiten der Ketzin-Antiklinale.

Fig. 1: Aerial view of the pilot site Ketzin with location of the four deep wells for injection and observation. Block diagram shows principal geologic setting of the Ketzin anticline

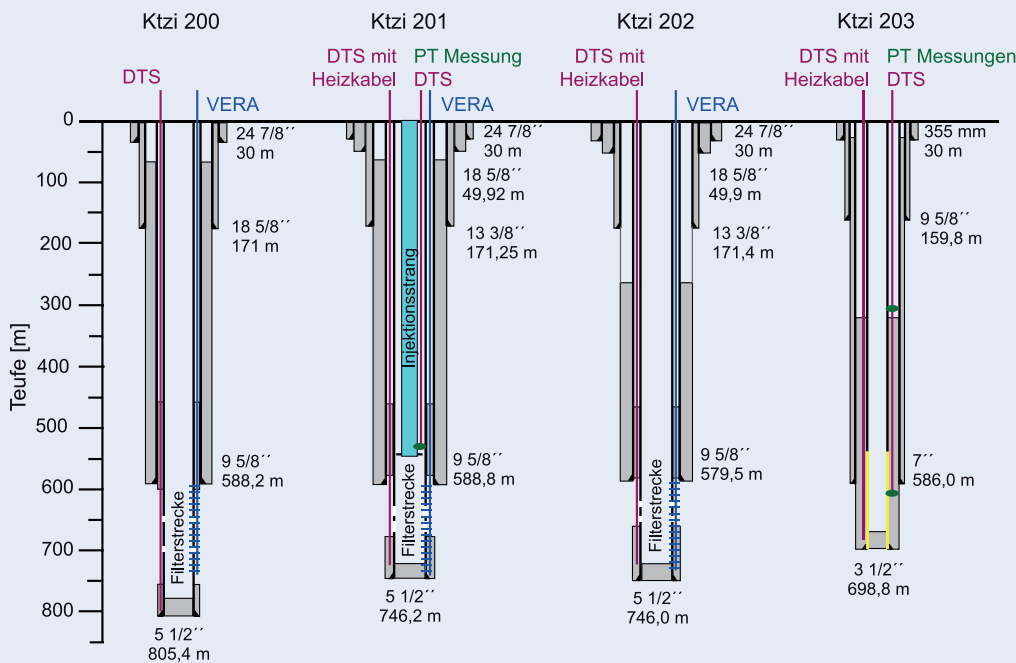


Abb. 2: Detailskizze des Aufbaus, der Verrohrung und der eingebauten Sensoren und Messsysteme der vier Tiefbohrungen am Pilotstandort Ketzin. Die Bohrungen Ktzi 200, 201 und 202 haben eine Stahlverrohrung, die Bohrung Ktzi 203 besitzt im untersten Bereich eine Glasfaser-Verrohrung (gelb).

Fig. 2: Detailed drawing of layout, casing and installed sensors and measuring systems of the four deep wells at the pilot site Ketzin site. Wells Ktzi 200, 201 and 202 have steel casings throughout whereas Ktzi 203 has a glass fibre reinforced plastic casing in the lower-most part (yellow).

zu können (s. Artikel Reinsch und Henniges in diesem Heft). In der Bohrung Ktzi 203 ist zusätzlich ein zweites DTS-System installiert, das mit zwei Druck-Temperatur-Punktsensoren in 610 und 305 m Teufe versehen ist. Zur operativen Überwachung des Injektionsprozesses ist auch der Injektionsstrang in der Ktzi 201 außen mit einem Glasfaserkabel für DTS-Messungen ausgebaut sowie mit einem Druck-Temperatur-Punktsensor in 550 m Teufe versehen. Im Teufenbereich von etwa 590 bis 740 m sind in den drei Bohrungen Ktzi 200, 201 und 202 jeweils 15 Permanentelektroden in einem Abstand von jeweils etwa 10 m für geoelektrische Messungen (VERA = vertical electrical resistivity array) eingebaut. Um die Elektroden gegen den Verrohrungsstahl zu isolieren, sind die Produktionsrohrtouren in diesem Bereich au-

ßen mit einer epoxidharzgetränkten, textilen Beschichtung ummantelt. Die in den intelligenten Bohrungen am Standort Ketzin eingebauten Messsysteme und Sensoren gehören weltweit zu den umfangreichsten, die im Bereich der Untergrundspeicherung eingesetzt werden und haben wesentliche Überwachungsdaten und Kenntnisse zum Speicherbetrieb und zu den im Speicher ablaufenden Prozessen geliefert.

## Geoelektrische Überwachung der CO<sub>2</sub>-Ausbreitung

Die in den Bohrungen permanent installierten Elektroden werden sowohl für geoelektrische Messungen zwischen der Erd-

oberfläche und den Bohrungen als auch zwischen den Bohrungen selbst verwendet und können dabei sowohl zur Stromeinspeisung als auch zur Spannungsmessung dienen.

Das CO<sub>2</sub> wird am Standort Ketzin in einem salinen Aquifer gespeichert. Durch die Speicherung von CO<sub>2</sub> wird das ursprünglich in den Gesteinsporen vorhandene, stark salzhaltige Formationsfluid durch freies CO<sub>2</sub> verdrängt. Da freies CO<sub>2</sub> im Gegensatz zum ursprünglichen Formationsfluid ein sehr schlechter elektrischer Leiter ist, führt die Speicherung von CO<sub>2</sub> zu einer gut messbaren, signifikanten Erhöhung des elektrischen Widerstands im Speicherhorizont. Mittels Wiederholungsmessungen, deren Ergebnisse mit der initialen Widerstandsverteilung im Speicher verglichen werden, können die durch die CO<sub>2</sub>-Speicherung verursachten Änderungen in der elektrischen Widerstandsverteilung sowohl zeitlich als auch räumlich aufgelöst werden. Das räumliche Auflösungsvermögen geoelektrischer Überwachungsmethoden ist verglichen mit z. B. seismischen Methoden geringer. So erzielten reine Oberfläche-Oberfläche-Messungen am Standort Ketzin, bei denen sowohl die Stromeinspeisung als auch Spannungsmessung an der Erdoberfläche erfolgten, nur unzureichende Darstellungen der räumlichen CO<sub>2</sub>-Verteilung im Speicher. Der Einsatz der fest in den Bohrungen installierten Elektroden im Bereich des Speichers hat das räumliche Auflösungsvermögen der geoelektrischen Messungen insbesondere im Bereich um die Bohrungen (etwa 50 bis 100 m) deutlich erhöht. So konnten

am Standort Ketzin mit den Oberfläche-Bohrloch-Messungen bereits CO<sub>2</sub>-Mengen deutlich < 15 kt sicher nachgewiesen und in ihrer räumlichen Ausbreitung qualitativ dargestellt werden (Abb. 3; Bergmann et al., 2012). Mit Hilfe der Messungen zwischen den Bohrungen konnten sogar Änderungen im operativen Speicherbetrieb über Änderungen der Widerstandsverteilungen qualitativ nachverfolgt werden. Im Gegensatz zu dem vergleichsweise geringen räumlichen Auflösungsvermögen ist die Auflösung geoelektrischer Messungen hinsichtlich der Sättigung des Porenraums mit CO<sub>2</sub> jedoch über den gesamten Sättigungsbereich gut. Da seismische Messungen oberhalb einer CO<sub>2</sub>-Sättigung des Porenraums von etwa 20% nur noch ein geringes Auflösungsvermögen der CO<sub>2</sub>-Sättigung haben, liefern die geoelektrischen Messungen zentrale Informationen hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung des Porenraums. Diese Sättigungsinformationen sind bedeutend, um z. B. Informationen aus seismischen Messungen über die räumliche Verteilung des CO<sub>2</sub> im Speicher in gespeicherte Massen von CO<sub>2</sub> umzurechnen oder aber Prozesse wie die Lösung des CO<sub>2</sub> im Formationsfluid quantitativ beschreiben zu können. Gerade die Kombination und idealerweise gemeinsame Auswertung und Inversion seismischer Messungen (räumliche, strukturelle Informationen) und detaillierten elektrischen Messungen mittels intelligenter Bohrungen (stoffliche Informationen zum Porenraum) erlaubt es, zentrale Prozesse bei der CO<sub>2</sub>-Speicherung zu überwachen und in ihrer räumlichen und zeitlichen Dimension aufzulösen.

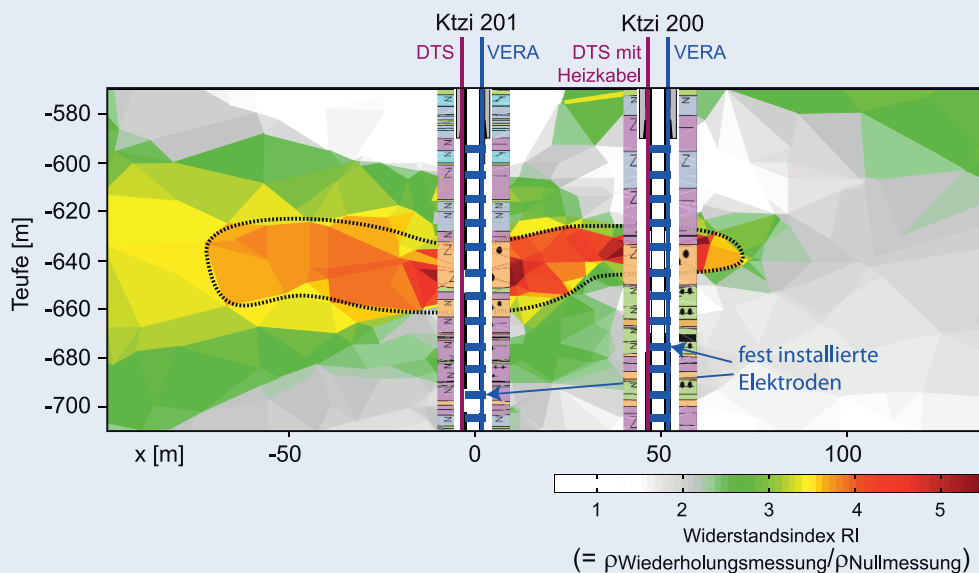


Abb. 3: Profilschnitt durch die Ebene Ktzi 201 und Ktzi 200, der die Änderung der elektrischen Widerstandsverteilung im Speicher nach etwa 13 500 t eingespeichertem CO<sub>2</sub> zeigt. Die gepunktete Linie umfasst qualitativ den Bereich mit signifikanten Widerstandsänderungen (Widerstandsindex > etwa 3) und gibt die räumliche Ausdehnung des CO<sub>2</sub> im Speicher zum Zeitpunkt der Wiederholungsmessung wieder.

Fig. 3: Cross-section through plane Ktzi 201 and Ktzi 200 that shows changes in electrical resistivity distribution within the reservoir after about 13,500 t CO<sub>2</sub> injected. Dotted line shows qualitatively the area with significant changes in resistivity (resistivity index > about 3) and mirrors the areal extend of the CO<sub>2</sub> plume at the time of the repeat measurement.

## Drucküberwachung

Druckänderungen im Reservoir als Folge der CO<sub>2</sub>-Speicherung sind zentrale Parameter einer Speicherüberwachung. Aus operativer Sicht muss sichergestellt sein, dass der von der Bergbehörde genehmigte maximal zulässige Reservoirdruck nicht überschritten wird und die Injektion sicher verläuft. Die Druckentwicklung im Reservoir ist zudem ein zentraler Parameter, an dem die Modellierungen des Reservoirverhaltens geeicht und validiert werden. Bei der Speicherung von Erdgas ist die Dichte des Gases im Bohrloch sehr gut bekannt und der Lagerstättendruck wird üblicherweise aus den gemessenen Drücken an den Bohrlochköpfen und dem Druck der Gassäule berechnet. Da der kritische Punkt von CO<sub>2</sub> mit 31 °C/74 bar im Bereich üblicher Druck- und Temperaturbedingungen in CO<sub>2</sub>-Speicherbohrungen liegt, ist die Dichte des CO<sub>2</sub> in der Bohrung und damit der Druck der Gassäule variabel und hängt von der Temperatur ab. Eine einfache Berechnung der Reservoirdrücke aus den Kopfdrücken der Bohrungen ist deshalb bei der CO<sub>2</sub>-Speicherung nicht möglich bzw. mit einer großen Unsicherheit behaftet. Zudem kann es insbesondere in den Beobachtungsbohrungen zu Mehrphasenbedingungen kommen (s.u.), die eine Dichteberechnung zusätzlich erschweren bzw. ausschließen. Mit Hilfe der am Standort Ketzin auf (in der Ktzi 203) bzw. nahe (in der Ktzi 201) Reservoirteufe fest eingebauten Sensoren zur Druckmessung konnte die Druckentwicklung im Reservoir sehr genau gemessen und über-

wacht werden und dadurch sichergestellt werden, dass der von der Bergbehörde genehmigte maximal zulässige Reservoirdruck nicht überschritten wurde (Liebscher et al., 2013b).

## Temperaturüberwachung

Das entlang des Injektionsstrangs der Ktzi 201 eingebaute DTS-System hat zentrale operative Daten und Erkenntnisse geliefert (Wiese et al., 2012). Die Hauptaufgaben des fest installierten DTS-Systems waren die Überwachung der Temperaturentwicklung innerhalb des Injektionsstrangs während Stillstandzeiten, um stabile Bohrlochbedingungen zu gewährleisten und einen möglichen Rückfluss von Formationsfluid in die Bohrung zu überwachen, die Festlegung von Injektionsrate und Injektionstemperatur insbesondere bei Wiederanfahren der Injektion und die Optimierung des Injektionsprozesses. Um Mehrphasenbedingungen bzw. Phasenübergänge im Bohrloch während der Injektion zu vermeiden, wurde das CO<sub>2</sub> während des Normalbetriebs vor der eigentlichen Injektion über Luftverdampfer und einen Elektroverdampfer auf etwa 35 bis 40 °C vorgewärmt. Dies führte zu einer leichten Erwärmung der Injektionsbohrung und gewährleistete Temperaturen, die stets oberhalb der Kondensationstemperatur lagen. Um auch während Stillstandzeiten und der damit verbundenen Abkühlung innerhalb des Injektionsstrangs eine Kondensation des CO<sub>2</sub> und damit Mehrphasenbedingungen zu vermeiden, wurde die Injektionsbohrung während Stillstandzeiten zunächst mit Stickstoff beaufschlagt. In dem mit Stickstoff gefüllten Bohrloch näherten sich die Bohrlochtemperaturen während der Stillstandzeiten dem normalen Hintergrundgeotherm an. Das DTS-System erlaubte es, diesen Abkühlungsprozess mit hoher zeitlicher ( $\Delta t = 3$  min) und räumlicher ( $\Delta z = 1$  m) Auflösung sowie einer hohen Messgenauigkeit ( $\Delta T = 0,1$  °C) abzubilden.

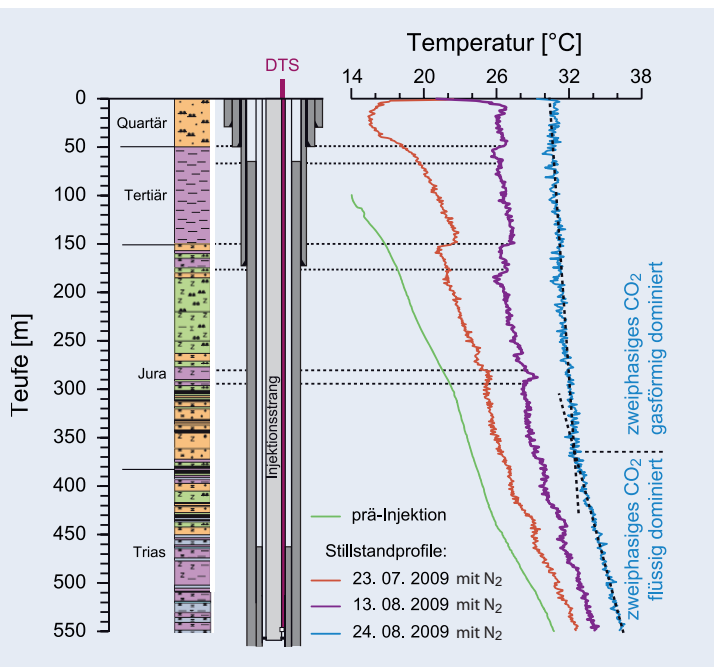


Abb. 4: Exemplarische Temperaturprofile entlang des Injektionsstrangs der Bohrung Ktzi 201 für die Nullmessung vor Beginn der Injektion sowie drei verschiedene Stillstandzeiten

Fig. 4: Exemplary temperature profiles along the injection tubing of well Ktzi 201 for the baseline prior to injection and three different shut-in phases

Unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der Nebengesteine sowie Bohrungsausbau und Zementation der Ringräume spiegeln sich dabei in unterschiedlichen Abkühlungsraten wider (Abb. 4). So sind z. B. die Basis des Tertiär und eine Ton/Siltsteinlage im Jura sowie die Unterkanten der 18 5/8" und 13 3/8" Rohrtouren gut in den Temperaturprofilen zu erkennen. Bei späteren Stillstandzeiten wurde auf eine Stickstoffbeaufschlagung verzichtet und es entwickelten sich im CO<sub>2</sub>-gefüllten Injektionsstrang Zweiphasenbedingungen (Abb. 4). Diese zeichneten sich durch einen gasförmig dominierten oberen und einen flüssig dominierten unteren Teil mit jeweils eigenen, linearen Temperaturprofilen aus. Analoge Zweiphasenbedingungen und Temperaturprofile entwickelten sich auch in den Beobachtungsbohrungen (Henniges et al., 2011). Die Messungen der festinstallierten DTS-Systeme und deren Interpretation wurden durch Druck- und Temperaturdaten aus Loggingkampagnen sowie Aufnahmen einer Videobefahrung der Beobachtungsbohrungen bestätigt (Abb. 5). Die DTS-, Druck- und Loggingdaten zeigen zudem, dass sich aufgrund der Zweiphasenbedingungen im unteren Bereich der Beobachtungsbohrungen invertierte Dichteprofile entwickelten, die über lange Zeiträume stabil bleiben.

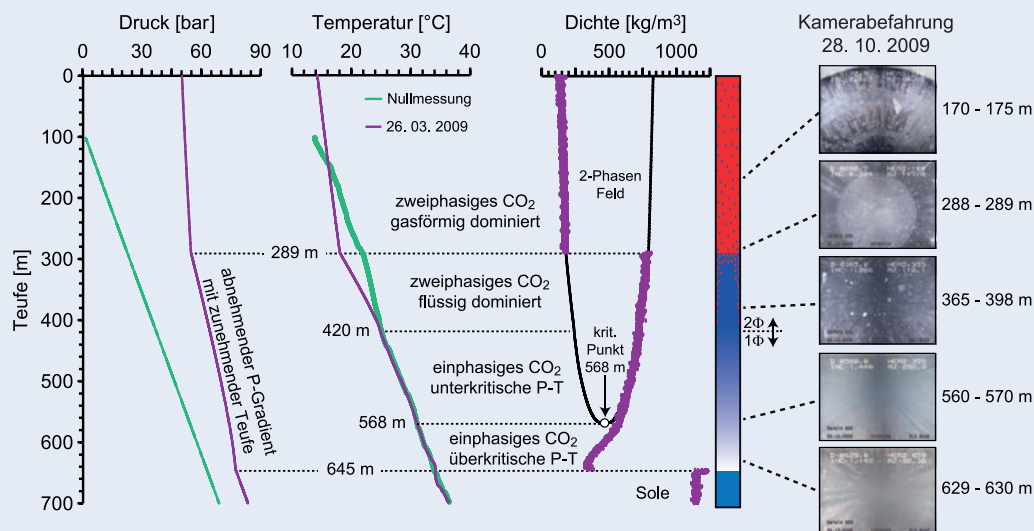


Abb. 5: P-T-Profile der Bohrung Ktzi 200 für die Nullmessung vor Beginn der Injektion sowie eine Loggingkampagne im März 2009 (links), die aus den Daten der Loggingkampagne abgeleiteten Phasenzustände in der Bohrung (Mitte) sowie Ergebnisse der Kamerabefahrung der Ktzi 200 (rechts)

Fig. 5: P-T profiles of well Ktzi 200 for the baseline prior to injection and a logging campaign from March 2009 (left), the fluid phase conditions in the well deduced from the logging data (middle), and results from the camera inspection of Ktzi 200 (right)

## Zusammenfassung und Ausblick

Die intelligenten Tiefbohrungen am Pilotstandort zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in Ketzin haben zentrale wissenschaftliche und operative Überwachungsdaten geliefert. Mit Hilfe der fest eingebauten Sensoren und Messsysteme war es möglich, die Ausbreitung und das Verhalten des CO<sub>2</sub> im Untergrund mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung abzubilden. Für die CO<sub>2</sub>-Speicherung auf industrieller Skala, aber auch für andere Speichertechnologien, müssen diese Ansätze erweitert werden, um auch für großräumige Speicheranwendungen verlässliche Monitoringsysteme aufzubauen. Hier wird eine Kombination verschiedener permanenter und periodischer Überwachungsmethoden erforderlich sein, um eine maßgeschneiderte Lösung für den jeweiligen Speicherstandort zu finden. Intelligente Verrohrungen sind ein direktes Fenster zu den Speichern und bieten auch für industrielle Speicherstandorte das Potenzial, bei vergleichsweise geringem logistischem Aufwand zentrale Überwachungsparameter in oder nahe Echtzeit aufzuzeichnen und so zeitnah datenbasierte operative Entscheidungen zu treffen. Aufgrund ihrer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung können intelligente Bohrungen auch als Frühwarnsysteme in Speicherbereichen eingesetzt werden, in denen die geologische Exploration ein erhöhtes Leckagerisiko ergeben hat. Die Übertragung der am Standort Ketzin gewonnenen Erkenntnisse auf eine industrielle CO<sub>2</sub>-Speicherung und andere Nutzungen des geologischen Untergrunds sowie die Weiterentwicklung intelligenter Monitoringsysteme sind zwei zentrale Herausforderungen des „Zentrums für Geologische Speicherung“ am GFZ.

## Literatur

- Bergmann, P., Schmidt-Hattenberger, C., Kiessling, D., Rücker, C., Labitzke, T., Hennings, J., Baumann, G., Schütt, H. (2012): Surface-downhole electrical resistivity tomography applied to monitoring of the CO<sub>2</sub> storage Ketzin (Germany). - *Geophysics*, 77, 6, B 253-B 267. DOI: <http://doi.org/10.1190/GEO2011-0515.1>
- Hennings, J., Liebscher, A., Bannach, A., Brandt, W., Hurter, S., Köhler, S., Möller, F., CO<sub>2</sub>SINK Group (2011): P-T-rho and two-phase fluid conditions with inverted density profile in observation wells at the CO<sub>2</sub> storage site at Ketzin (Germany). - *Energy Procedia*, 4, 6085-6090. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.614>
- Liebscher, A., Martens, S., Möller, F., Kühn, M. (2013a): On-shore CO<sub>2</sub> storage at the Ketzin pilot site in Germany. - In: Gluyas, J., Mathias, S. (Eds.), *Geological storage of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>): geoscience, technologies, environmental aspects and legal frameworks*, (Woodhead publishing series in energy; 54), Oxford [u.a.]: Woodhead Publishing, 278-300.
- Liebscher, A., Möller, F., Bannach, A., Köhler, S., Wiebach, J., Schmidt-Hattenberger, C., Weiner, M., Pretschner, C., Ebert, K., Zemke, J. (2013b): Injection operation and operational pressure-temperature monitoring at the CO<sub>2</sub> storage pilot site Ketzin, Germany - Design, results, recommendations. - *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 15, 163-173. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.02.019>
- Prevedel, B., Wohlgemuth, L., Legarth, B., Hennings, J., Schütt, H., Schmidt-Hattenberger, C., Norden, B., Förster, A., Hurter, S. (2009): The CO<sub>2</sub>SINK boreholes for geological CO<sub>2</sub>-storage testing. - *Energy Procedia*, 1, 1, 2087-2094. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.272>
- Wiese, B., Nimtz, M., Möller, F., Otto, C., Kühn, M., Liebscher, A., Schmidt-Hattenberger, C. (2012): Determination of thermodynamics in a CO<sub>2</sub> injection well using pressure and distributed temperature sensing, (IAHS publication; 355), *ModelCare 2011 - Models - Repositories of Knowledge* (Leipzig 2011) (Wallingford), 286-290

# Mit großem Bohrer auf der Jagd nach den kleinsten Lebewesen – wissenschaftliches Bohren für geomikrobiologische Forschung

Jens Kallmeyer

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*With the rapidly increasing utilization of the subsurface, either for exploitation of natural resources or long-term storage of waste products, it is of paramount importance to understand this so far understudied environment. Over the last two decades new findings have shown that microbes mediate many processes that were previously considered as abiotic. Exploration of the so-called Deep Biosphere is only possible through drilling. With regard to drilling operations and sample processing, microbiology has different requirements than many other scientific disciplines, the most important one being contamination control because drilling fluid tends to infiltrate the drill core and renders the material unsuitable for microbiological analyses. There are different ways to assess the infiltration of drill fluid, each one has its specific advantages and disadvantages. Another important aspect of deep biosphere research is the necessity to process samples as quickly as possible after retrieval to avoid any changes in the microbial community. These requirements add some complications to drilling operations, therefore the addition of a geomicrobiological component is not always appreciated by all members of a science party. However, knowledge about the drivers of diagenetic processes and accurate assessment of the contamination of the core by drilling fluids are valuable information for other disciplines as well.*





Gemeinhin wird unter dem Begriff „Biosphäre“ die Tier- und Pflanzenwelt auf dem Land und im Meer verstanden, also das Leben auf der Erde. Bis zu 20% des in lebenden Organismen gespeicherten Kohlenstoffs findet sich aber in Mikroben, die tief in der Erde leben – die sogenannte „tiefe Biosphäre“. In den letzten zwanzig Jahren hat sich die Erforschung des Lebens im tiefen Untergrund von einem Nischenthema zu einer wichtigen Forschungsrichtung entwickelt. Über viele Jahre lag der Fokus auf der Erforschung der tiefen marinen Biosphäre, also des Lebens im Meeresboden. In den letzten Jahren gab es jedoch vermehrt Forschungsprojekte im terrestrischen Bereich. Neben klassischen Bohrungen von der Erdoberfläche in die Tiefe werden bei der Erforschung der terrestrischen tiefen Biosphäre auch alternative Möglichkeiten genutzt, die im marinen Bereich nicht möglich sind. So wird beispielsweise innerhalb von Minen horizontal gebohrt. Diese Technik hat z. B. den Vorteil, dass wesentlich kürzere Strecken gebohrt werden müssen.

Neue Forschungsergebnisse belegen, dass die tiefe Biosphäre für viele gesellschaftliche Bereiche relevant ist. Von einer Reihe von Prozessen, die früher als rein chemisch angesehen wurden, ist heute bekannt, dass sie von Mikroorganismen katalysiert werden. Zudem wird der tiefe Untergrund inzwischen wesentlich stärker als früher wirtschaftlich genutzt. Neben der Gewinnung von Rohstoffen wird die Speicherung von Energieträgern oder Abfallstoffen im Untergrund zunehmend diskutiert. Ohne eine genaue Kenntnis der biologischen Prozesse im Untergrund lassen sich aber keine verlässlichen Aussagen über die Langzeitstabilität solcher Systeme treffen.

Auf der wissenschaftlichen Seite beschäftigen sich zwei internationale Programme mit der Erforschung des tiefen Untergrunds durch Bohrungen, das landbasierte Internationale

Kontinentale Wissenschaftliche Bohrprogramm (International Continental Drilling Program, ICDP), das am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ koordiniert wird, und das Tiefseebohrprogramm International Ocean Discovery Program (IODP).

Seit etwa zehn Jahren beteiligt sich das GFZ an Forschungsprojekten zur tiefen Biosphäre: 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 anderen Programmen (*Fry et al., 2009*), im Permafrost (*Mangelsdorf et al., 2005*) und in tiefen südafrikanischen Goldminen (*Lippmann et al., 2003*). Neben diesen eher im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelten Forschungsprojekten werden stets auch anwendungsbezogene Fragestellungen bearbeitet, z. B. im Bereich der CO<sub>2</sub>-Speicherung im Untergrund (*Wandrey et al., 2010*) oder zur Erforschung von Prozessen in geothermischen Anlagen. Ziel ist es, ein grundlegendes Verständnis der tiefen Biosphäre hinsichtlich ihrer Stoffdynamik und der daran beteiligten Mikroorganismengemeinschaften zu erlangen, um deren generelle Bedeutung für die globalen Stoffkreisläufe abschätzen zu können.

## Geomikrobiologische Forschung in der tiefen Biosphäre

Mit Ausnahme von extrem nährstoffarmen marinen Sedimenten ist die tiefe Biosphäre ein sauerstofffreier (anoxischer) Lebensraum. Die dort lebenden Organismen sind nicht nur auf ein Leben ohne Sauerstoff eingestellt, für sie ist er sogar extrem schädlich. Aus diesem Grund müssen Proben möglichst komplett von der Umgebungsluft isoliert genommen, gelagert und verarbeitet werden (Bild links und Abb. 3), was einen hohen logistischen Aufwand mit sich bringt (Abb. 3) oder viel Improvisation erfordert (Abb. 1 rechts). Das Leben in der tiefen Biosphäre läuft zudem auf Zeitskalen ab, die für Menschen nur schwer vorstellbar sind. Während sich eine Mikrobenezelle im Labor mehrmals in der Stunde teilt, teilt sich eine Zelle in der tiefen Biosphäre unter Umständen nur einmal alle hunderte von Jahren. Viele Standardtechniken der klassischen Mikrobiologie lassen sich nicht auf die tiefe Biosphäre anwenden, weil sie nicht empfindlich genug sind, um die extrem geringen Umsatzraten und Zelldichten zu detektieren.

*Links: Viele Organismen der tiefen Biosphäre sind nicht nur auf ein Leben ohne Sauerstoff eingestellt, für sie ist er sogar extrem schädlich. Daher muss eine Beprobung unter sauerstofffreien Bedingungen erfolgen, wie hier in einer mit Stickstoff gefüllten Glovebox. Über die angesetzten Handschuhe können Arbeiten am Bohrkern durchgeführt werden. (Foto: J. Kallmeyer, GFZ)*

*Left: Many deep biosphere organisms are not only adapted to a life without oxygen, it is even toxic to them. Therefore, sampling has to be carried out in an oxygen-free atmosphere, like here inside a nitrogen-filled glovebox. Through the gloves it is possible to work on the drill core.*



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



Abb. 1: Im Rahmen des ICDP-Projekts am Vansee, Türkei, wurde auch eine geomikrobiologische Beprobung durchgeführt. Links: schwimmende Bohrplattform; rechts: Schnelligkeit ist wichtig, da die wertvollen Proben sonst nicht mehr verwendbar sind. Um Zeit zu sparen wird die Fensterbank des Hotelzimmers kurzerhand als mobiles Labor genutzt. (Fotos: Kallmeyer, GFZ)

Fig. 1: As part of the ICDP Project at Lake Van, Turkey, samples were taken for geomicrobiological research. Left: the swimming drilling platform. Right: Because the transport of GFZ's mobile geomicrobiology laboratory was delayed, scientists processed the sample on the window sill of the hotel. Rapid sample processing is very important to prevent the precious samples from decay.

## Schmutziges Bohren für saubere Mikrobiologie

Alle Arbeiten in der tiefen Biosphäre beruhen auf Bohrungen (Abb. 1 links). Selbst bei der Arbeit in Minen muss einige Meter in das Anstehende gebohrt werden, um Proben zu gewinnen, die nicht durch Sauerstoff oder fremde Lebewesen von der Oberfläche kontaminiert sind. Bohren im Gestein ist unter geobiologischem Gesichtspunkt eine eher schmutzige Angelegenheit. Große Mengen an Flüssigkeit müssen durch das Bohrloch gepumpt werden, um das ausgebohrte Material aus dem Loch zu befördern und um den Bohrer zu kühlen.

Je nach Bohrtechnik, der Tiefe des Bohrlochs und anderen Parametern besteht die sogenannte Spülung aus verschiedenen Substanzen. Im für die Mikrobiologie günstigsten Fall wird als Spülung reines Wasser verwendet. Aber selbst dann besteht normalerweise nicht die Möglichkeit einer kompletten Sterilisation des Wassers, da die eingesetzten Mengen von mehreren Tausend Litern pro Stunde zu groß sind. Während

bei Bohrungen im Meer oder in Seen die Bohrflüssigkeit häufig nicht aufgefangen wird und wieder aus dem Loch herausläuft („pump and dump“), wird sie bei Bohrungen an Land und auch bei einigen marinen Bohrungen wiederverwendet. Durch das Recycling der Bohrflüssigkeit reichern sich Mikroben und andere unerwünschte Substanzen in der Bohrspülung an und machen die Flüssigkeit damit noch ungeeigneter für die mikrobiologische Probennahme, als sie ohnehin schon ist. Reines Wasser ist aufgrund seiner geringen Dichte und Viskosität nur sehr eingeschränkt in der Lage, die ausgebohrten Gesteinsreste aus dem Bohrloch zu entfernen. Daher wird die Spülung häufig mit Tonmineralen oder Verdickungsmitteln versetzt und so die Dichte und Viskosität erhöht. Diese Zusätze vergrößern die Gefahr, dass weitere Mikroben in die Bohrspülung eingetragen werden. Ein weiteres großes Problem besteht darin, dass viele der eingesetzten Verdickungsmittel biologisch abbaubar sind. Auch wenn das vom Standpunkt des Umweltschutzes natürlich

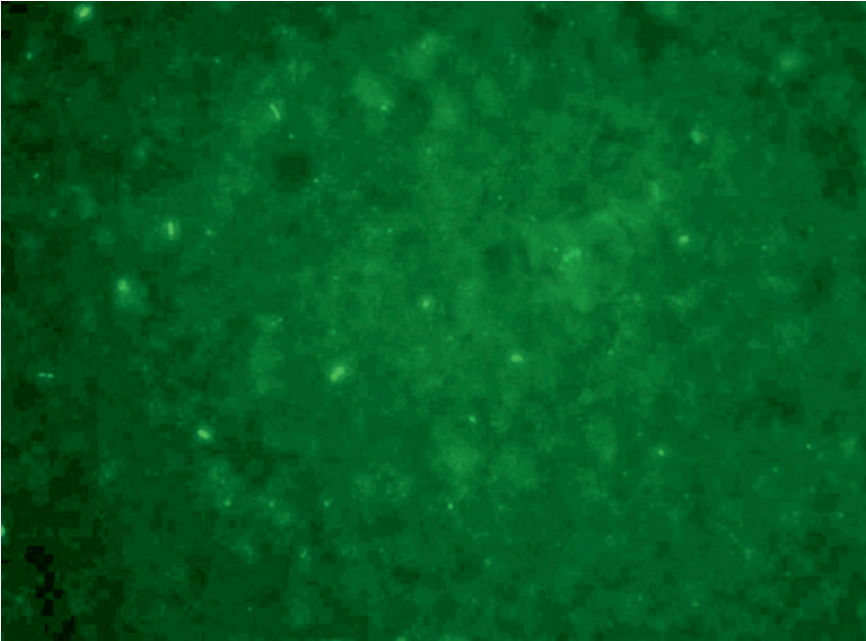


Abb. 2: Ein mikroskopisches Bild von Mikroben aus der tiefen Biosphäre. Die Zellen wurden mit einem DNA-Farbstoff angefärbt und sind als leuchtende, grüne Punkte zu erkennen. Die Mikroben haben einen Durchmesser von etwa  $0,5 \mu\text{m}$ . (Foto: J. Kallmeyer, GFZ)

Fig. 2: Microscopic picture of deep biosphere microbes. The cells were stained with a DNA-specific reagent and are now visible as small fluorescent green dots. The microbes have a diameter of ca.  $0.5 \mu\text{m}$ .

sehr positiv zu bewerten ist, bedeutet dieser Umstand allerdings auch, dass die Mikroben aktiv mit Nährstoffen gefüttert werden und sich dementsprechend gut vermehren.

Neben der Bohrspülung ist das Bohrgerät selbst eine Kontaminationsquelle. Die Menge an Ausrüstung für eine Bohrung ist immens. Allein die je nach Bohrung bis zu mehrere Kilometer langen Bohrstränge aus armdicken Stahlrohren wiegen viele Tonnen. Solche Massen an Ausrüstung können nicht sterilisiert werden. Außerdem werden große Mengen an Schmierstoffen verwendet, um die Gewinde am Bohrgestänge gängig zu halten. Diese normalerweise aus Erdöl gewonnenen Stoffe können sich in geringen Mengen in der Bohrspülung lösen. In einem solchermaßen kontaminierten Kern ist es nicht mehr möglich, die natürlich vorkommenden Kohlenwasserstoffe von denen des Gewindefetts zu unterscheiden. Um diesem Problem vorzubeugen, müssen die bis zu mehrere Kilometer Bohrgestänge vor der Benutzung aufwändig entfettet werden. Anstelle von Kohlenwasserstoff-basierten Schmierstoffen können auch synthetische Schmierstoffe eingesetzt werden, die aus nicht natürlich vorkommenden Komponenten bestehen. Bei der vom GFZ durchgeführten DEBITS (Deep Biosphere in Terrestrial Systems)-Bohrung in Neuseeland wurde beispielsweise ein Schmierfett aus synthetischem Biberöl benutzt.

## Kontaminationskontrolle

Selbst mit größten Vorsichtsmaßnahmen gelangen Mikroben und unerwünschte Substanzen von der Oberfläche ins Bohrloch. Da sich die Kontamination nicht vermeiden lässt, muss ihre Ausbreitung verfolgt werden, um unkontaminierte Berei-

che zu identifizieren, aus denen geeignete Proben gewonnen werden können. Es geht also bei einer mikrobiologischen Bohrung in erster Linie um Kontaminationskontrolle und nicht um Kontaminationsvermeidung.

Alle Methoden der Kontaminationskontrolle beruhen darauf, dass eine Substanz der Bohrspülung zugesetzt wird (ein sogenannter „Tracer“), die nicht natürlich vorkommt, möglichst einfach auch in geringsten Konzentrationen mit hoher Genauigkeit quantifiziert werden kann und nach Möglichkeit nicht die geplanten Analysen beeinflusst.

Zur Kontaminationskontrolle werden kleine Proben aus dem Bohrkern entnommen, normalerweise je eine von der Außenkante und dem Zentrum des Kerns, sowie eine oder zwei Proben dazwischen. Aus diesen Proben wird anschließend der Tracer extrahiert und quantifiziert. Da die Konzentration des Tracers in der Spülung bekannt ist, kann berechnet werden, wie viel Bohrspülung in den Kern eingedrungen ist.

Zwei häufig eingesetzte Tracer sind Uranin (Na-Fluorescein) und Perfluorocarbon (Perfluoro-1,3-dimethylcyclohexan). Uranin ist ein sogenannter Farbstofftracer, er fluoresziert bei Anregung mit UV-Licht leuchtend grün. Diese Fluoreszenz lässt sich sehr empfindlich mit einem Fluorometer messen, wodurch sich auch sehr geringe Konzentrationen nachweisen lassen. Von allen Tracern ist Uranin mit Abstand der preiswerteste, doch leider lässt er sich nicht überall anwenden, da er auch bei Tageslicht leuchtend grün schimmert. Die Substanz ist zwar ungiftig, kann aber Seen und Flüssen eine neongrüne Färbung verleihen. Zudem reicht in einigen Fällen die Empfindlichkeit der Messung nicht aus, um extrem geringe Kontaminationen der Proben festzustellen. Die Empfindlichkeit beim Nachweis von Uranin



Abb. 3: Um zu vermeiden, dass die Organismen in den Bohrkernen durch Temperaturen geschädigt werden, die zu stark von der In-situ-Temperatur abweicht, muss die Beprobung der Bohrkerngegebenenfalls im Kühlraum stattfinden. (Foto: J. Kallmeyer, GFZ)

Fig. 3: To avoid damaging deep biosphere organisms by temperatures that deviate too much from their in-situ temperature, it might be necessary to do all sampling inside a reefer.

reduziert sich deutlich, wenn die extrahierte Probe eine Eigenfärbung hat, z. B. durch einen hohen Anteil an Huminstoffen.

Perfluorocarbon-Tracer ist nicht wasserlöslich und muss daher permanent in dosierten Mengen durch die Ansaugöffnung der Bohrspülpumpe in die Bohrung eingebracht werden. Aus einem frisch gebohrten Kern werden die Proben zügig für die Kontaminationskontrolle entnommen und in gasdichte Glasgefäße mit etwas Wasser überführt. Nach einer kurzen Erwärmung tritt der Perfluorocarbon-Tracer aus dem Wasser aus und befindet sich in der Gasphase, in der er über Gaschromatographie analysiert werden kann. Dieses Verfahren ist wesentlich empfindlicher, benötigt aber einen Gaschromatographen vor Ort – ein deutlicher Nachteil gegenüber der Farbstoffmessung, die mit einem handlichen Fluorometer durchgeführt werden kann.

Eine andere Form von Tracer sind die sogenannten Partikel-tracer, auch bekannt als Microspheres oder Microbeads. Dabei handelt es sich um fluoreszierende Kunststoffpartikel mit einer Größe im Bereich von  $0,5\ \mu\text{m}$ , also etwa der typischen Größe einer Mikrobenzelle in der tiefen Biosphäre (Abb. 2).

Diese Partikel können über Zentrifugation in gesättigter Kochsalzlösung aus der Sedimentprobe extrahiert und auf einen Filter überführt werden, auf dem man sie unter einem Fluoreszenzmikroskop auszählt. Leider sind diese Partikel sehr teuer, so dass sie sich nicht für tiefe Bohrungen mit großen Mengen an Bohrflüssigkeit eignen.

Wie tief die Bohrspülung in einen Kern eindringt, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Der Wichtigste ist die Porosität des zu bohrenden Sediments oder Gesteins. Je poröser und durchlässiger das Material ist, umso schneller und tiefer dringt die Bohrspülung ein und macht die Proben unter Umständen unbrauchbar für die Mikrobiologie. Ein weiterer Faktor ist der Flüssigkeitsdruck am Bohrkopf: bei einem zu hohen Druck wird die Spülung in das Gestein vor dem Bohrer hineingepresst. Trotz all dieser widrigen Umstände lassen sich selbst in größten Tiefen noch unkontaminierte Proben gewinnen.

## Geomikrobiologie mit hohem Anspruch

Wie bereits beschrieben, ist eine Tiefbohrung eine – geobiologisch gesehen – recht schmutzige Angelegenheit, bei der große und schwere Maschinen eingesetzt werden müssen. Das steht offensichtlich in einem starken Gegensatz zur mikrobiologischen Forschung, bei der mit kleinsten Lebewesen unter extrem sauberen Bedingungen gearbeitet wird. Der Anspruch an eine aus geomikrobiologischer Sicht erfolgreiche Bohrkampagne ist daher sehr hoch. In den letzten Jahren hat sich mit zunehmender Erfahrung deutlich gezeigt, dass sich der Mehraufwand bei einer frühzeitigen Einbindung der Geomikrobiologie in die Planung der Bohrung auf ein Minimum reduzieren lässt. Die Gewinnung unkontaminierter Proben ist auch für geochemische Analysen von großer Bedeutung.

## Ausblick

Die Erforschung der tiefen Biosphäre ist ohne Bohrungen nicht möglich. Auch wenn sich in den letzten Jahren die Anzahl der wissenschaftlichen Bohrprojekte mit einer geomikrobiologischen Komponente deutlich erhöht haben, ist das Wissen noch immer fragmentarisch. Ein wichtiges Ziel der beiden großen wissenschaftlichen Bohrprogramme (ICDP, IODP) wird die Einführung von standardisierten Probennahmen bei allen zukünftigen Bohrungen sein. Auch wenn dabei nur wenige Parameter gemessen werden, wird sich die Datenbasis signifikant vergrößern und ein genaueres Bild der Lebensräume im tiefen Untergrund liefern. Auch regionale Unterschiede der tiefen Biosphäre und damit der Stoffkreisläufe können so erfasst werden – eine wichtige Grundlage für die Nutzung des Untergrunds und die Bewertung des globalen Wandels.

## Literatur

- Bischoff, J., Mangelsdorf, K., Gattinger, A., Schloter, M., Kurchatova, A. N., Herzsich, U., Wagner, D. (2013): Response of methanogenic archaea to late pleistocene and holocene climate changes in the siberian arctic. - *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 2, 305-317. DOI: <http://doi.org/10.1029/2011GB004238>
- 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, 163-178. DOI: <http://doi.org/10.1080/01490450902724832>
- 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. DOI: <http://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00209>
- 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, 55-69. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.040>
- Lippmann, J., Stute, M., Torgersen, T., Moser, D., Hall, J., Lihung, L., Borcik, 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, 4597-4619. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00414-9](http://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00414-9)
- 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, 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, 91-101. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.05.007>
- 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, 972-980. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.05.012>

# Probengewinnung in Lockersedimenten

Ulrich Harms, Jens Mingram, Brian Brademann  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Understanding the evolution of Earth's climate and environment in the past plays a crucial role to understand its future. Recovery of sedimentary records deposited in lakes provides access to high-resolution long-term archives of this history. The techniques to unearth these archives have to be adapted in each environment to water depth, sediment length targeted at and consolidation of the strata to be recovered. Coring devices ranging from hand-held corer to a professional-operated drill rig mounted on a modular barge are therefore deployed to recover undisturbed sediments from lakes of different sizes.*

*At the German Research Centre for Geosciences GFZ sediments from small lakes are retrieved mainly through deploying cable-guided piston coring tools from small rafts. Up to almost 100 m core length can be reached with just a small group of scientist. However, in large lakes such as the Dead Sea it is necessary to utilize a marine barge holding a wireline diamond coring drillrig operated by a qualified crew on a 24/7 base. Drillstring lengths of 1000 m and more in several hundred m water depths are retrieved with ICDPs Deep Lake Drilling System.*



Klima- und Umweltveränderungen lassen sich nur verstehen, wenn lange Zeiträume betrachtet werden. Aus direkt gemessenen Wetteraufzeichnungen, wie sie seit etwa 130 Jahren vorliegen, kann nur ein sehr eingeschränktes Bild gewonnen werden. Deshalb sind neben historischen Daten vor allem geologische Archive wichtig, denn nur sie bieten einen Blick in die Vergangenheit der Entwicklung der Erdoberfläche und eine ausreichend lange Basis für die Modellierung möglicher zukünftiger Veränderungen.

Ein geologisches Archiv speichert kontinuierlich Wetterparameter wie Temperatur, Niederschlag, Wind, Sonnenschein oder Frost über lange Zeiträume. Beispielsweise zeichnen die Wachstumsringe von Bäumen „gute“ und „schlechte“, also wachstumsfördernde oder -hemmende Jahre in einer Region auf und lassen sich an heutigen Witterungsbedingungen eichen; zudem können die Ringe zurückdatiert werden. Gletschereis und Tropfsteine aus Höhlen weisen vergleichbare Wachstumssäue auf, die mit Niederschlagsereignissen korreliert werden können und sich auch (radiometrisch) datieren lassen. Auch laminierte Sedimente in Seen lassen sich teilweise jährlich oder jahreszeitlich zuordnen und beinhalten eine Vielzahl von Informationen zu Klima und Umwelt. Der Bewuchs im Umfeld eines Sees kann aus Pollen abgeleitet werden, Mineralneubildungen deuten auf Wassertemperatur sowie Wasserchemie hin und Fossilien zeigen spezielle Bedingungen an. Da Seen über Tausende bis Millionen Jahre existieren, können regionale Klimadaten aus deren Sedimenten ausgelesen werden. Eine Grundvoraussetzung ist allerdings, dass die Ablagerungen vom Seegrund auch ungestört und kontinuierlich gewonnen werden können.

*Links: Gemeinsame Bohrkampagne des GFZ und der Polnischen Akademie der Wissenschaften, Torun, auf dem Czechowskie-See. Anhand der Bohrkernne kann die Klima- und Umweltgeschichte seit dem Zeitpunkt der Entstehung des Sees am Ende der letzten Eiszeit rekonstruiert werden. (Foto: A. Brauer, GFZ)*

*Left: Joint drilling campaigns carried out by the GFZ and the Polish Academy of Science, Torun, on Lake Czechowskie. With the aid of the recovered drill cores it is possible for scientists to reconstruct the climate and environmental history since the formation of the lake at the end of the last ice age.*

## Seesedimentgewinnung mit Stechbohrverfahren

Es gibt eine Vielzahl von Verfahren, mit denen im kleinen Maßstab und mit geringem Aufwand unverfestigte Sedimente aus Seen gewonnen werden. Die Spannweite reicht hier von einigen Dezimetern Sediment mit einem Freifall-Lot aus dem Schlauchboot bis hin zu fast 100 m Seesediment mit dem sogenannten Usinger-Corer. Diese Techniken sind keine drehenden Bohrverfahren, sondern stechen mit dünnwandigen Kunststoff- oder Metallrohren Kerne aus dem Seeboden. Grundsätzlich sind die Gerätetypen zur Gewinnung von Seesedimenten zu untergliedern in a) geführte Kolbenlot-Stechverfahren (Usinger, Niederreiter, Merkt/Streif), b) Gravitations- oder Freifall-Corer mit und ohne Kolben (Kullenberg, Ghilardi, KTH Kajak) und c) Gefrierkernverfahren unter Verwendung von Kühlmitteln. Fast alle diese Verfahren sind auch am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ verfügbar und wurden bei unterschiedlichsten Expeditionen weltweit eingesetzt. Hier sollen zwei Verfahren vorgestellt werden, die am GFZ häufig genutzt werden.

### Usinger-Bohrsystem

Das Usinger-Bohrsystem nutzt zur Kerngewinnung 1 oder 2 m lange Metallrohre mit nur 1 mm Wandstärke. Ursprünglich für das präzise Ausstechen von Profilen in Torfen entwickelt (Usinger, 1991), wurde das Gerät schrittweise für tiefere Bohrungen weiterentwickelt bis zur maximalen Wassertiefe von etwa 50 m. Die bisher erreichte größte Kernlänge beträgt 95 m Sediment bei 13 m Wassertiefe (Mingram *et al.*, 2007). Wie bei allen Kolbenloten wird zum Stechen der an der Unterseite des Kernrohrs fixierte Kolben gelöst und auf Position gehalten, während das Kernrohr in das Sediment vorgetrieben wird (Abb. 1). Somit wandert der Kolben im Kernrohr relativ nach oben bzw. das Kernrohr am Kolben vorbei nach unten in das Sediment. Eine Besonderheit des Usinger-Systems ist das doppelte Gestänge, d. h. ein hohles Bohrgestänge zur Kraftübertragung mit innen laufendem separatem Gestänge zur Fixierung des Kolbens. Diese präzise Kolbenfixierung erlaubt zusammen mit den dünnwandigen Kernrohren ein sehr sauberes und ungestörtes Ausstechen der Sedimente, was insbesondere für feingeschichtete und warvierte Sedimente von großer Bedeutung ist. Die Kraft zum Vortrieb des Kernrohrs kann für die oberen, noch sehr weichen 3 bis 5 m Seesediment meist manuell aufgebracht werden. Danach wird ein benzingetriebener Vibrationshammer mittels Schlagstück oben auf das Bohrgestänge aufgesetzt. Für den Vortrieb in größere Tiefen können auch sukzessive kleinere Rohrdurchmesser eingesetzt werden, von anfänglich



**Kontakt:** U. Harms  
(ulrich.harms@gfz-potsdam.de)

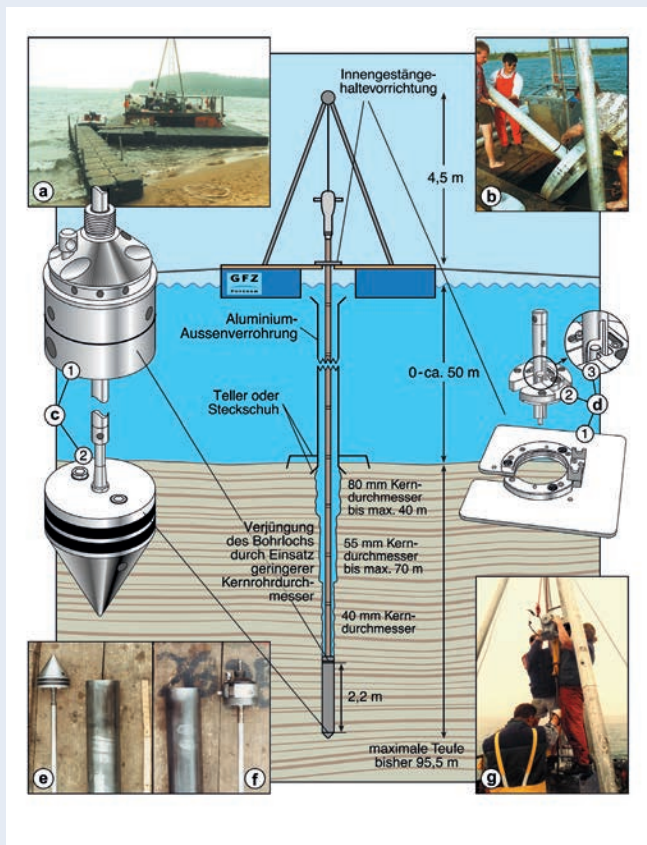


Abb. 1: Schema des Usinger-Bohrsystems für Seesedimente mit  
 a) großem Floß aus Pontons;  
 b) Einführen der Aluminium-Aussenverrohrung mit Grundplatte;  
 c) Details von Kopf (1) und Kolben (2);  
 d) Innengestänge-Haltevorrichtung zum Fixieren des Kolbens mit  
 (1) Grundplatte für Innengestänge-Haltevorrichtung,  
 (2) Innengestänge-Haltevorrichtung und  
 (3) Detail der Innengestänge-Haltevorrichtung;  
 e) Kolben mit Innengestänge und Kernrohr;  
 f) Kopf mit Haltering und Kernrohr;  
 g) Vortrieb mit aufgesetztem Vibrations-Hammer  
 (Zeichnung: A. Hendrich, GFZ; Fotos: J. Mingram, GFZ)

Fig. 1: Scheme of the Usinger Lake Coring System with  
 a) large raft of pontoon;  
 b) lowering of the aluminum casing with base plate;  
 c) details of drill head (1) and piston (2);  
 d) inner rod fixing device with  
 (1) base plate of inner rod fixing device,  
 (2) inner rod fixing device, and  
 (3) detail of the inner rod fixing;  
 e) piston with inner rod and steel core barrel;  
 f) head with barrel holder and steel core barrel;  
 g) top-drive through motor hammer.

100 mm Durchmesser bis hin zu 40 mm für härtere Sedimente. Das Bohrloch wird beim Usinger-Verfahren nicht verrohrt: das Kolbenlot drückt mit jedem neuen Kernrohr das bereits vorhandene Loch wieder frei. Erstaunlicherweise sind die Bohrlöcher selbst im weichen Seesediment recht stabil, so dass bei tiefen Bohrungen auch mehrere Tage im selben Bohrloch gearbeitet werden kann.

Die tiefsten bisher abgeteufte Bohrungen mit dem Usinger-System stammen aus dem Lago Grande di Monticchio in Süditalien. Hier reichen die Sedimente aus einem 95 m tiefen Bohrloch bis in das Ende der vorletzten Eiszeit zurück. Andere lange Sedimentsequenzen konnten aus Maarseen der Eifel und aus Maar- und Kraterseen in China gewonnen werden.

### Niederreiter-Kolbenlot

Das Niederreiter-Kolbenlot ist ein seilgeführtes, hydraulisch-mechanisches Stechbohrsystem mit Elektrowindenunterstützung (Abb. 2). Es hat gegenüber dem Usinger-System den Vorteil, auch bei größeren Wassertiefen eingesetzt werden zu können. Das von einem stabilen Floß aus am Seil geführte System wird über einen auf dem Seegrund stehenden Trichter mit Auslöse- und Haltevorrichtung für den Kolben in das Sediment geführt. Die Kolbenfixierung wird, ganz ähnlich wie beim Usinger-System, über ein Innengestänge realisiert. Der Vortrieb erfolgt über am Seil hängende Gewichte (4 x 20 kg) über dem Trichter. Durch über dem Kernrohr eingefügte Verlängerungsstangen erfolgt die Veränderung der jeweilig zu erreichenden Bohrtiefe (Sedimenttiefe). Wahlweise können PVC-Kernrohre oder Stahlbohrkammern mit innenliegenden PVC-Bohrkernhülsen (Liner) zum Kern eingesetzt werden. Es können Wassertiefen bis zu 240 m erreicht und maximal 30 m Sedimentprofil gestochen werden. Das speziell konstruierte Aluminiumfloß



Abb. 2: Niederreiter-Bohrplattform auf dem Czechowskie-See (Polen, 2012) (Foto: B. Brademann, GFZ)

Fig. 2: Niederreiter Coring platform on Lake Czechowskie (Poland, 2012)



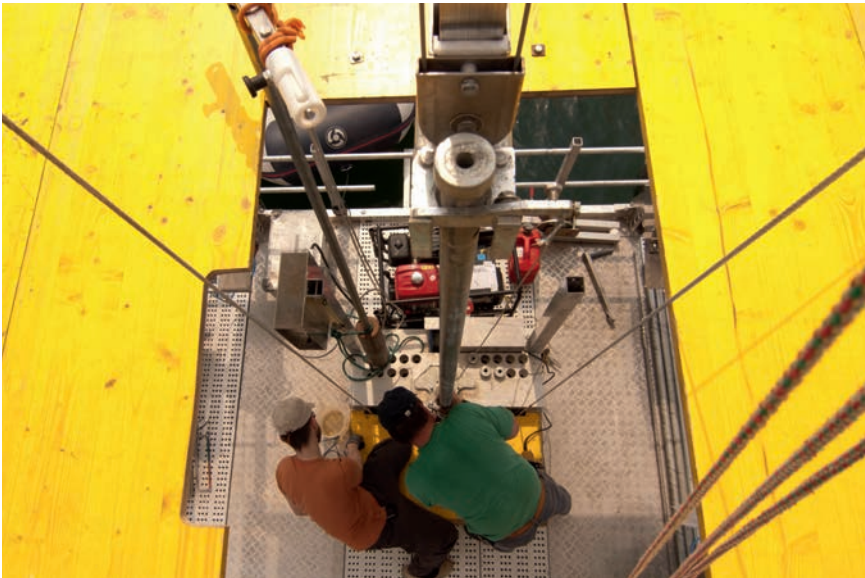


Abb. 3: Detailansicht des Niederreiter-Systems von oben – Gestängelift mit Bohrgestänge und Seilführung (Kamerun 2014, Lake Barombi Mbo-See) (Foto: Y. Garcin, Universität Potsdam)

Fig. 3: Detail of Niederreiter coring system from atop – mechanical lift with drilling rods and guiding ropes on Lake Barombi Mbo (Cameroon, 2014)

mit aufblasbaren Schwimmkörpern trägt ein Vierbein mit Arbeitsbühne und einen motorgetriebenen Lift für die schweren Bohrgestänge (Abb. 3). Mit einem Gewicht von etwa 3 t ist es noch mit einem Geländewagen plus Anhänger transportierbar. Anfang 2014 wurden vom GFZ mit diesem Verfahren z. B. aus dem 105 m tiefen Kratersee Barombi Mbo (Kamerun) drei Kerne von bis zu 20,5 m Gesamtlänge gezogen.

## Bohrungen in tiefe Seen

Kontinentale Archive aus großen und langfristig existierenden Seen bieten regionale Klimaproxydaten von hoher Auflösung über lange Zeiträume. Deshalb sind diese im letzten Jahrzehnt zunehmend in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen gerückt. Mittlerweile sind elf große Seen wie Titicaca, Malawi, Totes Meer und Ohrid im Rahmen des am GFZ koordinierten Internationalen Kontinentalen Wissenschaftlichen Bohrprogramms ICDP (vgl. Einleitungsartikel von Harms in diesem Heft) untersucht worden.

Aus dem Baikalsee in Sibirien wurde 1998 eine lange Kernstrecke von einer im See eingefrorenen Barke aus erbohrt. Das mehrere Mio. Jahre zurückreichende Klimaarchiv bestätigte das Potenzial von Seesedimenten eindrucksvoll. Daraufhin finanzierte ICDP die Entwicklung einer Seebohranlage, die sich vielfältig auf Seen einsetzen ließ (Abb. 4).

Die „Global Lake Drilling Facility“ GLAD800 wurde auf 800 m Gesamtbohrstranglänge, also Wassertiefe plus der zu durchörternden Sedimentstrecke, ausgelegt. Damit konnte gewährleistet werden, dass mehrere glaziale Zyklen von Warm- und Kaltzeiten des Quartärs beprobt werden können. Gleichzeitig wurde das Gewicht der Bohranlage so begrenzt, dass eine kleine, modulare Barke aus acht 20-Fuss-großen Standardcontainern ausreicht, die Anlage zu tragen.

Beim eingesetzten Seilkernbohrverfahren wird ein Bohrgestänge mit einheitlichem Innenradius vom Bohrturm aus rotiert und nachgeführt. Am unteren Ende wird eine Bohrkronen zum Bohren eines Kerns genutzt. Der Gesteinszylinder wandert beim Bohren in ein Kernrohr. Wenn diese Kerngarnitur mit Gestein gefüllt ist, wird sie mit einem windenbetriebenen Stahlseil aus dem Bohrgestänge nach oben herausgezogen (Abb. 5). Das entleerte Kernrohr kann dann wieder in das Bohrgestänge eingeworfen werden, sinkt auf eine Landeschulter vor der Bohrkronen zurück und kann den nächsten Kern aufnehmen. Auf diese Weise wird ein Ausbau des gesamten Bohrstrangs vermieden, das Gestänge bleibt im Bohrloch und kann kontinuierlich Kerne gewinnen. Nur bei einer Abnutzung der Bohrkronen muss der Strang zum Austausch der Kronen ausgebaut werden und dabei das Bohrgestänge einzeln zeitaufwändig entschraubt und Stange für Stange abgelegt werden.

Die Barke wird mit vier elektrischen Seilwinden über dem Bohrloch gehalten. Betongewichte oder Pflugschar-Anker dienen je nach Seebodenbeschaffenheit zur Fixierung der Plattform. Parallelbohrungen können durch leichtes Versetzen abgeteuft werden, Wind- oder Wellendrift wird per GPS kontrolliert und die Plattform entsprechend nachgesteuert. Die GLAD800-Barke besteht aus acht verbundenen Transportcontainern, deren Auftrieb durch eine eingespritzte Hartschaumfüllung sowie eine darunter liegende Gummiblase gewährleistet wird. Letztere wird zum Schleppen der Barke auf dem See aufgepumpt und beim Bohren zur Dämpfung des Wellengangs entleert. Beim Transport über Land werden Hartschaum und Blase aus dem Container entfernt und die gesamte Ausrüstung inklusive des Bohrgeräts darin verstaut.

Da die GLAD800 bei hohem Wellengang instabil ist und das dünne Bohrgestänge Sand- oder Aschelagen nicht sicher durchstoßen kann, wurde 2009 die neue ICDP-Seebohranlage



Abb. 4: Seebohrgerät GLAD800 auf dem Bosumtwi-See in Ghana. Die Barke besteht aus ausgeschäumten Containern und trägt eine modifizierte Seilkernbohranlage mit 800 m Gestängekapazität. (Foto: J. Kück, GFZ)

Fig. 4: Global Lake Drilling Facility GLAD800 with barge consisting of foam-supported containers holding a modified wireline coring drill rig of 800 m drillstring capacity on Lake Bosumtwi, Ghana

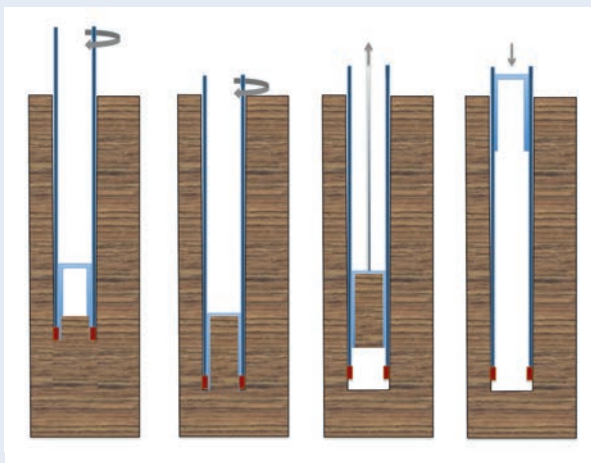


Abb. 5: Prinzip der Gewinnung eines Bohrkerns mit dem Seilkernbohrverfahren

Fig. 5: Sketch of drillcore recovery through wireline coring

Deep Lake Drilling System (DLDS) konstruiert. Sie besteht aus Barkenelementen in 40-Fuss-Containergröße, die für maritime Einsätze konzipiert sind. Sie bilden eine sehr solide Plattform aus sechs Einheiten mit einer Größe von 24,4 x 7,3 m. Die dazu gehörige neue Bohranlage fasst 1400 m Kernbohrbohrgestänge, das starr genug ist, um auch stark verfestigte Lagen sicher zu durchbohren. Es wird mit einem Kraftdrehkopf durch ein 575-PS-Dieselaggregat angetrieben und kann in bis zu 400 m Wasser-

tiefe noch bis zu 1000 m in Sedimente bohren. Wie auch beim Vorgängermodell ist eine professionelle Mannschaft von mindestens drei Bohrtechnikern und zwei Wissenschaftlern zum Einsatz der Bohrplattform erforderlich. Um die notwendige durchgängige Arbeit zu ermöglichen, wird im Zweischichtbetrieb gearbeitet.

Das neue DLDS stellte sich auf der maßgeblich vom GFZ initiierten ICDP-Bohrung im Toten Meer 2011 als sehr stabil heraus und konnte auch im Sommer 2013 erfolgreich in Mazedonien über 2 km Kernstrecke erbohren. An der tiefsten Stelle des Ohridsees, in 250 m Wassertiefe, wurde mehr als 500 m tief ins Sediment gebohrt und mit einer sehr hohen Rate von Kerngewinn von meist deutlich über 90 % die wahrscheinlich mehr als 1,5 Mio. Jahre währende Entwicklung des ältesten Sees in Europa geborgen (Wagner et al., 2014).

### Kernbohrausrüstung zur kontinuierlichen Beprobung

Die standardmäßige Kernausrüstung von Seilkernbohranlagen ist für den Probengewinn in kristallinen Hartgesteinen optimiert. Bei weichen Sedimenten stören Diamantkronen oft das Gefüge. Aus diesem Grund sind spezielle Kernbohrinstrumente für Lockergesteine entwickelt worden, die wie beim oben beschriebenen händischen Bohrgewinn Stechzylinder nutzen. Mehrere Meter lange Piston-Werkzeuge werden mit Scherstiften gesichert und durch das Bohrgestänge eingeworfen, wo sie unmittelbar hinter der Krone einrasten. Die Kernausrüstung wird auf das Bohrlochtiefste aufgesetzt und dann Druck über Bohrspülung mit den Pumpen beaufschlagt, bis die Scherstifte bei einem festgelegten Druck abscheren. Dadurch schießt



Abb. 6: Diamant-Bohrkrone (links) und Vollbohrmeißel im HQ-Größe (96 mm Bohrloch)  
(Foto: J. Kück, GFZ)

Fig. 6: Diamond core drill bit (left) and bit for non-coring mode (right) in HQ size (96 mm hole diameter)

das Stechrohr und der darin liegende Liner ins Sediment. Die innere Kernbohrgarnitur wird dann per Seilwinde gezogen und der Liner mit der Sedimentsäule obertägig entnommen. Diese hydraulischen Piston-Corer funktionieren üblicherweise bis in mehrere Zehner Meter Sedimenttiefe.

Lässt sich kein Bohrfortschritt mit diesen Werkzeugen mehr realisieren, kommen vorausseilende Innenbohrkronen zum Einsatz, bei denen eine sehr schmallippige Innenkrone den Kern aus dem Gestein schneidet und das kurz dahinter nachgeführte Gestänge mit einer größeren Krone das Bohrloch auf Standardgröße erweitert. Bei noch höheren Festigkeiten der zu bohrenden Gesteine kann auf Standarddiamantkronen umgerüstet werden oder – falls keine Kerne in einem Horizont gewonnen werden sollen – ein Vollbohrmeißel eingesetzt werden (Abb. 6). Der Durchmesser des gewonnenen Kerns beträgt bei diesen Verfahren rund 64 mm.

## Ausblick

Seebohrungen liefern zentrale Bausteine für die globale Klima- und Umweltrekonstruktion. Es werden geologische Klimaarchive aus verschiedenen Zonen der Kontinente wie den Polargebieten, den Tropen und den gemäßigten Breiten untersucht, die dazu beitragen, natürliche Klimaschwankungen und -sprünge besser zu verstehen. Ein Beispiel ist die vom GFZ mit initiierte Bohrung mit der GLAD800 in den Elgygytgyn-See in der nordöstlichen sibirischen Arktis. Dort hat sich gezeigt, dass extreme Warmzeiten in der Arktis mit antarktischen Gletscherrückgängen parallel verlaufen sind (Melles *et al.*, 2012), also unerwartete globale Fernbeziehungen in Klimaschwankungen existieren.

Gegenwärtig werden im ICDP Seebohrungen in tropischen Regionen wie dem Junín-See in Peru und auf der indonesischen Insel Sulawesi im Towuti-See vorbereitet, um Lücken im Verständnis der tropischen Klimavariationen, z. B. im Hinblick auf das El Niño/La Niña-Phänomen, zu schließen.

## Literatur

- Melles, M., Brigham Grette, J., Minyuk, P. S., Nowaczyk, N., Wennrich, V., DeConto, R. M., Anderson, P. M., Andreev, A. A., Coletti, A., Cook, T. L., Haltia Hovi, E., Kukkonen, M., Lozhkin, A. V., Rosén, P., Tarasov, P., Vogel, H., Wagner, B. (2012): 2.8 Million Years of Arctic Climate Change from Lake El'gygytgyn, NE Russia. - *Science*, 337, 6092, 315-320.  
DOI: <http://doi.org/10.1126/science.1222135>
- Mingram, J., Negendank, J. F., Brauer, A., Berger, D., Hendrich, A., Köhler, M., Usinger, H. (2007): Long cores from small lakes—recovering up to 100 m-long lake sediment sequences with a high-precision rod-operated piston corer (Usinger-corer). - *Journal of Paleolimnology*, 37, 4, 517-528.  
DOI: <http://doi.org/10.1007/s10933-006-9035-4>
- Usinger, H. (1991): Ein Stechbohrgerät zum Bergen von Torfen und Seesedimenten für den Einsatz bis zu größeren Tiefen. - In: Negendank, J. W. F., Zolitschka, B. (Eds.), *Symposium on Paleolimnology of Maar Lakes: program, abstracts, excursion guide*, International Symposium on Paleolimnology of Maar Lakes (Bitburg, Germany 1991), p. 55.
- Wagner, B., Wilke, T., Krastel, S., Zanchetta, G., Sulpizio, R., Reicherter, K., Leng, M., Grazhdani, A., Trajanovski, S., Levkov, Z., Reed, J., Wonik, T. (2014): More Than One Million Years of History in Lake Ohrid Cores. - *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95, 3, 25-26.  
DOI: <http://doi.org/10.1002/2014EO030001>

# Untertageexploration – Instrumente und Methodenentwicklung

Rüdiger Giese und Jochem Kück

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Borehole measurements or downhole logging is a powerful method to in-situ gain quasi-continuous profiles of physical, chemical and structural rock parameters with high depth accuracy. It is widely used in both academic research and commercial exploration for oil and gas, mining industry, geothermal and water engineering. The GFZ section Scientific Drilling facilitates logging in two ways, first through service and applying a set of downhole instruments and second through developing novel methods and tools. Logging support is provided to scientific projects and covers assistance with planning and logistics of downhole logging programs, logging service through operating a versatile set of own downhole sondes, including geophysical and structural logging tools, a seismic chain and a fluid sampler. In order to expand the possibilities of in-situ borehole information new tools are developed jointly with academic and industrial partners. The most advanced sonde development strives to image geological structures by using high-resolution borehole seismics to explore hydrocarbons or geothermal resources by detecting thin layers and faults. The SPWD (Seismic Prediction While Drilling) borehole prototype sonde combines seismic sources and receivers in one device to improve the resolution. Two downhole test sites, the KTB-Deep Crustal Lab in Windischeschenbach and the GFZ Underground Lab in the mine “Reiche Zeche” in Freiberg offer unique in-situ conditions for experiments and tests of the borehole equipment.*



Mit Bohrlochmessverfahren („Borehole Logging“), d.h. Messungen direkt im Bohrloch, können kontinuierliche Profile physikalischer, chemischer und struktureller Parameter des Untergrunds mit hoher Tiefengenauigkeit unter *In-situ*-Bedingungen gewonnen werden. Diese sehr leistungsfähige Methode bietet zudem die Möglichkeit, Parameter im Bohrloch zu bestimmen, die normalerweise zeitaufwendig im Labor an den erbohrten Gesteinskernen ermittelt werden, wie z. B. die natürlich vorkommende Radioaktivität, elektrische Eigenschaften, Schallwellengeschwindigkeiten, Dichte, Porosität, magnetische Suszeptibilität und die chemische Gesteinszusammensetzung. Darüber hinaus können auch Parameter erfasst werden, welche nicht oder nur unzureichend übertägig messbar sind: Tiefenprofile von Temperatur, Druck, Schwere- und Magnetfeld, orientierte Abbildungen der Bohrlochwand und die Richtung des Spannungsfelds. Mittels Wiederholungsmessungen können zudem zeitliche Variationen festgehalten werden. Neben der wissenschaftlichen Untersuchung des Untergrunds werden Bohrlochmessungen auch in der kommerziellen Exploration, vor allem für Öl, Gas, Bergbau, Wasserbau und geothermische Energie angewendet.

Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ betreibt die Gruppe „Wissenschaftliches Bohren“ eine umfangreiche Infrastruktur für Bohrlochmessungen mit Sonden, Winden, Mess-LKW und Register-einheiten, um Forschungsbohrungen eigenständig vermessen zu können. Außerdem werden neue Erkundungsmethoden und Geräte für Messungen im Bohrloch, insbesondere seismische Methoden entwickelt. Die in der Gruppe „Wissenschaftliches Bohren“ angesiedelte Operational Support Group des Internationalen Kontinentalen Wissenschaftlichen Bohrprogramms ICDP, unterstützt ICDP-Vorhaben in allen Stadien eines Bohrprojekts bei Vorbereitung, Management, Ausführung sowie Datenarchivierung und -bereitstellung. Sie ist die Schnittstelle zwischen den ICDP-Gremien, den Projekten und dem GFZ.

*Links: Übersetzen zur Bohrplattform auf dem Toten Meer in Israel. Im Dead Sea Drilling Project DSDP des ICDP führte die Operational Support Group des GFZ Bohrlochmessungen an zwei Bohrlo-kationen auf dem See bis in eine Tiefe von 750 m bei bis zu 300 m Wassertiefe durch. (Foto: J. Kück, GFZ)*

*Left: The logging day shift being ferried to the drilling barge on the Dead Sea in Israel. In the Dead Sea Drilling Project DSDP of ICDP the Operational Support Group at GFZ conducted downhole logging at two sites on the lake to a depth of 750 m at water depths up to 300 m.*

## Borehole Logging

Beim Wireline Borehole Logging wird eine Messvorrichtung (Bohrlochsonde) an einem Kabel zunächst in ein Bohrloch eingefahren. Dann werden die jeweiligen Messparameter mit üblicherweise aufwärts fahrender Sonde gegen die Tiefe aufgezeichnet. Neben diesen quasi-kontinuierlichen, tiefenbezogenen Messungen gibt es auch Methoden mit diskreten, stationären Positionen der Sonde im Bohrloch für zeitbezogene Aufzeichnungen oder räumliche Abbildung des Bohrlochumfelds. Die verwendeten Bohrlochsonden sind an die rauen Bohrlochbedingungen angepasste, hochkomplexe Messinstrumente. Sie besitzen einerseits miniaturisierte Messapparaturen, da sie in ein Hüllrohr mit einem Durchmesser von nur 90 mm oder weniger eingepasst werden müssen. Andererseits müssen Hüllrohr und Elektronik/Sensorik hohem Druck und hoher Temperatur widerstehen und dennoch präzise Messungen ausführen. Die Bohrlochsonden werden üblicherweise an einem Kabel, das mehrere Datenleiter enthält, in das Bohrloch gefahren.

Im Bohrloch gemessene Daten bilden eine wichtige Grundlage für die geologische Interpretation der durchbohrten Formationen, der Lithologieidentifikation und ihrer physikalischen Charakterisierung. Bohrlochmessungen sind unabdingbar bei der Auffindung und Charakterisierung von diskreten Strukturen im Bohrloch, wie Kluftsystemen, Störungszonen und fluid- oder erzführenden Zonen. Im Bohrloch ermittelte Daten dienen zudem der Tiefenkorrelation von Bohrkernen und zum Füllen von Lücken in der Kernsequenz. Sie liefern auch für die Bohrtechnik wichtige Informationen zu Bohrlochgeometrie, Temperatur und Salinität der Bohrspülung und der Zementqualität. Spezielle Bohrlochverfahren ermöglichen die untertägige Beprobung des Bohrlochfluids und der Bohrlochwand. Da die Einsatzmöglichkeiten des Borehole Loggings so vielfältig sind (Tab. 1), muss für jedes Projekt ein auf die speziellen Bedingungen und Anforderungen optimiertes Bohrlochmessprogramm erarbeitet werden.

## ICDP Operational Support Group

Die Priorität von Bohrlochmessungen und deren Anteil an wissenschaftlichen Bohrprojekten ist abhängig von den primären Zielstellungen des Projekts und dem zur Verfügung stehenden Budget und daher sehr variabel. Um nationalen und internationalen Projekten einen Mindeststandard an Loggingdaten zu ermöglichen, stellt die Operational Support Group (OSG) einen Logging-Service zur Verfügung. Dem jeweiligen Projekt werden lediglich die Kosten für Transport, Reise, Sondenversicherung und Sondenwartung in Rechnung gestellt.



**Kontakt:** J. Kück  
(jochen.kueck@gfz-potsdam.de)

Tab. 1: Wissenschaftliche Zielstellungen (linke Spalte) und die dazu verwendeten Bohrlochmessverfahren (obere Zeile)  
 Tab. 1: Scientific targets vs. contributing logging methods

Bohrloch-messverfahren	SGR/GR	Density	Porosity	Sonic	Resistivity	Magnetik	Image Logs	TEMP	Kaliber/Orien-	Mud Resist.	Flow	Druck	Fluidproben	Dipmeter	Seismik	Gravimeter	Seitenkerne
Lithologie	x	x	x	x	x										x	x	x
Mineralogie	x	x			x	x	x										x
Alteration			x	x			x									x	x
Frac-Erkennung	x			x	x		x	x	x	x	x	x		x			
Poro/Perm			x	x	x					x							x
Strukturen				x	x		x		x					x	x		x
Fluidsysteme	x		x				x	x	x	x	x	x	x				
Spannungsfeld				x			x		x					x	x		
Gasdetektion		x	x		x			x									
Kern/Log-Korrelation	x	x	x	x	x	x	x							x			x
Klima	x					x	x							x			
Bohrtechnik				x				x	x	x		x		x			

**Weitere Informationen zum ICDP-Downhole Logging:**

**Service:**

<http://www.icdp-online.org/support/service/downhole-logging>

**Bohrlochgerätepark:**

<http://www.icdp-online.org/support/equipment/downhole-logging>

Die OSG betreibt einen an die häufigsten in ICDP-Projekten vorkommenden Bohrlochbedingungen angepassten Bohrlochgerätepark, finanziert von ICDP, dem GFZ und aus Drittmitteln. Die Slimhole-Sonden mit maximal 52 mm Durchmesser sind für sehr hohe maximale Temperatur- und Druckbedingungen von 150 °C/80 MPa oder mehr ausgelegt. Fast alle Sonden können zwecks Tiefenkorrelation kombiniert mit einer Sonde zur Messung der natürlichen Radioaktivität (GR-Sonde) gefahren werden. Zwei elektrisch betriebene Logging-Winden sind speziell für den Einsatz der Slimhole-Sonden ausgelegt und decken mit Kabellängen von 2000 m und 600 m den Großteil der ICDP-Bohrlochtiefen ab. Zusätzlich stehen noch zwei schwere Oilfield-Logging-Winden mit Kabellängen von 3500 m und 4500 m zur Verfügung. Die gesamte Slimhole-Logging-Ausrüstung wiegt nur 400 bis 800 kg und kann auf sieben bis zwölf Transportboxen verteilt werden. Damit ist ein schneller und kostengünstiger Lufttransport auch in entlegene Gebiete möglich. Die OSG hat seit 1999 in mehr als 20 Projekten Bohrlochmessungen in 17 Ländern durchgeführt (Abb. 1).

**Beispiel: Elgygytynsee in Sibirien**

Typische Daten aus einem OSG-Logging-Einsatz bei der ICDP-Bohrung am Elgygytynsee in Sibirien sind in Abb. 2 dargestellt (Gebhard et al., 2013). Hier werden jeweils die Untertagesmessungen der Bohrlochwand (Logging) mit den an den Bohrkernen gewonnenen Daten (Core) verglichen. Dadurch können zum einen die Bohrkern der korrekten Tiefe zugeordnet werden und zum anderen die Daten aus den Kern- und Bohrlochwandmessungen abgeglichen werden. Der See entstand vor 3,6 Mio. Jahren durch einen Meteoriteneinschlag im heutigen Nordostsi-

birien, der einen Krater mit 18 km Durchmesser hinterließ. Hier lagerten sich kontinuierlich Sedimente ab, die ein einmaliges Klimaarchiv darstellen. Die Bohrung durchörterte die Sedimente und das darunter liegende Impaktgestein. Der Übergang von den lakustrinen Sedimenten zu den Impaktgesteinen des Grundgebirges zeigt sich deutlich in den Logs des elektrischen Widerstands (Resistivity) und Kalium (Potassium) aber auch bei den Charakteristika der magnetischen Suszeptibilität (MSUS). Bohrkerndaten sind die Dichte (Density) und die magnetische Suszeptibilität oberhalb 143 m (hellblau), alle anderen Kurven in Abb. 2 sind Bohrlochmessdaten. Eine Clusteranalyse der dargestellten Loggingdaten differenziert drei Einheiten (Cluster 1, 2, 3), wobei Cluster 1 das Grundgebirge darstellt. Bohrtechnische Probleme unterhalb etwa 150 m führten zu sehr lückenhaftem Kerngewinn, vgl. das Dichte-Log. Die kontinuierlichen Bohrlochdaten können diese Lücken füllen. Die aus der Analyse der natürlichen Radioaktivität abgeleiteten Logs Potassium, Uran und Thorium werden nicht vom Stahlrohr gestört. In den Sedimenten können die stark variierenden MSUS-Daten direkt als Klima-Proxiedaten verwendet werden und zeigen unterschiedliche Ablagerungs- und damit Klimabedingungen an. Zum Beispiel zeigt niedrige MSUS, dass Magnetit aufgelöst wurde und das Tiefenwasser aufgrund fehlender Durchmischung sauerstofffrei war; der See war dauerhaft zugefroren, d.h. das Klima war eiszeitlich kalt. Bei hoher MSUS muss Magnetit erhalten geblieben sein und ein sauerstoffreiches Tiefenwasser vorgeherrscht haben infolge Durchmischung des Sees; das Klima war wenigstens zeitweilig so mild, dass der See nicht dauerhaft zugefroren war, also eine Zwischeneiszeit herrschte. Dieses Beispiel zeigt, dass der Einsatz von GFZ-Bohrlochsonden einen wichtigen Beitrag bei der Auswertung von Forschungsdaten leisten kann.

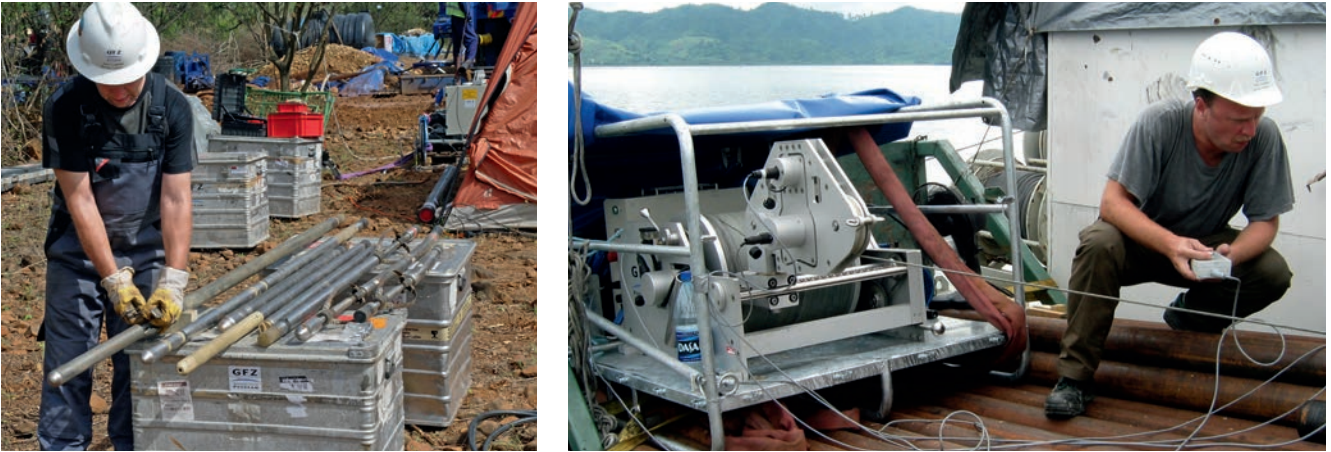


Abb. 1: OSG-Slimhole-Sonden (links) und Winde (rechts) bei Messeinsätzen in Afrika (Fotos: J. Kück, GFZ)

Fig. 1: OSG lightweight slimhole sondes (left) and winch (right) at logging campaigns in Africa

## Methoden- und Sondenentwicklung

Die Bohrlochinstrumente des GFZ müssen auch Anforderungen gerecht werden, die sich z. B. bei der Suche nach wasserführenden Klüften in geothermischen Explorationsbohrungen ergeben. Die GFZ-Gruppe „Wissenschaftliches Bohren“ entwickelt daher neue Methoden und Geräte für spezielle Einsätze. Für die Tests der Neuentwicklungen stehen dem GFZ zwei Testlokationen zur Verfügung, in denen die Meßsensorik getestet wird und die Druck- und Temperaturfestigkeit sowie der Betrieb am langen Messkabel bei rauher Fahrt im Bohrloch unter *In-situ*-Bedingungen nachgewiesen werden können.

Das KTB-Tiefenlabor des GFZ mit einer 4000 m und einer 9100 m tiefen Bohrung, ist eine weltweit einmalige Forschungsstätte für unterschiedlichste Experimente, Tests und Messungen unter *In-situ*-Bohrlochbedingungen (siehe Infografik auf Seite 10 in diesem Heft). Die einfache Zugänglichkeit der umfangreichen Infrastruktur ermöglichen tiefe und/oder lange Bohrlochexperimente zu geringen Kosten. Die Nutzung der Infrastruktur einschließlich der Bohrungen ist kostenlos für wissenschaftliche Forschungsprojekte, während für kommerzielle Nutzer, wie z. B. Servicefirmen und Sondenhersteller, Nutzungskosten abhängig von Dauer und Einfahrtiefe anfallen (<http://www.gfz-potsdam.de/scientific-services/labore/ktb-tiefenlabor>).

Das GFZ-Untertage-Labor „Reiche Zeche“ im gleichnamigen Forschungs- und Lehrbergwerk der TU Bergakademie Freiberg ermöglicht vor allem Tests von seismischen Instrumenten unter kontrollierten Bedingungen. Das Messfeld liegt in 150 m Tiefe in einem von drei Strecken umgebenen Gneisblock von rund 50 m Breite und 100 m Länge. Entlang der Strecken sind 30 Dreikomponenten-Geofonanker im Abstand von 5 bis 9 m in Bohrungen installiert. Zusammen mit zwei horizontalen 8½“ Bohrungen (B1, B2) und einer 70 m tiefen, vertikalen 8½“ Bohrung (B3) durch das Zentrum des Blocks, ermöglicht dies eine dreidimensionale Erfassung von Wellenfeldern (Abb. 3).

## Seismic Prediction While Drilling SPWD

Lagerstätten für Erdöl und Erdgas sowie Heißwasser zur Gewinnung geothermaler Energie findet sich häufig in geringmächtigen Schichten und Störungszonen. Deren Erkundung durch 2D- und 3D-Seismik von der Erdoberfläche aus stellt auf Grund der Dämpfung hoher Frequenzen und somit einer beschränkten Auflösung eine große Herausforderung dar. Eine deutliche Verbesserung der räumlichen Auflösung von Strukturen im Umfeld von Bohrungen soll im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten Projekts „Seismic Prediction While Drilling“ (SPWD) erreicht werden. Die in diesem Projekt entwickelte Bohrlochsonde vereint seismische Quellen und Empfänger in einem Gerät. Daher ist die Entfernung zu den Reflektoren gegenüber anderen seismischen Bohrlochmessverfahren wie VSP (Vertical Seismic Profiling) und SWD (Seismic While Drilling) stark verringert und es können höhere Signalfrequenzen bis zu einigen Kilohertz für die Erkundung von Strukturen im Meterbereich eingesetzt werden. In der neuen SPWD-Sonde bilden vier leistungsstarke magnetostruktive Aktuatoren die seismische Vibrationsquelle (Abb. 4). Durch eine individuelle Steuerung der Aktuatoren kann eine Fokussierung der seismischen Energie durch Interferenz der Wellen in eine definierte Raumrichtung erfolgen. Dies erhöht die Erkundungsreichweite der Sonde und verbessert die Einseitigkeit der räumlichen Abbildung von Strukturen. Die SPWD-Bohrlochsonde ermöglicht somit einen optimalen seitlichen Blickwinkel auf steilstehende Störungen. Sie besteht aus einer Elektronikeinheit, zwei Empfängereinheiten mit jeweils einem Dreikomponenten-Geofon, zwei Spanneinheiten, einer Aktuatoreinheit und einer Hydraulikeinheit. Die Empfängereinheiten, die Quelle und die Spanneinheiten sind mit Stempeln ausgerüstet, die hydraulisch ausgefahren werden, um die Sonde an die Bohrlochwand anzukoppeln und zu zentrieren. Die SPWD-Bohrlochsonde ist rund 7,5 m lang, 750 kg schwer und hat einen Durchmesser von 1587 mm (6¼“). Sie wird am Loggingkabel eingesetzt.

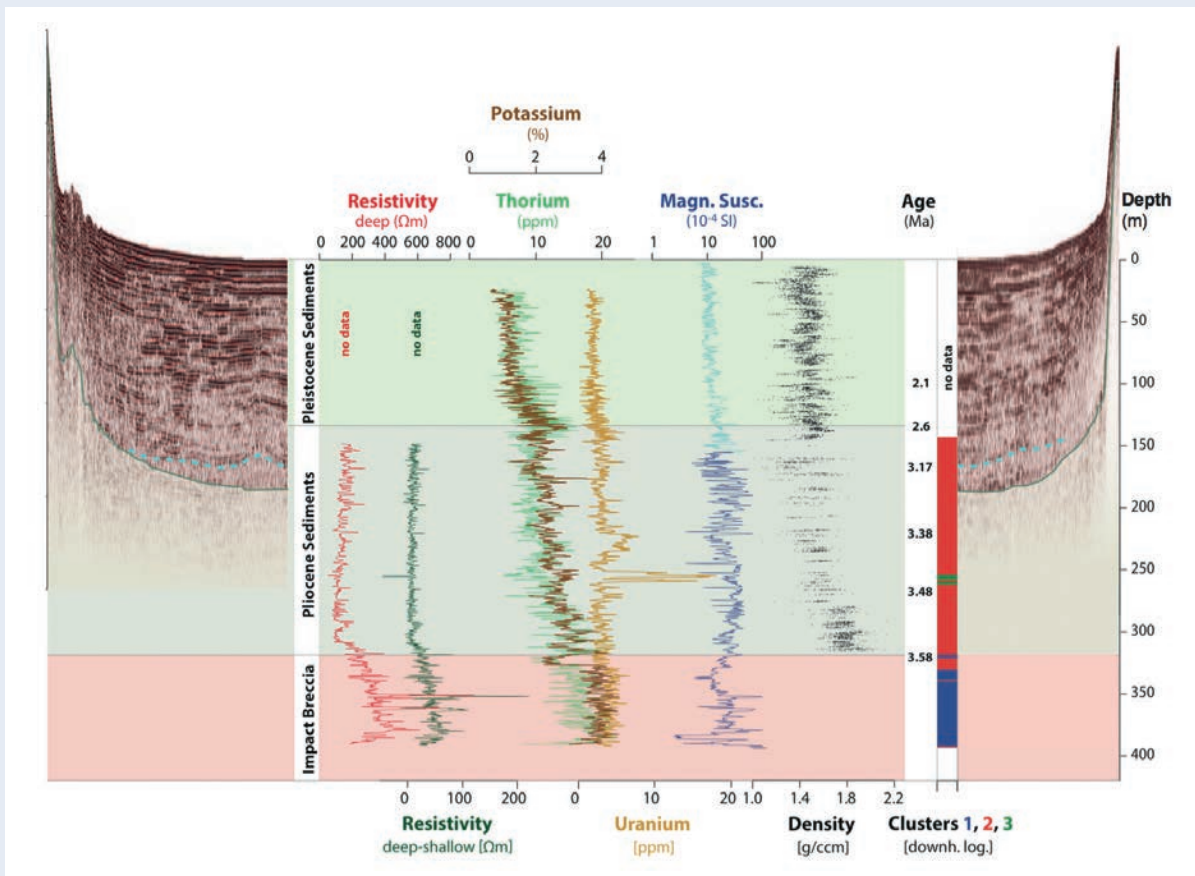


Abb. 2: Charakteristische Logging- und Kerndaten, dargestellt über dem reflexionsseismischen Profil aus dem ICDP-Bohrprojekt am Elgygytgynsee. Der Übergang von den lakustrinen Sedimenten zum impact-bezogenen Grundgebirge zeigt sich deutlich in den Logs des elektrischen Widerstands (Resistivity) und Kalium (Potassium) aber auch bei der Charakteristika der magnetischen Suszeptibilität (MSUS) (nach Gebhardt et al., 2013).

Fig. 2: Borehole and core data (ICDP site 5011-1) printed over the seismic reflection profile from the ICDP project Lake El'gygytgyn Drilling Project. The transition from lacustrine sediments to impact-related bedrock is evident in the resistivity and potassium logs and also in the characteristics change of the magnetic susceptibility log (MSUS). Core data: density and MSUS above 143 m (light blue curve), all other curves are from downhole logging (after Gebhardt et al., 2013).

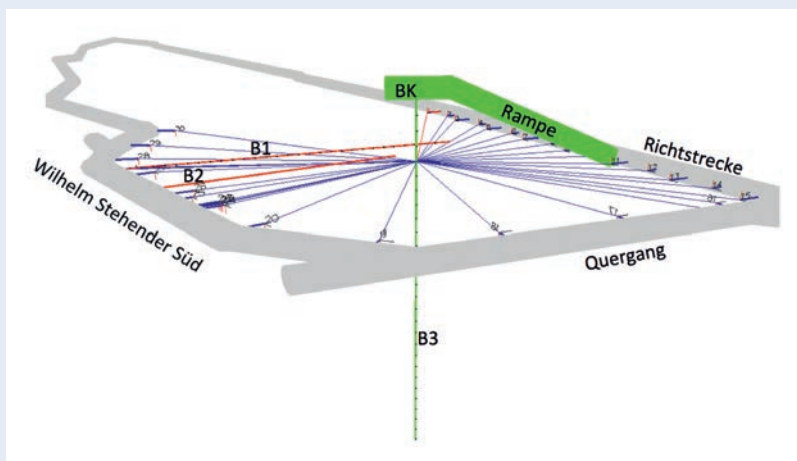


Abb. 3: Perspektivansicht des GFZ-Untertage-Labors in Freiberg. Die horizontalen Bohrungen B1 und B2 sind 30 m und 20 m lang. Für die 70 m tiefe vertikale Bohrung B3 wurde eine 40° geneigte Rampe und eine Bohrkammer (BK) 10 m über der Messebene aus dem Gestein gesprengt. Blau dargestellt sind die Verbindungslinien zwischen einem Anregungspunkt in B3 in 10 m Tiefe und den 30 Dreikomponenten-Geofonen entlang der Strecken.

Fig. 3: Perspective view of the GFZ-Underground-Lab in Freiberg. The horizontal boreholes B1 and B2 are 30 m and 20 m long. To drill a 70 m deep vertical borehole a 40 degree incline ("Rampe") and a chamber (BK) 10 m above the measurement plane were excavated by drilling and blasting. Blue lines mark the rays between a borehole source point at 10 m depth and the 30 3-component geophones.



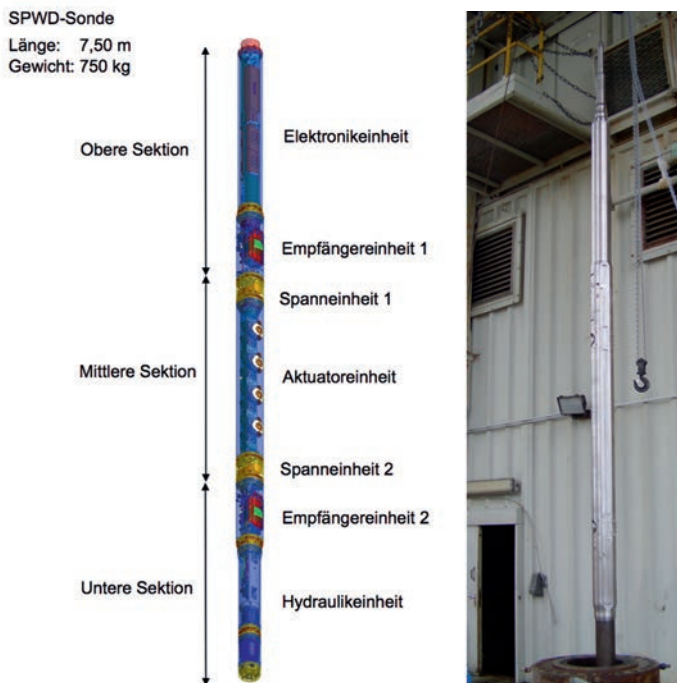


Abb. 4: Aufbau der SPWD-Bohrlochsonde. Links: Konstruktionszeichnung mit den Hauptfunktionseinheiten. Rechts: SPWD-Sonde freihängend über dem Bohrkopf der KTB-Hauptbohrung

Fig. 4: Configuration of the SPWD-prototype. Left: Technical drawing with the main units. Right: SPWD prototype hanging above the well head of the KTB main hole

Nach Umbau und Endmontage wurde die SPWD-Bohrlochsonde im Dezember 2013 mit ersten seismischen Testmessungen im GFZ-Untertage-Labor Reiche Zeche in der 70 m tiefen Vertikalbohrung B3 erfolgreich getestet (Abb. 5). Hier konnten die abgestrahlten Wellen der SPWD-Bohrlochsonde durch die im Untertage-Labor fest installierten Geofone dreidimensional erfasst werden. Die durchgeführten Tests dienten der Überprüfung der Sonderelektronik zur Steuerung der Vibratoren und Registrierung der Empfänger. Dazu wurden Messungen bei unterschiedlichen Anregungslängen und Frequenzen durchgeführt. Bei jeder Messung werden neben den Geofondaten auch die in den Stempeln der Vibratoren integrierten piezoelektrischen Sensoren und das berechnete Pilotsignal zur Steuerung der Quellen aufgezeichnet.

In 2014 werden Messungen zur Kalibrierung der SPWD-Bohrlochsonde und zur Abbildung von bekannten Störungszonen und der Strecken im Bereich des Untertage-Labors durchgeführt. Für die Analyse der erzielten Wellenfokussierung werden die Daten der Geofonsensoren entlang der Strecken genutzt. Der Einfluss von lokalen Inhomogenitäten im Gneis auf die registrierten Amplituden wird mit Hilfe von Geschwindigkeits- und Dämpfungsmodellen aus Tomografmessungen korrigiert (Lüth et al., 2014). Nach der Erprobung und Kalibrierung im Untertage-Labor soll die Sonde in Bohrungen bis 2000 m Tiefe zur strukturellen Erkundung eingesetzt werden. In einem weiteren Entwicklungsschritt ist die Fertigung eines Logging-While-Drilling-Prototyps vorgesehen. Dazu werden die Komponenten des SPWD weiter miniaturisiert und in einen Bohrstang für die Erkundung direkt während des Bohrens eingesetzt.



Abb. 5: Blick in die Bohrkammer des GFZ-Untertage-Labors Reiche Zeche während des Einfahrens der SPWD-Sonde in die Bohrung B3 (Foto: A. Jurczyk, GFZ)

Fig. 5: View into the chamber while the SPWD-prototype is running into the borehole B3

## Literatur

- Gebhardt, A. C., Francke, A., Kück, J., Sauerbrey, M., Niessen, F., Wennrich, V., Melles, M. (2013): Petrophysical characterization of the lacustrine sediment succession drilled in Lake El'gygytgyn, Far East Russian Arctic. - *Climate of the Past*, 9, 4, 1933-1947. DOI: <http://doi.org/10.5194/cp-9-1933-2013>
- Jaksch, K., Giese, R., Kopf, M., Jurczyk, A., Mikulla, S., Weisheit, S., Groh, M., Krüger, K. (2010): Seismic Prediction While Drilling (SPWD): Looking Ahead of the Drill Bit by Application of Phased Array Technology. - *Scientific Drilling*, 9, 41-43. DOI: <http://doi.org/10.2204/iodp.sd.9.07.2010>
- Lueth, S., Bohlen, T., Giese, R., Heider, S., Hock, S., Jetschny, S., Polom, U., Wadas, S., Reclin, A. (2014): Seismic Tomography and Monitoring in Underground Structures: Developments in the Freiberg Reiche Zeche Underground Lab (Freiberg, Germany) and Their Application in Underground Construction (SOUND) - In: Weber, M., Münch, U. (Eds.), *Tomography of the Earth's Crust: From Geophysical Sounding to Real-Time Monitoring: Advanced Technologies in Earth Sciences*, Cham: Springer International Publishing, 115-133. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-319-04205-3\\_7](http://doi.org/10.1007/978-3-319-04205-3_7)
- Melles, M., Brigham Grette, J., Minyuk, P. S., Nowaczyk, N., Wennrich, V., DeConto, R. M., Anderson, P. M., Andreev, A. A., Coletti, A., Cook, T. L., Haltia Hovi, E., Kukkonen, M., Lozhkin, A. V., Rosén, P., Tarasov, P., Vogel, H., Wagner, B. (2012): 2.8 Million Years of Arctic Climate Change from Lake El'gygytgyn, NE Russia. - *Science*, 337, 6092, 315-320. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.1222135>

# InnovaRig – ein wissenschaftliches Labor für die Tiefbohrtechnik

Bernhard Prevedel

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*InnovaRig is a novel drill rig design with a wealth of innovative features for scientific drilling as well as industrial applications at highest standards of modern drilling technology. With its modular and containerized design it offers minimum turn-around time at reduced transportation logistics and a small environmental footprint, ideal for drilling locations in densely populated areas. Innovations have further been made in the areas of noise protection, energy saving and rig automation which reduces manpower as well as operational cost to a minimum. InnovaRig has already completed seven geothermal projects in sedimentary rocks in Germany and is currently planned to be mobilized to its first geothermal research drilling project in 5 km deep crystalline rocks.*



InnovaRig wurde im Auftrag des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ in den Jahren 2005 bis 2007 von der Bietergemeinschaft aus den Firmen H. Angers Söhne Bohr- und Brunnenbau GmbH und Herrenknecht-Vertical GmbH entwickelt und gebaut, die zur Realisierung dieses Projekts die GeoForschungsBohrGesellschaft GmbH (GFBG) gründeten. Ziel dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens war, ein Bohranlagenkonzept zu verwirklichen, das den Ansprüchen zukünftigen wissenschaftlichen Bohrens gerecht wird. Die damaligen Projektvorgaben waren: Leichtbauweise mit hoher Mobilität und reduziertem Bohrplatzbedarf, Flexibilität bei der Umstellung von Vollbohr- auf wissenschaftliche Kernbohrverfahren, höchstmöglicher Automatisierungsgrad und dadurch reduzierte Personalbesetzung, geringe Stillstandszeiten sowie niedrigere Bohrkosten und höchster Sicherheitsstandard bei minimalen Emissionswerten zum Schutz der Belegschaft und der Umwelt.

Die Bohranlage mit der internen Werksbezeichnung Boo2 wurde im Rahmen eines feierlichen Akts im Mai 2007 am Betriebsplatz der Herrenknecht AG in Schwanau als zweite ihrer Serie an das GFZ übergeben. Sie galt mit ihrer damaligen Hakenregellast von 350t, später nachgerüstet auf 410t, als die Oberklasse in der Kategorie der mittelschweren Landbohranlagen (Tab. 1).

### Das Konzept

Auf den ersten Blick unterscheidet sich dieser Bohranlagentyp von den bisher gekannten klassischen Tiefbohranlagen durch einen voll hydraulischen Antrieb und, daraus hervorgehend, einem Zweizylinderhebwerk, das in der Lage ist, 2-Stangenzüge bis zu 22 m Länge zu ziehen. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der hydraulische Gestängemanipulator, der die Gestängezüge nicht im Turm abstellt, sondern auf das Gestängelager ablegt und von dort auch wieder aufnimmt. Diese Besonderheiten waren die Basis für eine Reihe von Innovationen an diesem Bautyp wie nachfolgend dargestellt.

Ein durch Containerisierung realisierter Unterbau mit darin verbauten Aggregaten gewährleistet, zusammen mit dem Wegfallen des Gestängeabstellens im Turm, eine deutlich reduzierte Flächenpressung und erfordert dadurch lediglich ein verkleinertes Bohranlagenfundament. Die peripheren Aggregate der Bohranlage können dabei in flexibler Form um den Unterbau arrangiert werden, was die Bohrplatzanforderung weiter reduziert. Dieses auf Standardcontainergröße konzipierte Bohranlagenkonzept

Tab. 1: Spezifikation der InnovaRig-Betriebsparameter nach Herstellerangaben (Binder, 2008)

Tab. 1: Top level operational performance data of InnovaRig according to manufacturer specifications

Teufenkapazität – depth capacity	5500 m
Reguläre Hakenlast – regular hook load	410 t
Kraftdrehkopf UPM, Drehmoment – top drive rpm and torque, max.	220 rpm, 75 000 Nm
Installierte Antriebsenergie, elektrisch – installed electrical power	4000 kW
Masthöhe und Anlagengewicht – mast height and rig weight	52 m, 370 t

vereinfacht deutlich die Transportlogistik und verkürzt so die Mobilisierung und Montage von InnovaRig auf der Bohrstelle.

Der hydraulische Antrieb aller Aggregate im Mast- und Unterbaubereich (darunter fallen die stärksten Verbraucher, wie Hebewerk und Kraftdrehkopf) bietet die höchst mögliche Energieverteilungsflexibilität bei maximaler Energieeffizienz (Abb. 1). Durch dieses Energiekonzept wird die Vorhaltung von lediglich 4 MW an installierter elektrischer Leistung für den maximalen Energieabruf ermöglicht, was einer vergleichbaren Leistung von nur einem halben ICE-3 Zug von rund 100 m Länge entspricht.

InnovaRig kann durch einen Netzparallelbetrieb entweder von außen durch das öffentliche Stromnetz oder durch eigene Dieselgeneratoren mit Energie versorgt werden. Je nach den lokalen Anforderungen, Energiepreisen oder Notbetriebssituationen ist auch eine beliebige Kombination von beiden Energieversorgungsformen möglich. Computergesteuerte Prozesse im Mittelspannungskontrollraum überwachen kontinuierlich den Energieverbrauch und schalten bei Bedarf die Dieselgeneratoren automatisch zu. Auf diese Weise kann der Spitzenbedarf der Anlage sicher abgedeckt werden, ohne das Stromnetz mit Spannungseinbrüchen oder zu hoher Blindleistung zu belasten. Durch die Vernetzung aller Bauelemente über das anlageneigene Datennetzwerk und der zentralen Steuerung durch den Bohranlagen-Kontrollrechner erreicht InnovaRig einen sehr hohen Stand an Prozessautomatisierung, der in dieser Form einzigartig für Landbohranlagen und nur vergleichbar mit fest installierten und überschweren, schwimmenden Meeresbohranlagen ist. Bis zu 5000 verschiedene Sensor-, Maschinen- oder Bohrdaten können vom zentralen Steuerleitsystem im 250 ms-Takt erfasst, prozessiert und archiviert werden. Die gezielt gekapselten oder in Container verbauten Anlagenaggregate sowie die Auswahl des hydraulischen Antriebs und des neuartigen Gestängema-

Links: InnovaRig auf einer geothermalen Bohrlokation in Bayern (Foto: B. Prevedel, GFZ)

Left: InnovaRig on a geo-thermal drilling location in Germany



Kontakt: B. Prevedel  
(bernhard.prevedel@gfz-potsdam.de)



Abb. 1: Hydraulisch angetriebener Topdrive des Typs HV TD 350H am tiefsten Punkt des Masts im Hebwerk hängend. Eine Kombination von starren Hydraulikleitungen und flexiblen Hochdruckschläuchen versorgen die hydraulischen Antriebsmotore (rote Bauteile). Die blauen Bauteile am Bildrand stellen die Hebwerkzylinder dar. (Foto: A. Jurczyk, GFZ)

Fig. 1: Hydraulic top drive of the model HV TD 350H in lowest draw-work position in the mast. A combination of hydraulic hard piping and high pressure hoses supply the energy to the 4 hydraulic drive motors (red components). The blue cylinders at the edge of the picture represent the hydraulic cylinders of the draw works.

nipulators resultieren in einem herausragend schallreduzierten Bohrbetrieb, mit gemessenen Maximalwerten von  $< 55$  dB(A) am Bohrplatzrand, weshalb InnovaRig auch als „Flüsterbohranlage“ bezeichnet wird. Diese reduzierten Emissionswerte werden bis heute von keiner anderen Bohranlage in dieser Kategorie auch nur ansatzweise erreicht. InnovaRig ist somit die erste Bohranlage, die in unmittelbarer Nachbarschaft zu Wohngebieten eine Tiefbohrung ohne Beeinträchtigung von Anwohnern und Umwelt durchführen kann.

## Die Ausstattung

Das GFZ beauftragte zu Projektbeginn ausdrücklich die Entwicklung einer wissenschaftlichen Bohranlage, die den zukünftigen Anforderungen des wissenschaftlichen Bohrens im Helmholtz-Programm „Geosystem: Erde im Wandel“ gerecht werden kann und darüber hinaus von den technischen Leistungsanforderungen in der Lage sein soll, mit klassischen Rotarybohranlagen im Wettbewerb für kommerzielle Bohrprojekte konkurrieren zu können (Wohlgemuth et al., 2007).

Aus diesem Grund wurde InnovaRig so konzipiert, dass sie ohne lange Umrüstzeiten jederzeit vom klassischen Vollbohr-

verfahren auf ein Kernbohren wechseln kann und zurück. Diese Funktionalität wird in erster Line durch den breiten Arbeitsbereich des hydraulisch angetriebenen Kraftdrehkopfs und das Pipehandlingsystem gewährleistet, das jederzeit auf zwei am Gestängelager vorgehaltene Bohrstränge zurückgreifen kann. Für diesen Betriebsfall ist die Anlage auch mit einer speziellen Kernpumpe und einer Kernwinde mit 7000 m Seil ausgerüstet, um die Bohrkerne durch das Kerngestänge mit einer Fahrgeschwindigkeit von bis zu 50 m/min. bergen zu können.

Die Bohranlage kann weiterhin im Unterbau mit einem speziellen Auslaufrichter ausgestattet werden, der zur Installation von Sensoren für die Gasanalytik der Bohrspülung benötigt wird. Hochempfindliche Gasbestimmungen während des Bohrens haben in vergangenen wissenschaftlichen Bohrprojekten mehrfach bewiesen, dass mit dieser Analytik hochwertige wissenschaftliche Daten gewonnen werden können. InnovaRig ist mit Werkzeugen und Bauteilen ausgerüstet, die das zügige Wechseln vom Bohr- zum Messbetrieb mit am Kabel ins Bohrloch eingefahrenen Sonden sicherstellen kann. Schnell durchgeführte Messungen oder Probenahmen während des Bohrfortgangs sind eine wichtige Grundlage für die Erhebung reproduzierbarer wissenschaftlicher Daten und Interpretationen.

Alle Daten an der Bohranlage werden zentral erfasst, archiviert und über Internet oder eine Satellitenkommunikation weitergegeben. Darunter fallen nicht nur die anlagenspezifischen Maschinendaten, sondern auch die Bohrparameter aus dem Bohrbetrieb und alle Meßdaten von installierten Sensoren und Laborgeräte der Wissenschaft. Zur Bohrüberwachung sind für die Bohrmannschaft auch Videokameras im Mast und auf der Arbeitsbühne installiert.

## Der Betrieb

Nach Auslieferung von InnovaRig in Mai 2007 folgte der erste operative Testbetrieb am Herrenknecht Betriebsplatz in Schwannau und ab November des selben Jahres die erste Reifepfung in einer 4,5 km tiefen Geothermiebohrung in den oberjurassischen Karbonaten in Bayern. Diese erste von InnovaRig fertiggestellte Bohrung konnte erfolgreich und plangemäß nach dreieinhalb Monaten Bohrzeit funktionsbereit übergeben werden. Es folgten zwei weitere erfolgreich durchgeführte 5km tiefe Bohrungen in Bayern und Norddeutschland, bis letztlich die Bohranlage nach der Endabnahme im Sommer 2010 dem jetzigen Betreiber übergeben werden konnte. Unter der Betriebsführung von H. Angers Söhne Bohr- und Brunnenbau GmbH wurden in der Folge bis Juni 2013 vier weitere anspruchsvolle und tiefe Geothermiebohrungen in Bayern durchgeführt. Diese Bohrungen waren gekennzeichnet durch hohe Ablenkungen von 55 Grad Neigung bis teilweise in die Horizontale, sowie mehrfache Probleme durch ein Festwerden des Meißels im Bohrloch, Gaszuflüssen und totalen Spülungsverlusten in den Jura-Karbonaten. Diese Herausforderungen hat InnovaRig immer mit Bravour gemeistert.

## Das Ergebnis

Die Schlußfolgerung aus fünfeinhalb Jahren Betrieb der InnovaRig war, neben den nachfolgend vorgestellten operativen Höhepunkten, die grundlegende Erkenntnis, dass die Bohrleistungen dieser Bohranlage in jedem Fall vergleichbar oder auch besser als die von dreizügigen Ölfeldanlagen ist, und dass sich die Reparaturanfälligkeit nach wie erwartet anfänglich hohen Werten bei einem Industriestandard von unter 5 % einpendelte (Abb. 2). Hauptgrund für diese positive Entwicklung war ein vom Hersteller detailliert ausgearbeiteter, IT-unterstützter Wartungs- und Serviceplan sowie die genaue Umsetzung des selben im Feldeinsatz.

Gegenüber herkömmlichen Diesel- oder dieselektrischen Bohranlagen konnte der hydraulische Antrieb dieses Bautyps auch seine Energieeffizienz beweisen. Der durchschnittliche Tagesstromverbrauch der elektrisch betriebenen InnovaRig liegt bei etwa 19,2 MWh, was einen um 30% geringeren Verbrauch im Vergleich zu herkömmlichen dieselektrischen Rotarybohranlagen darstellt. Solche vergleichbaren Anlagen verbrauchen im Dieselpbetrieb durchschnittlich 4000 bis 5000 l pro Bohrtag.

Der Transport der Bohrstangen zum Gestängelager kann wahlweise im manuellen, automatischen oder halbautomatischen Betriebsprogramm erfolgen. Die Ein- und Ausbauzeiten in Semi-Automatikmodus und mit einer über die Jahre gut eingespielten Bohrmannschaft liegen bei 500 m/h und darüber (Abb. 3). Diese Leistung liegt im Spitzenfeld von heute verfügbaren modernen dreizügigen Öl- und Gasbohranlagen und ist um das fünffache schneller als die von vergleichbaren Super-Single-Anlagen.

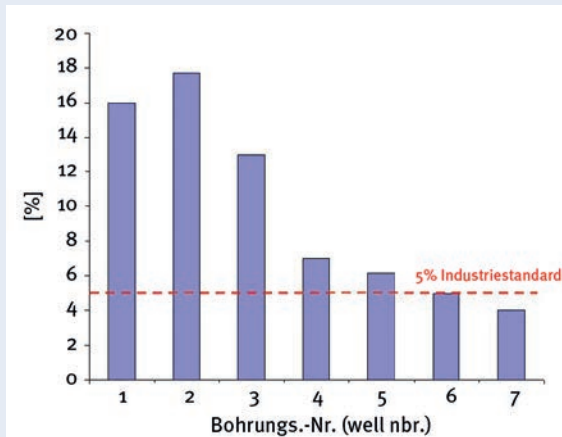


Abb. 2: Entwicklung der Reparaturstatistik des Prototypen Boo2 hin zur seriengereiften InnovaRig über sieben Geothermie-Bohrprojekte, in Prozent von Reparaturstunden pro gesamter Anlageneinsatzstunden

Fig. 2: The evolution from the prototype Boo2 to a mature rig over an operation time of 5 ½ years and 7 geothermal wells by the example of repair time as a percentage of total rig time

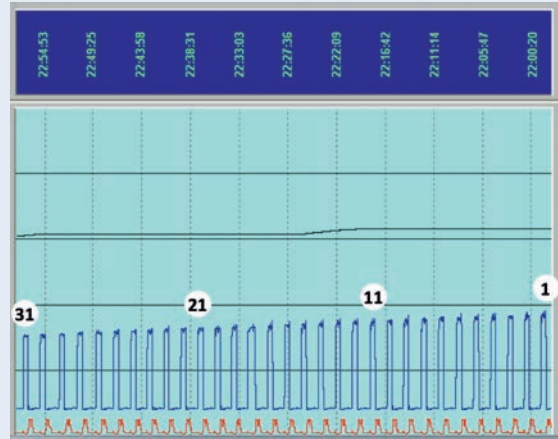


Abb. 3: Hakenlasten während einer Gestängeausbauphase bei rund 2500 m im verrohrten Bohrloch. Im dargestellten 1-Stundenfenster konnten im semi-automatischen Programmodus 31 Züge á 18 m konstant ausgebaut werden, was einer Ausbaugeschwindigkeit von 550 m/h entspricht.

Fig. 3: Hook-load over time pulling drill pipe in cased hole in semi-automatic pipe handling mode at approx. 2500 m depth. The 1 hour window confirms 31 stands of doubles (18 m) tripped out from the hole, equivalent to a tripping speed of 550 m/h.

Das flexible Energiemanagementsystem von InnovaRig ist letztlich die Grundlage für die effizienten Reparaturen von Bohrlochavarien und die Durchführung von außerplanmäßigen Arbeiten im Bohrloch. Darunter fielen bis heute eine 1 km lange Casing-Drilling Sektion mit 13 3/8"-Futterrohren, Fräsarbeiten von im Bohrloch verbliebenen Bohrgestänge und Futterrohren, sowie das unterbalanzierte Bohren mit Stickstoff-aufgeladenen Bohrspülungen zur Gewährleistung des Bohrkleinaustrags aus horizontalen Bohrlochsektionen. Auch für diese Sonderarbeiten ist InnovaRig bestens aufgestellt.

## Danksagung

Die Entwicklung der wissenschaftlichen Tiefbohranlage wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, stellvertretend für das damals zuständige BMBF, gefördert. Das GFZ finanzierte InnovaRig mit Mitteln der Helmholtz-Gemeinschaft für Großinvestitionsmaßnahmen. Unser Dank gilt auch dem Hersteller Herrenknecht-Vertical GmbH für den Einsatz bei der schnellen Behebung von anfänglich technischen und operativen Problemen, sowie dem Betreiber H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbau GmbH für die zuverlässige Wartung und Instandhaltung, sowie den bis heute unfallfreien und sicheren Betrieb von InnovaRig.

## Literatur

- Binder, J., Ruder, M. (2008): Bohrtechnik - Entwicklung einer neuen Bohranlagentechnik für tiefe Geothermie. - Erdöl Erdgas Kohle, 124, 11, 482 – 484.  
 Wohlgemuth, L., Harms, U., Binder, J. (2007): InnovaRig – The New Scientific Land Drilling Facility. - Scientific Drilling, 5, 67-69. DOI: <http://doi.org/10.2204/ioldp.sd.5.12.2007>

# Netzwerk

## Bohren ganz praktisch

### Trainingskurse für den wissenschaftlichen Nachwuchs

Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler haben häufig in ihrem beruflichen Alltag in der Forschung und vor allem auch in der Industrie mit Bohrungen, Bohrtechnik, Bohrlochmessungen, Monitoring in Bohrlöchern oder Proben aus Bohrungen zu tun. In der universitären Ausbildung wird der technisch-wissenschaftliche Hintergrund hierzu nur selten vermittelt. Obwohl Bohrtechnik an einigen Hochschulen gelehrt wird, haben Studierende der Naturwissenschaften und des Bohringenieurwesens meist vollständig getrennte Ausbildungsgänge. Das langjährige Engagement der deutschen Forschung in wissenschaftlichen Bohrprojekten liefert aber umfangreiches Know-how, um diesen Mangel zu beheben. Deutsche Forschungseinrichtungen sind sowohl am International Ocean Discovery Program (IODP) als auch am Internationalen Kontinentalen Wissenschaftlichen Bohrprogramm (ICDP) maßgeblich beteiligt. Insbesondere das Deutsche GeoForschungszentrum GFZ ist durch die organisatorische Federführung des ICDP und seiner Operational Support Group (OSG) bestens aufgestellt, das gewonnene Know-how zum Thema Forschungsbohrungen weiterzuvermitteln. Die OSG ist eine für das ICDP agierende Gruppe von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und Ingenieuren des GFZ, die technische und wissenschaftliche Unterstützung für Forschungsbohrungen auf Feldern wie Bohrtechnik, Bohrlochmessung, Datenmanagement und Geräte aus einem speziellen ICDP-Gerätepool anbietet. Daneben ist „Education & Outreach“ ein zentrales Aufgabenfeld.

### Internationale Trainingskurse des ICDP

Die OSG führt jährlich ein internationales, einwöchiges Training zu zentralen Aufgabenfeldern bei Forschungsbohrungen durch. Dazu werden etwa 30 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den 24



ICDP-Trainingskurs im Seesedimentlabor der Universität von Minnesota, USA

(Foto: T. Wiersberg, GFZ)

ICDP-Mitgliedsländern eingeladen. Der Kurs wird – soweit möglich – an einer laufenden Bohrung abgehalten, um die Kursinhalte möglichst praxisnah zu gestalten. Im Rahmen eines Schwerpunktthemas wie Seesedimentbohrungen (ICDP-Kurs 2012 in Minneapolis, USA) oder Bohrungen in Störungszonen (ICDP-Kurs 2014 in Franz Josef, Neuseeland) leiten OSG-Mitglieder und internationale Expertinnen und Experten Seminare und Übungseinheiten zu zentralen wissenschaftlichen Aufgabenfeldern an einer Bohrung.

Die OSG organisiert neben diesen allgemeinen Kursen auch mehrmals im Jahr, je nach Bedarf, spezielle Trainingseinheiten, um Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf spezielle Aufgaben an einer Bohrung vorzubereiten. Das am GFZ entwickelte Drilling Information System (DIS) zum Daten- und Probenmanagement wird bei den meisten ICDP-Bohrungen eingesetzt. Um dieses DIS an eine neue Bohrung anzupassen und die am Einsatzort zuständigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vorzubereiten, wird eine Trainingswoche zumeist am GFZ in Potsdam abgehalten. Außerdem gibt es Kurse zu den mobilen Messgeräten des ICDP, wie der Online-Gasanalyse sowie optischen und petrophysikalischen Bohrkernscannern.

### Fortbildungsmaßnahmen des Deutschen Forschungsbohrkonsortiums GESEP

Zahlreiche deutsche geowissenschaftliche Institute an Universitäten und andere Forschungseinrichtungen befassen sich mit wissenschaftlichen Bohrungen und sind in den internationalen Programmen aktiv. Um auch auf nationaler Ebene ein Netzwerk und eine Interessensvertretung aufzubauen und die starke Infrastruktur gemeinsam zu nutzen, wurde im Jahr 2008 das Deutsche Forschungsbohrkonsortium GESEP e.V. (German Scientific Earth Probing Consortium) gegründet. Eine wichtige Aufgabe des am GFZ koordinierten GESEP sind Fortbildungsmaßnahmen. Mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG wird jährlich die zweitägige GESEP School durchgeführt. Am Rand des IODP/ICDP-Jahreskolloquiums wird dazu an wechselnden Standorten ein Kurs abgehalten, bei dem insbesondere Teilnehmerinnen und Teilnehmer jüngerer Bohrexpeditionen Erfahrungen zu speziellen Themen in praxisnahen Übungen weitergeben. Der GESEP-Kurs 2014 stand unter dem Thema „Initial drill core processing, analysis and archiving“ und wurde in Erlangen vom 19. bis 20. März 2014 durchgeführt. Neben etwa 35 Teilnehmerinnen und Teilnehmern aus Deutschland waren auch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaft-

ler aus vier Nachbarländern beteiligt. Angesichts dieses internationalen Interesses besitzt GESEP das Potential, sich zu einer europäischen Initiative weiterzuentwickeln.

### Geo.X-Trainingskurs zu Scientific Drilling

Auch für die Region Berlin-Brandenburg wurde inzwischen für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein Kurs zu „Scientific Drilling“ im Rahmen der Koordinierungsplattform Geo.X aufgelegt und 2013 erstmalig durchgeführt. Interessenten aus den an Geo.X beteiligten Einrichtungen können sich für diesen zweitägigen Kurs bewerben.

### Netzwerke für Fortbildung

Die Netzwerke, in denen das GFZ aktiv ist, wirken auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene und werden speziell im Bereich der wissenschaftlichen Bohrungen konsequent auch zur Wissensvermittlung weiter ausgebaut. Die mit Unterstützung des GFZ entwickelten Kurse und Trainingsmaßnahmen werden, um einen möglichst breiten Teilnehmerkreis anzusprechen, in englischer Sprache abgehalten und erfreuen sich auch dadurch internationaler Nachfrage. Das GFZ kann auf diese Weise einen langfristigen Know-how-Transfer im Bereich des wissenschaftlichen Bohrens an Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler realisieren. ■

#### Weitere Informationen zu den Trainingskursen im Bereich „Wissenschaftliches Bohren“ am GFZ:

Dr. Thomas Wiersberg  
E-Mail: [wiers@gfz-potsdam.de](mailto:wiers@gfz-potsdam.de)

Carola Knebel  
E-Mail: [knebel@gfz-potsdam.de](mailto:knebel@gfz-potsdam.de)

## Asymmetrische Kontinentränder und die lange Geburt eines Ozeans

Als sich vor 150 bis 120 Mio. Jahren Südamerika von Afrika abspaltete, entstand der Atlantische Ozean und trennte das heutige Angola von Brasilien. Überraschenderweise sind die dabei gebildeten Kontinentalränder sehr unterschiedlich. Während sich vor der angolanischen Küste 200 km breite, stark ausgedünnte Schichten der kontinentalen Kruste befinden, zeigt die dazu gehörige brasilianische Seite einen abrupten Übergang von kontinentaler zu ozeanischer Kruste. Woher die asymmetrischen Kontinentränder und die stark ausgedünnten Krusten kommen, war bisher unbekannt. Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler des GFZ, der Universität Sydney und der Universität von London legen in der Ausgabe von „Nature Communications“ vom 6. Juni 2014 ein Erklärungsmuster vor. Sie rekonstruierten mithilfe von hochaufgelösten Computermodellen und geologischen Daten der Südatlantischen Kontinentalränder die Vorgänge in diesen, auch „Rifts“ genannten, kontinentalen Bruchzonen.

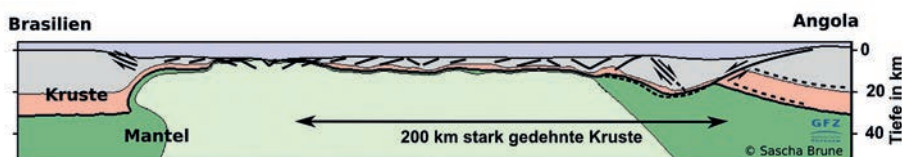
Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler stellten fest, dass das Riftzentrum während des Auseinanderbrechens eines Kontinents nicht statisch bleibt und sich Riftsysteme über mehrere hundert Kilometer bewegen können. Bei diesem Prozess wird die Erdkruste an einer der beiden Riftflanken durch heißes, aufströmendes Gestein geschwächt, das aus dem darunter liegenden Erdmantel aufströmt. Daher bilden sich neue Risse im Rift – die Grabenbrüche – immer nur auf dieser Riftseite. Die Risse an der anderen Riftflanke werden inaktiv, weil sie nicht durch das heiße Mantelgestein beeinflusst werden. Die neuen Grabenbrüche lassen an der geschwächten

Riftseite ein neues Riftzentrum entstehen, während das alte Zentrum seine Aktivität wegen fehlendem Wärmenachschubs einstellt. Das führt im Resultat zu einer seitlichen Bewegung des Rifts. Diese Riftwanderung ist gleichbedeutend damit, dass Material aus der südamerikanischen Platte herausgelöst und an die afrikanische Platte angelagert wird. Die so transferierten Krustenblöcke werden im Einflussbereich des Rifts stark gedehnt und bleiben letztlich als die bisher unerklärten dünnen Krustenschichten hinter dem Rift zurück.

Eine solche Verlagerung des Rifts braucht ihre Zeit: Zwischen dem heutigen Angola und Brasilien wanderten die Grabenbrüche seinerzeit mehr als 200 km in Richtung Westen. Das wiederum verzögerte das kontinentale Auseinanderbrechen und die damit einhergehende Bildung ozeanischer Kruste um bis zu 20 Mio. Jahre. Die Modelle der Wissenschaftlergruppe und Analysen der südatlantischen Kontinentalränder zeigen übereinstimmend, dass die Dehngeschwindigkeit dabei eine dominierende Rolle spielt: Je schneller die Kruste gedehnt wird, desto länger wandert der Grabenbruch und um so ausgeprägter wird die Asymmetrie der neuen Kontinentränder.

Damit stellt sich für die Theorie der Plattentektonik eine neue Frage: während des Auseinanderbrechens werden offenbar gewaltige Mengen an Gesteinsmaterial von der einen auf die andere Seite der Platten-grenze verlagert, ein Vorgang, der bisher nur unzureichend berücksichtigt wurde.

Gabenbrüche sind ein wichtiges tektonisches Element unserer Erde. Sie sind für die heutige Form der Kontinente verantwortlich



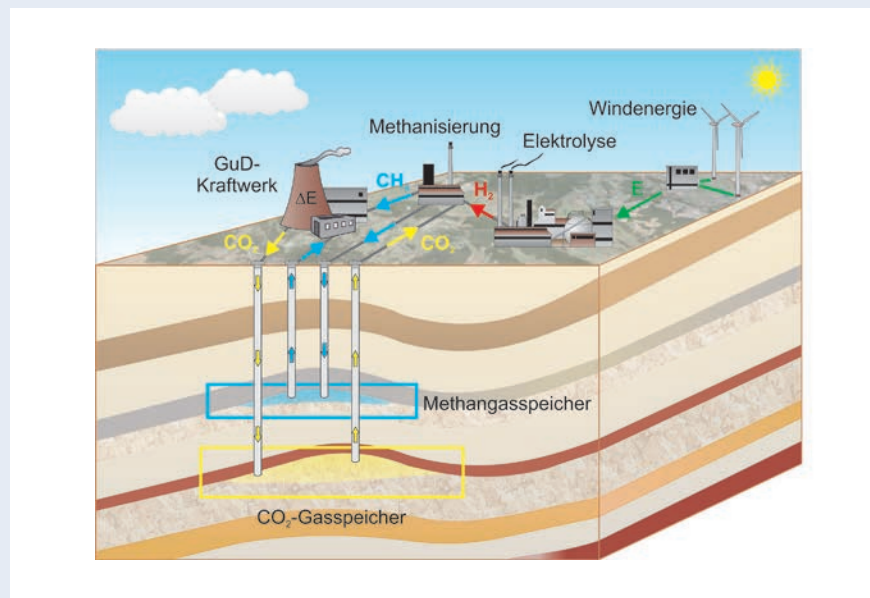
Asymmetrie der südatlantischen Kontinentalränder. Das Bild zeigt einen modellierten Querschnitt durch den Südatlantik, kurz nach dem Auseinanderbrechen Afrikas und Südamerikas vor 120 Millionen Jahren. (Abb.: S. Brune, GFZ)

und wirken auch noch heute aktiv. Ein markantes Beispiel ist das derzeitige Auseinanderbrechen Ostafrikas. Untersuchungen des Ost-Afrikanischen Grabensystems geben uns Kenntnisse über die ersten Phasen des kontinentalen Auseinanderbrechens. Mit Beobachtungsdaten und Modellierun-

gen von Krustenstrukturen an Kontinentalrändern entsteht ein umfassendes Bild der Prozesse, die in Riftsystemen wirksam sind. Die im Juni veröffentlichte Studie liefert entscheidende, neue Einblicke in die komplexen Vorgänge von Grabenbrüchen und dem Auseinanderbrechen von Kontinenten. ■

Brune, S., Heine, C., Pérez-Gussinyé, M., Sobolev, S. (2014): „Rift migration explains continental margin asymmetry and crustal hyper-extension“, *Nature Communications*, 5:4014. DOI: 10.1038/ncomms5014, 06.06.2014

## Neues Patent zur Energiespeicherung im geologischen Untergrund



Die Bundesregierung gibt in ihrer Energiestrategie vor, dass die regenerativen Energien massiv ausgebaut werden, so dass sie eine tragende Säule der zukünftigen Energieversorgung darstellen, um den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) zu reduzieren. Aufgrund von Netzengpässen kommt es aber immer wieder und vermehrt zur Abschaltung von Windenergieanlagen. Um dem entgegen zu wirken, bietet die stoffliche Energiespeicherung eine Option.

Eine in diesem Rahmen am GFZ vom „Zentrum für Geologische Speicherung“ gemeinsam mit der Sektion „Hydrogeologie“ erarbeitete Innovationsidee basiert auf einer Erweiterung der bekannten „Power-to-Gas-to-Power“-Technologie (PGP), der Erzeugung von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) aus regenerativen Energien und daraus pro-

duziertem Methan (CH<sub>4</sub>). Neu ist dabei der Einsatz von im Kreislauf geführtem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>). Beide Gase, CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>, werden in zwei nebeneinander lokalisierten Untergrundspeichern vorgehalten. Bei Energieüberschuss wird über Elektrolyse H<sub>2</sub> produziert und CO<sub>2</sub> aus dem einen Speicher damit methanisiert. Das Methan wird dann in den zweiten Speicher eingebracht. Bei Energiebedarf wird dieses CH<sub>4</sub> vor Ort in einem Gas- und Dampfturbinenkraftwerk verstromt, CO<sub>2</sub> abgetrennt und emissionsneutral wieder in den Untergrundspeicher verbracht (siehe Abb. oben). Unter Berücksichtigung aller Einzelschritte berechnet sich ein Gesamtwirkungsgrad von 27,7% und Stromgestehungs- und Speicherkosten von insgesamt 20,43 Eurocent/kWh. Obwohl der Wirkungsgrad geringer als

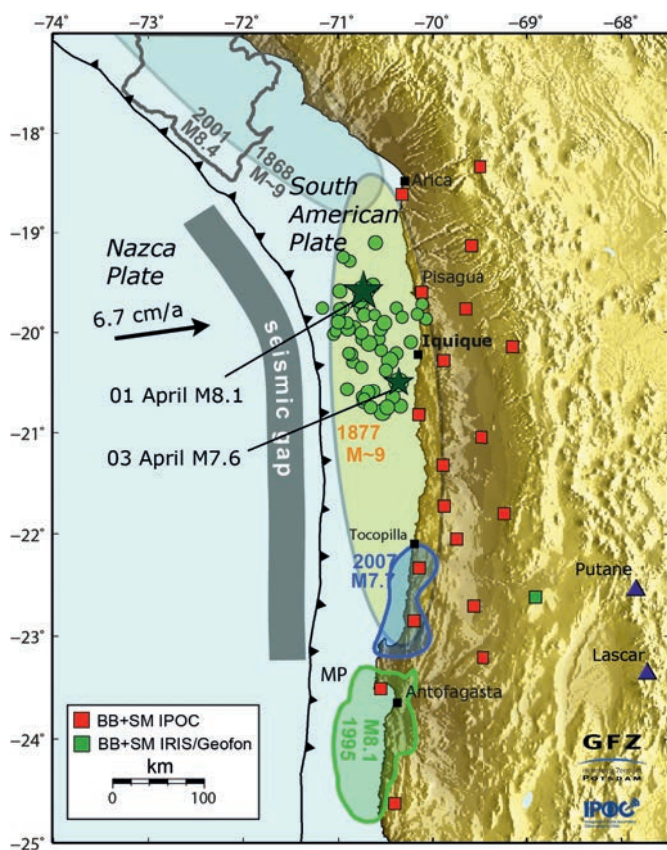
jener von Pump- und Druckluftspeichern ist, sind die resultierenden spezifischen Kosten auf gleichem Niveau und damit konkurrenzfähig.

Der große Vorteil des hier vorgeschlagenen Konzepts im Gegensatz zu bisherigen PGP-Ansätzen ist, dass es emissions- und damit klimaneutral ist. Teil des Konzepts ist ein CO<sub>2</sub>-Speicher in der Größenordnung von 100 000 t CO<sub>2</sub>, der wie in Ketzin/Havel gezeigt (Injektion von 2008 bis 2013 unter Projektleitung des GFZ, vgl. Artikel von *Liebscher et al.* in diesem Heft, sowie *Kühn et al.* „System Erde. GFZ-Journal“ (2011) Heft 2, S. 44-51), technisch, aber auch bezüglich der Akzeptanz in der Bevölkerung realisierbar ist. Für die Technologie spricht weiterhin, dass sie umgehend umgesetzt werden könnte, weil sie zum wesentlichen Teil auf vorhandener Infrastruktur beruht. Würden die etwa 20 Standorte in Deutschland mit Erdgasporenspeichern (hauptsächlich CH<sub>4</sub>) um CO<sub>2</sub>-Speicher in der Größenordnung des GFZ-Pilotspeichers in Ketzin/Havel erweitert, könnten 15% des in Deutschland aus regenerativen Quellen produzierten Stroms in Form von Methan gespeichert und klimaneutral genutzt werden.

Für dieses neu entwickelte Konzept wurde dem GFZ ein Patent erteilt (Patent-Nr. DE 10 2012 103 458). Es baut auf erprobten technologischen Komponenten auf und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen belegen, dass diese Idee unter den gegebenen Rahmenbedingungen ein erhebliches Innovationspotenzial besitzt. ■



## Seismische Lücke in Chile



*Erdbebenereignisse im April 2014: Seismische Lücke bei Iquique, Nordchile (Abb.: GFZ); alle Zeiten in UTC; grüne Sterne: Hauptbeben und stärkstes Nachbeben; grüne Punkte: Nachbeben der ersten beiden Tage nach dem Hauptereignis; BB: Breitband-Seismometer; SM: Strong Motion-Accelerometer; Quadrate: permanente seismische Stationen*

lich davon blieben aber intakt. Diese sind jeweils in der Lage, große Beben mit Erschütterungs- und Tsunamigefahr zu erzeugen. Das bedeutet, dass die Gefahr eines oder gar mehrerer Beben mit Magnituden deutlich über 8 nach wie vor besteht. Auch die Lage und Stärke der Nachbeben deutet auf eine solche Situation hin. Seit dem Hauptstoß wurden hunderte Nachbeben registriert, das größte am 3. April (UCT) mit Magnitude 7,6. Dieses Beben ereignete sich rund 100 km südlich vom Hauptbeben und bildet mit seinen Nachbeben einen zweiten Erdbebenherd.

Für solche Extremereignisse hat das GFZ eine Einsatzgruppe namens HART (Hazard and Risk Team), die zu weiteren Untersuchungen in das betroffene Gebiet nach Chile reiste. Ziel eines solchen Einsatzes ist, anhand der Nachbeben weitere detaillierte Erkenntnisse des Bruchvorgangs zu gewinnen und die Bruchfläche über die Verteilung der Nachbeben genauer zu bestimmen. Bereits eine Woche nach dem schweren Erdbeben brachte HART 25 portable Seismometer nach Chile, um das bestehende, auf Initiative des GFZ aufgebaute Observatoriumsnetz IPOC (Integrated Plate Boundary Observatory Chile) zu verdichten und so die Genauigkeit der Herdbestimmung zu erhöhen. Weiterhin werden 50 GPS-Messpunkte hochpräzise vermessen und zusätzlich zwei neue GPS-Stationen installiert, um die Deformation der Erdkruste durch das Erdbeben zu erfassen.

Das seit 2010 direkt in der seismischen Lücken Nordchiles aufgebaute IPOC ist ein europäisch-amerikanisches Netz von Einrichtungen sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Außeruniversitäre deutsche, französische, chilenische und amerikanischen Forschungseinrichtungen betreiben zusammen mit mehreren chilenischen und deutschen Universitäten ein dezentrales Instrumentensystem an Chiles konvergentem Plattenrand, um Erdbeben, Deformationen, Magmatismus und Oberflächenprozesse

Nach den starken Erdbeben in Chile vom 1. und 3. April 2014 (UCT) haben zahlreiche Nachbeben mit teilweise beträchtlicher Stärke die Region um Iquique heimgesucht. Seismologinnen und Seismologen des GFZ warnen vor der Annahme, dass mit dem Starkbeben die dortige seismische Lücke geschlossen wurde und das Erdbebenrisiko vor Ort sich verringert habe. Im Gegenteil zeigen erste Untersuchungen des Bruchprozesses und der Nachbeben, dass lediglich etwa ein Drittel der gefährdeten Zone durchbrochen ist.

Die seismische Lücke von Iquique wird so genannt, weil dort ein starkes Beben erwartet wird. Südamerikas Westküste wird durch den Zusammenstoß der pazifischen Nazca-Platte mit der Südamerikanischen Platte geprägt. In einem untermeerischen Graben entlang der Küste taucht der Pazifikboden unter den Konti-

nent und baut dabei Spannung auf, die sich durch Erdbeben entlädt. Im Verlauf von rund 150 Jahren bricht dabei der gesamte Plattenrand vom Süden in Patagonien bis nach Panama im Norden mit großen Erdbeben einmal komplett durch. Dieser Zyklus ist auch bereits durchlaufen – mit der Ausnahme eines letzten Segments westlich von Iquique in Nordchile. Das starke Erdbeben vom 1. April (UCT) fand, wie erwartet, genau in dieser seismischen Lücke statt.

Erste Analysen der GFZ-Seismologinnen und Seismologen zeigten nun, dass sich nur das mittlere Stück dieser Spannungszone entladen hat. Die Erdbebenserie begann bereits am 17. März (UCT) mit einem Beben der Magnitude 6,2. Durch das Hauptbeben der Stärke  $M=8,1$  brach zwar das Mittelstück der seismischen Lücke mit einer Länge von rund 100 km, zwei große Segmente nördlich und süd-

zu erfassen. Erste Untersuchungen vor Ort zeigen, dass die gesamte Instrumentierung das Hauptbeben und die Nachbeben unversehrt überstanden hat. So ist nun ein weltweit einzigartiger Datensatz verfügbar, mit dem der gesamte Bebenvorgang – von der Phase des Spannungsaufbaus über den eigentlichen Bruch bis in die postseismische Phase – nachvollzogen werden kann. Daraus leitet sich Wissen über das Erdbebenrisiko nicht nur in diesem Teil der Welt ab. ■

#### Mehr zu IPOC:

<http://www.ipoc-network.org/>

### Biologische Prozesse formen Landschaft – neues DFG-Schwerpunktprogramm



*Boden in einem tropischen Hochland. Wurzeln wachsen durch den Boden hindurch bis zum Gestein herunter, um dort Nährstoffe aufzunehmen. Dabei bilden sie neuen Boden. (Foto: F. von Blanckenburg, GFZ)*

Mikroorganismen bilden Boden, Pflanzen schützen ihn vor Erosion und Tiere durchmischen ihn. Formen biologische Prozesse also unsere Landschaft oder sind doch Tektonik und Klima die entscheidenden Kräfte? Hier setzt das neue Forschungsprojekt „EarthShape: Earth Surface Shaping by Biota“ (Formung der Erdoberfläche durch Biota) an, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG als Schwerpunktprogramm (SPP 1803) mit 5,1 Mio. Euro über zunächst drei Jahre gefördert wird.

Prof. Friedhelm von Blanckenburg vom GFZ und Prof. Todd Ehlers vom Fachbereich Geowissenschaften der Universität Tübingen koordinieren dieses neue nationale Schwerpunktprogramm. Biologische Abläufe sind wichtige Spieler

in den oberflächennahen Prozessen des Systems Erde. Der Einfluss des Klimas wie des Niederschlags auf die Formung der Erdoberfläche hängt z. B. direkt von der Vegetationsbedeckung ab. Von der Erdoberfläche bis hinunter zum Grundgestein spielen biologische Prozesse möglicherweise eine gleich wichtige Rolle wie chemische und physikalische Vorgänge. Ihre Erforschung ist besonders relevant mit Blick auf die Veränderung der Erdoberfläche durch den Klimawandel.

Neue wissenschaftliche Techniken ermöglichen jetzt erstmals die präzise Erfassung und Vermessung dieser Effekte. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Deutschland untersuchen dazu ein Gebiet im Küstengebirge von Chile. Hier treffen größte klimatische und biologische Unterschiede auf engem Raum aufeinander. Das GFZ betreibt in Chile bereits seit vielen Jahren ein Observatorium zur Beobachtung tektonischer Prozesse an der Plattengrenze zwischen Pazifik und Südamerika (IPOC, siehe vorheriger Beitrag). Die Region stellt ein natürliches Laboratorium dar, in dem beobachtet werden kann, wie sich Biologie und Topographie gegenseitig beeinflussen. Das Projekt sieht zudem eine intensive Zusammenarbeit mit führenden chilenischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus mehreren Disziplinen vor. ■

#### Kontakt:

Prof. Dr. Friedhelm von Blanckenburg  
E-Mail: [fvb@gfz-potsdam.de](mailto:fvb@gfz-potsdam.de)

### Wasserkreislauf verstärkt plötzlichen Klimawandel

Die Rolle des Wasserkreislaufs bei plötzlichen Temperaturänderungen ist eine entscheidende Größe im Ablauf schneller Klimaschwankungen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universität Potsdam und des GFZ konnten zeigen, dass Änderungen des Wasserkreislaufs während der raschen Abkühlung zu Beginn der sogenannten Jünge-



*Entnahme eines Sedimentkerns auf der Bohrplattform am Meerfelder Maar (Foto: A. Brauer, GFZ)*

ren Dryas-Kaltphase vor 12 680 Jahren ein entscheidender Treiber des schnellen Klimawandels in Westeuropa waren. Die Potsdamer Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler konnten durch die Analyse von molekularen organischen Überresten in Ablagerungen im Meerfelder Maarsee, Eifel, mit bisher nicht erreichter Genauigkeit Niederschlagsveränderungen rekonstruieren und somit erstmals Aussagen über Variationen des Wasserkreislaufs während dieser Klimaschwankung treffen. So konnten die Forscherinnen und Forscher zeigen, dass trockene Luftmassen aus der Polregion die lokalen Ökosysteme in Westeuropa aus dem Gleichgewicht brachten und zu den beobachteten tiefgreifenden Umweltveränderungen führten.

Die genauen zeitlichen Abläufe plötzlicher Klimaschwankungen, die innerhalb weniger Jahre vor sich gehen können, sind bis heute eine große Unbekannte in der Klimaforschung. Die vorgestellten Ergebnisse wurden dadurch ermöglicht, dass ein neuartiges Untersuchungsverfahren für molekulare Fossilien an zeitlich präzise datierten jahresgeschichteten Seeablagerungen angewandt wurde. Bei diesem Verfahren werden molekulare Überreste von Pflanzen aus den Seeablagerungen extrahiert und chemisch analysiert. Aus dem Verhältnis von schweren Deuterium- und leichten Wasserstoffisotopen dieser Moleküle lassen sich Niederschlagsveränderungen genau nachvollziehen.

Die Jüngere Dryas war die letzte, etwa 1100 Jahre dauernde Kälteperiode am Ende der Eiszeit, an deren Beginn es in

Mitteleuropa zu einer plötzlichen Veränderungen der Windsysteme und damit verbunden zu massiven Umweltveränderungen innerhalb weniger Jahre kam, wie Forscherinnen und Forscher des GFZ in einer früheren Studie gezeigt haben. Mit der neuen Studie konnte erstmals nachgewiesen werden, dass diese Verlagerung der Windsysteme zu einer starken Trockenheit geführt hat, welche letztlich für das Absterben großer Waldgebiete verantwortlich war. Zudem wurde die Hypothese bestätigt, dass sich die plötzliche Veränderung der Windsysteme in der Eifel erst 170 Jahre später ereignet hat als eine ebenfalls sehr plötzliche Abkühlung der Polarregion, wie sie in Grönländischen Eiskernen nachgewiesen wurde. Diese Verzögerung erklären die Forscherinnen und Forscher damit, dass sich aufgrund der Abkühlung das Packeis im Nordatlantik langsam nach Süden ausdehnte. Dies wiederum führte auch zu einer Südverschiebung der Trennfläche zwischen polarer Luft und der Luft gemäßigter Breiten, der Po-

larfront. Infolgedessen wurde die sehr trockene polare Luft nach Westeuropa gelenkt. Damit ist ein weiterer Nachweis dafür gelungen, dass plötzliche Klima- und Umweltveränderungen nicht immer global zeitgleich verlaufen, sondern mit deutlich spürbaren regionalen Unterschieden und zeitlichen Verzögerungen.

Die Ergebnisse dieser Studie, die von der DFG im Rahmen des Emmy-Noether Programms und vom Helmholtz-Verbund Regionale Klimaänderungen REKLIM gefördert wurde, zeigen nicht nur eindeutig, dass sich Temperaturschwankungen regional ganz unterschiedlich auswirken können, sondern auch, dass Veränderungen im Wasserkreislauf ein verstärkender und für lokale Ökosysteme entscheidender Faktor während abrupter Temperaturschwankungen sind. Dies bedeutet weiterhin, dass bei regionalen Auswirkungen zukünftiger Klimaveränderungen Variationen des Wasserkreislaufs in Verbindung mit Veränderungen von Windsystemen nicht

nur in den Monsunregionen der Erde, sondern auch in Mitteleuropa eine entscheidende Rolle spielen können. Die Ergebnisse dieser Studie tragen damit zur Entwicklung hoch aufgelöster regionaler Klimamodelle bei, mit denen die Auswirkungen des Klimawandels besser abgeschätzt werden können. ■

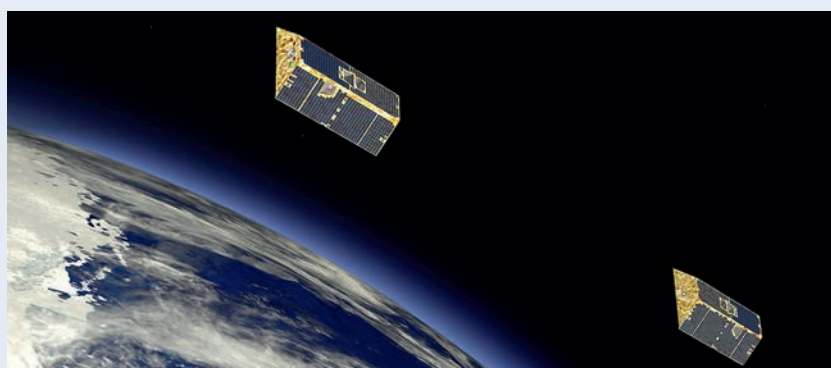
#### Kontakt im GFZ:

Prof. Dr. Achim Brauer  
E-Mail: brau@gfz-potsdam.de

#### Aktuelle Literatur zum Thema:

Lane, C. S., Brauer, A., Blockley, S. P. E., Dulski, P. (2013): Volcanic ash reveals a time-transgressive abrupt climate change during the Younger Dryas. - *Geology*, 41, 12, 1251-1254.  
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, 109-112.

## GRACE Follow-On – Vertrag mit NASA geschlossen



Gravity Recovery and Climate Experiment Follow On (Abb.: Astrium)

Am 11. Februar 2014 hat der Vorstand des GFZ das Memorandum of Understanding mit NASA-Administrator Charles Bolden Jr. zur gemeinsamen Realisierung der Nachfolgemission von GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) unterzeichnet. Dieser Vertrag besiegelt die gemeinsame langjährige Planung und Realisierung

dieser einzigartigen Tandem-Satellitenmission, die nach dem erfolgten „Preliminary Design Review“ im Januar nun in die Bauphase geht und im August 2017 starten soll. Die deutschen Beiträge für GRACE-FO werden federführend vom GFZ realisiert. Mit GRACE werden seit dem Jahr 2002 klimarelevante Parameter, wie das Abschmelzen von Gletsche-

reis oder die kontinentale Wasser-Massenbilanz erfasst. GRACE hat seine ursprüngliche geplante Missionsdauer von rund fünf Jahren mehr als verdoppelt. Die Lebenszeit von GRACE neigt sich aber wegen Alterung der beiden Satelliten nach nunmehr fast zwölf Jahren dem Ende entgegen. Mit GRACE-FO werden die langen Messreihen der Klima- und Schwerfeldaten von GRACE fortgesetzt. Diese Daten sind eine wesentliche Voraussetzung, um das Abschmelzen der polaren Eisschilde, den genauen Verlauf der das globale Klima bestimmenden Meeresströmungen, den globalen Wasserkreislauf sowie vom Menschen verursachte Grundwasserentnahmen exakter abschätzen zu können. Der im jetzt unterzeichneten Memorandum of Understanding zugesagte deutsche Beitrag zu GRACE-FO sieht neben den wissenschaftlichen Arbeiten auch die Bereitstellung einer Starttrakte für die

beiden Satelliten vor. Dazu hat das GFZ gemeinsam mit seinem Projektpartner SpaceTech GmbH (STI) in den Jahren 2012 und 2013 eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Als Ergebnis wurde die DNEPR-Rakete gewählt, eine russische Rakete vom Typ SS18, die für den Transport wissenschaftlicher Nutzlasten umgebaut wurde. Die Trägerrakete wiegt 211t und hat eine Länge von 34 m. Beide Satelliten sollen gemeinsam im August 2017 von Baikonur in Kasachstan aus in ihren polaren Orbit mit einer Flughöhe von 490 km gebracht werden und danach in einem Abstand von rund 220 km voneinander auf der gleichen Bahn fliegen. Der entsprechende Vertrag mit der International Space Company Kosmotras (ISCK) wurde kürzlich von GFZ und ISCK unterzeichnet. Das Management der Startrakete und der

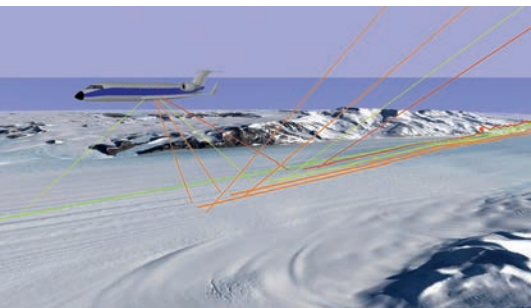
Startdienstleistung wird im Auftrag des GFZ durch STI durchgeführt.

Deutschland steuert nicht nur die Startrakete bei, sondern auch die optischen Elemente eines „Laser Ranging Interferometers“ (LRI). Der eigentliche Messwert für die Änderungen im Schwerfeld ist nämlich der sich durch diese Variationen ändernde Abstand der beiden Zwillingssatelliten zueinander. Bisher wurde der Abstand zwischen den beiden Satelliten mit Mikrowellentechnik bei einer Genauigkeit von etwa zwei Tausendstel Millimeter gemessen. Mit der LRI-Neuentwicklung für GRACE-FO sollen die Messungen noch einmal bis zu 20-mal genauer werden. Das Design des LRI wurde vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) entwickelt, STI

baut die Flug-Hardware mit Beistellungen durch das DLR.

Für die Auswertung und Bereitstellung der wissenschaftlichen Daten ist neben dem Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA und der Universität in Texas wieder das GFZ verantwortlich. Die Finanzierung der deutschen Beiträge erfolgt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und die Helmholtz-Gemeinschaft. Vom GFZ werden die Laser-Retroreflektoren für beide Satelliten zur Verfügung gestellt; zudem finanziert und verantwortet das GFZ den Missionsbetrieb für insgesamt fünf Jahre. Dieser wird, wie bei GRACE, vom German Space Operation Center (GSOC) des DLR in Oberpfaffenhofen durchgeführt. ■

## Die Topographie des Mittelmeeres – GPS-Reflektionsmessungen mit HALO



Schema der GPS-Reflektometrie auf HALO  
(Abb.: J. Wickert, GFZ)

Messungen von GPS-Signalen, die an der Oberfläche des Meeres reflektiert werden, ermöglichen die zentimetergenaue Erfassung von Meereshöhenunterschieden. Mit GPS-Empfängern an Bord des deutschen Forschungsflugzeuges HALO (High Altitude Long Range) nahmen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ zusammen mit Kolleginnen und Kollegen der Universität Hannover und der Technischen Universität Dresden diese Daten auf und zeigten erstmals, dass GPS-Reflektionsmessungen Anomalien der Meerestopographie auflösen können. Diese Messungen gelangen im Rahmen

des GEOHALO-Experiments, das an Bord des Forschungsflugzeuges verschiedene geowissenschaftliche Fragen des Mittelmeeres untersuchte.

Der Einsatz reflektierter GPS-Signale zur Vermessung von Meeresoberflächen ist relativ neu. Im Vergleich zu etablierten Radar- oder Laserhöhenmessungen, die jeweils nur einzelne Spuren beobachten, verspricht der Einsatz von GPS-Reflektionen eine deutlich höhere Messabdeckung. Grund dafür sind die gleichzeitig verfügbaren Signale von verschiedenen Navigationssatelliten, die entlang mehrerer Reflektionsspuren beobachtet werden können.

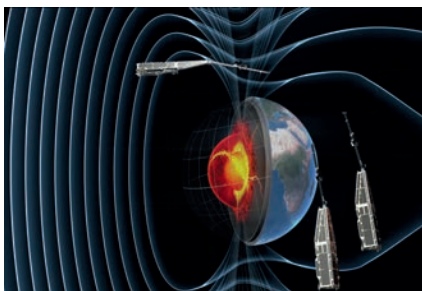
Die GFZ-Forscherinnen und -Forscher wollen noch höher hinaus, nämlich in den Weltraum auf die ISS. Die erfolgreichen Flugzeugmessungen sind ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Anwendung der GPS-Reflektometrie an Bord von Satelliten zur Beobachtung der globalen Ozeanoberflächen. Mögliche Anwendungen sind dabei u.a. die frühzeitige Entdeckung von Tsunami, die im offenen Ozean meist nur geringe Höhen haben

und deshalb mit den derzeit verfügbaren Methoden nur schwer zu lokalisieren sind. Auch für ein besseres Verständnis des Klimawandels können die GPS-Beobachtungen von Bedeutung sein, denn ozeanische Strömungen mit Ausdehnungen zwischen 10 und 100 km tragen entscheidend zum klimarelevanten Energietransport der Ozeane bei, auch sie werden bisher nur unzureichend erfasst. Derartige globale Fragestellungen sollen von den GFZ-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftlern mit einem GPS-Reflektometrieexperiment der Europäischen Weltraumbehörde ESA an Bord der Internationalen Weltraumstation ISS untersucht werden. ■

### Weiterführende Literatur zum Projekt:

Semmling, A. M., Beckheinrich, J., Wickert, J., Beyerle, G., Schön, S., Fabra, F., Pflug, H., He, K., Schwabe, J., Scheinert, M. (2014): „Sea surface topography retrieved from GNSS reflectometry phase data of the GEOHALO flight mission“, *Geophysical Research Letters*, 2014, 41.

## Globaler Wandel im Satellitenblick – neues DFG-Schwerpunktprogramm



Konstellation der Satellitenmission SWARM  
(Abb.: ESA/AOES Medialab)

Das Ende November 2013 erfolgreich gestartete Satellitentrio SWARM nahm nach abgeschlossener Systemerprobung Ende April 2014 den wissenschaftlichen Betrieb auf und liefert umfangreiche Datensätze zum Erdmagnetfeld, zum Erdschwerefeld und zur Hochatmosphäre. Diese Daten sind unverzichtbar zur Überwachung des globalen Wandels. In dem neu angelegten Schwerpunktprogramm 1788 „Study of Earth System Dynamics with a Constellation of Potential Field Missions“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG werden diese Daten genutzt, um Veränderungen im Erdmagnetfeld, im erdnahen Weltraum und in den dafür verantwortlichen Prozessen zu ermitteln und zu quantifizieren. Prof. Claudia Stolle und Prof. Hermann Lühr vom GFZ koordinieren dieses neue Schwerpunktprogramm. Im Zentrum der Forschungen stehen die Messdaten der ESA-Satellitenmission SWARM, die mindestens vier Jahre dauern wird.

Mit der Einrichtung des DFG-Schwerpunktprogramms „DynamicEarth“ erforschen deutsche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in universitären und außeruniversitären Einrichtungen in Kooperation mit internationalen Projektpartnern das System Erde in einem interdisziplinären Forschungsverbund. Die neuen SWARM-Daten werden hierfür grundlegend sein. Dabei können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf Erfahrungen aus den bereits gesammelten Datensätzen der sehr erfolg-

reich verlaufenen Vorgängermissionen CHAMP, Ørsted, GRACE und GOCE zurückgreifen.

Das am GFZ angesiedelte SWARM-Projektbüro (<http://www.swarm-projektbuero.de>) koordiniert in der Mission die deutschen Förderprogramme und die ESA-Ausschreibungen zu diesem Forschungsfeld. Zudem ist es eine wichtige Schnittstelle zur Nutzung der SWARM-Daten und -Datenprodukte. ■

## Eröffnung eines neuen geomagnetischen Observatoriums auf der Insel Lombok, Indonesien

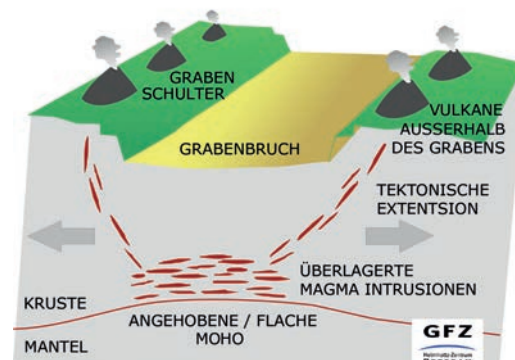
Am 10. April 2014 wurde das kurz zuvor fertig gestellte geomagnetische Observatorium auf der Insel Lombok in Indonesien feierlich eingeweiht. Das 15. vom GFZ betriebene oder unterstützte geomagnetische Observatorium wird in Zusammenarbeit mit der Universität Mataram, Indonesien, betrieben und ist Teil eines globalen Netzwerks. Die weltweit verteilten Stationen liefern zusammen mit den Messdaten von Satellitenmissionen kontinuierliche Beobachtungsdaten des Erdmagnetfelds mit seinen Quellen innerhalb und außerhalb der Erde. Die Untersuchung der internen Quellen ist von Bedeutung, um die langzeitliche Veränderung des Magnetfelds zu verstehen, welches uns unter anderem gegen Sonnenwind und kosmische Strahlung schützt. Die Messung der äußeren Anteile liefert wichtige Beiträge zur Überwachung des Weltraumwetters. Durch seine Lage im südostasiatischen Raum schließt das neue Observatorium eine Lücke im globalen Netz der Bodenstationen. Darüber hinaus wird es durch seine Äquatornähe erhebliche Beiträge zum Beispiel in der Langzeitbeobachtung der Lageveränderung des magnetischen Äquators liefern. ■

## Vulkane abseits ihrer Magmaquellen

An kontinentalen Grabenbrüchen, sogenannten Riftzonen, wie beispielsweise in Ostafrika oder dem Oberrheingraben, tritt

häufig Vulkanismus auf. Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler stoßen dabei auf ein Problem: Während die Magmaquellen in der Tiefe unterhalb des Zentrums des Grabens liegen, treten die Aufstiegskanäle oft viele Kilometer außerhalb der Grabenschultern an die Oberfläche und bilden dort Vulkane. Die Ursache dafür war bisher unbekannt. Ein Wissenschaftlerteam des GFZ konnte nun zusammen mit Forscherinnen und Forschern der Universitäten von Southampton (UK) und Roma Tre (Italien) zeigen, dass sich das Spannungsmuster in der Erdkruste ändert, wenn die Erdkruste innerhalb eines Grabens ausdünn und damit gewichtsbedingt entlastet wird. Dadurch wird das aus der Tiefe aufsteigende Magma in Gänge gesteuert, die schräg von den Magmaquellen in der Riftzone nach oben abzweigen und erst kilometerweit von der Achse des Grabenbruchs entfernt zutage treten.

Die Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler verwendeten ein numerisches Modell zur Simulation der Bildung solcher Magmagänge. Die bislang unbekannte Auswirkung der Änderung der Topographie der Bruchzone auf die Bahn des Magmaaufstiegs während der Riftbildung konnte so nachgebildet werden. Die Modellrechnungen wurden mit realen Daten unterfüttert. Das Modell zeigt, dass Vulkanismus an Spreizungszonen auf zwei unterschiedliche Arten auftreten kann. Im Fall von flachen, breiten Grabenbrüchen tritt das Magma direkt oberhalb der tiefsitzenden Magmaquelle an der Erdoberfläche



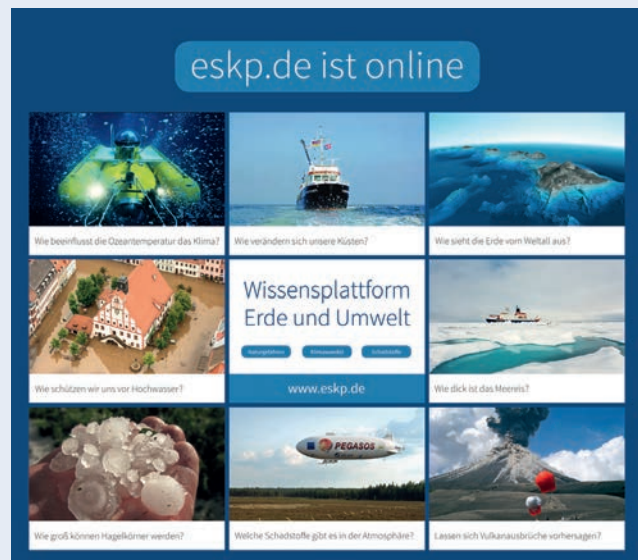
Schematische Abbildung der Entstehung von Vulkanen seitlich von Grabenbrüchen  
(Abb.: R. Milkereit, GFZ)

aus, während im Fall von tiefen, schmalen Grabenbrüchen das Magma außerhalb der Grabenschultern austritt. Da der Aufstiegs- weg des Magmas im zweiten Fall anfäng- lich fast horizontal erfolgt, kann es im Extremfall bereits in der Kruste erstarren, ohne dass Vulkanismus an der Erdober- fläche sichtbar wird, wie Beobachtungen von Grabenbrüchen weltweit zeigen. Dabei bleibt der Vorgang nicht statisch. Falls die tektonische Beanspruchung durch die Dehnung der Kruste ausreichend lange anhält und die Spreizungszone ein gewis- ses Reifestadium erreicht, lagern sich die horizontalen Magma-Intrusionen schließ- lich auch in der flacheren Kruste ab. In diesem Fall sagt das Modell richtigerweise voraus, dass sich weitere Magma-Intrusionen senkrecht orientieren und entlang der Spreizungsachse ausbreiten.

Grabenbrüche gehören zu den wichtigs- ten tektonischen Erscheinungen unseres Planeten. Sie bilden sich entweder durch Dehnung im Innern großer tektonischer Platten oder an Stellen, wo Platten ausein- anderdriften. Die Oberflächenmorphologie von Grabenbrüchen wird durch Bruchli- nien und Absenkungen im Gelände be- stimmt sowie durch Vulkane, die entweder direkt in der Bruchzone oder an deren Rändern entstehen. Bereits seit Jahrzehn- ten werden die Entstehung von Magma unterhalb der Riftzonen sowie die Rolle der Magmakammern beim Auseinanderdriften der Platten studiert. Jedoch ist noch weit- gehend unbekannt, welche Größen und Faktoren die räumliche Verteilung der Vul- kane an der Oberfläche und das Verhältnis von Intrusionen zu Ausbrüchen steuern. Die jetzt vorgelegten Ergebnisse ermögli- chen einen neuen Ansatz zur Erforschung von Riftzonen. ■

Maccaferri, F., Rivalta, E., Keir, D., Acocella, V. (2014): „Off-rift volcanism in rift zones determined by crustal unloading“, *Nature Geoscience*, 23.03.2014.

## Neue Informationsplattform zu Erde und Umwelt



Die Wissensplattform „Erde und Umwelt – Earth System Knowledge Platform“ ESKP ging am 10. Mai 2014 online. Hier präsentieren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus acht Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft aktuelle Forschungsergebnisse und fundiertes Hintergrundwissen zu den Themen „Auswirkungen des Klimawandels“, „Naturgefahren“ und „Ausbreitung von Schadstoffen in der Umwelt“.

Die Auswirkungen des Klimawandels, die Früherkennung und der Schutz vor geologischen Naturgefahren und wetterbedingten Extremereignissen sowie die Verbreitung von Schadstoffen in der Umwelt sind enorme Herausforderungen für unsere Gesellschaft. Diese vielschichtigen Aufgaben erfordern eine interdisziplinäre und zentrenübergreifende Zusammenarbeit, da für die Erstellung eines Lagebilds oftmals sehr unterschiedliche wissenschaftliche Expertisen zusammengeführt werden müssen. Dies gilt auch für langsam fortschreitende Prozesse, die mit dem Klimawandel einhergehen und unterschiedliche Folgeerscheinungen wie z.B. ein verändertes Risiko von Sturmfluten an der Nordsee mit sich bringen könnten. Auch hier können Zusammenhänge und Konse-

quenzen nur durch die ganzheitliche Betrachtung und die Bündelung von Fachwissen ausführlich erklärt werden.

ESKP ist ein Informationspool und eine zentrale Anlaufstelle für die Öffentlichkeit. Vorhandenes Wissen der an ESKP beteiligten Helmholtz-Zentren wird für verschiedene Zielgruppen (u.a. Behörden, Politik, Entscheidungsträger, Presse, Bevölkerung) verständlich aufgearbeitet. Das breite Informationsangebot umfasst Texte, Interviews, Echtzeitdaten, Grafiken, Bild- und Filmmaterial. Literaturhinweise auf Fachpublikationen aber auch allgemeinverständliche Broschüren ergänzen das Angebot. Darüber hinaus stehen für zusätzliche Fragen die Fachexperten der Forschungszentren zur Verfügung. Das Projekt wird durch das GFZ gemeinsam mit dem HZG koordiniert. Darüber hinaus beteiligen sich die Helmholtz-Zentren AWI, DLR, FZ Jülich, GEOMAR, KIT und UFZ an der Helmholtz-Wissensplattform „Erde und Umwelt“. ■

**ESKP im Internet:**  
www.eskp.de

**Projektkoordination am GFZ:**  
Dr. Ute Münch  
E-Mail: ute.muench@gfz-potsdam.de

## Internationale Zusammenarbeit

Das GFZ konnte im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit bestehende Kontakte weiter intensivieren. So wurde die bilaterale Kooperation mit Indien mit der Unterzeichnung eines Memorandum of Understanding (MoU) zwischen der Helmholtz-Gemeinschaft und dem Ministry of Earth Sciences (MoES) bestärkt. Für das GFZ als Mitunterzeichner stehen die Themen Geo-Energie, Mineralressourcen, Prävention von Naturkatastrophen und geochemische Analytik im Zentrum des Interesses. Zu letzterem Thema wurde zusätzlich mit dem National Geophysical Research Institute NGRI in Hyderabad ein Kooperationsvertrag zum Expertenaustausch unterzeichnet.

Auf der Grundlage eines Anfang 2013 unterzeichneten MoU zum Aufbau einer Forschungsk Kooperation im Bereich „Mineralische Rohstoff-Forschung“ fand vom 5. bis 6. Mai 2014 am GFZ ein bilateraler Workshop statt, der den Startpunkt für konkrete Forschungsprojekte mit Russland markierte. Neben GFZ und dem HZDR/HIF auf deutscher Seite, waren von russischer Seite Forschungsinstitutionen und Unternehmen aus Novosibirsk, Krasnojarsk und Tomsk vertreten. Komplementär zu diesen Kooperationsaktivitäten könnte sich eine neue, attraktive Facette der Deutsch-Russischen Zusammenarbeit eröffnen. Die Vernadsky-Stiftung, eine in der UNESCO organisierte russische Nicht-Regierungs-Organisation (NGO), möchte sich der internationalen Forschung zukünftig stärker öffnen und sieht in der Helmholtz-Gemeinschaft einen ihrer wichtigsten Partner. Bislang konzentrierte sich die Vernadsky-Stiftung in ihrer Arbeit primär auf Russland. Nun soll die bislang sehr erfolgreiche Arbeit auch international sichtbar werden. Das Jahr 2014 wurde daher als „Internationales Jahr“ ausgerufen. Die Auftaktveranstaltung fand vom 1. bis 3. April 2014 am GFZ statt. Unter dem Titel „Research on Sustainability – a Russian-German Dialogue“ diskutierten etwa 30 russische und deutsche Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft, Politik und Verwaltung zukünftige Möglichkei-



Vertreter der Vernadsky-Stiftung am GFZ  
(Foto: R. Hanna, GFZ)

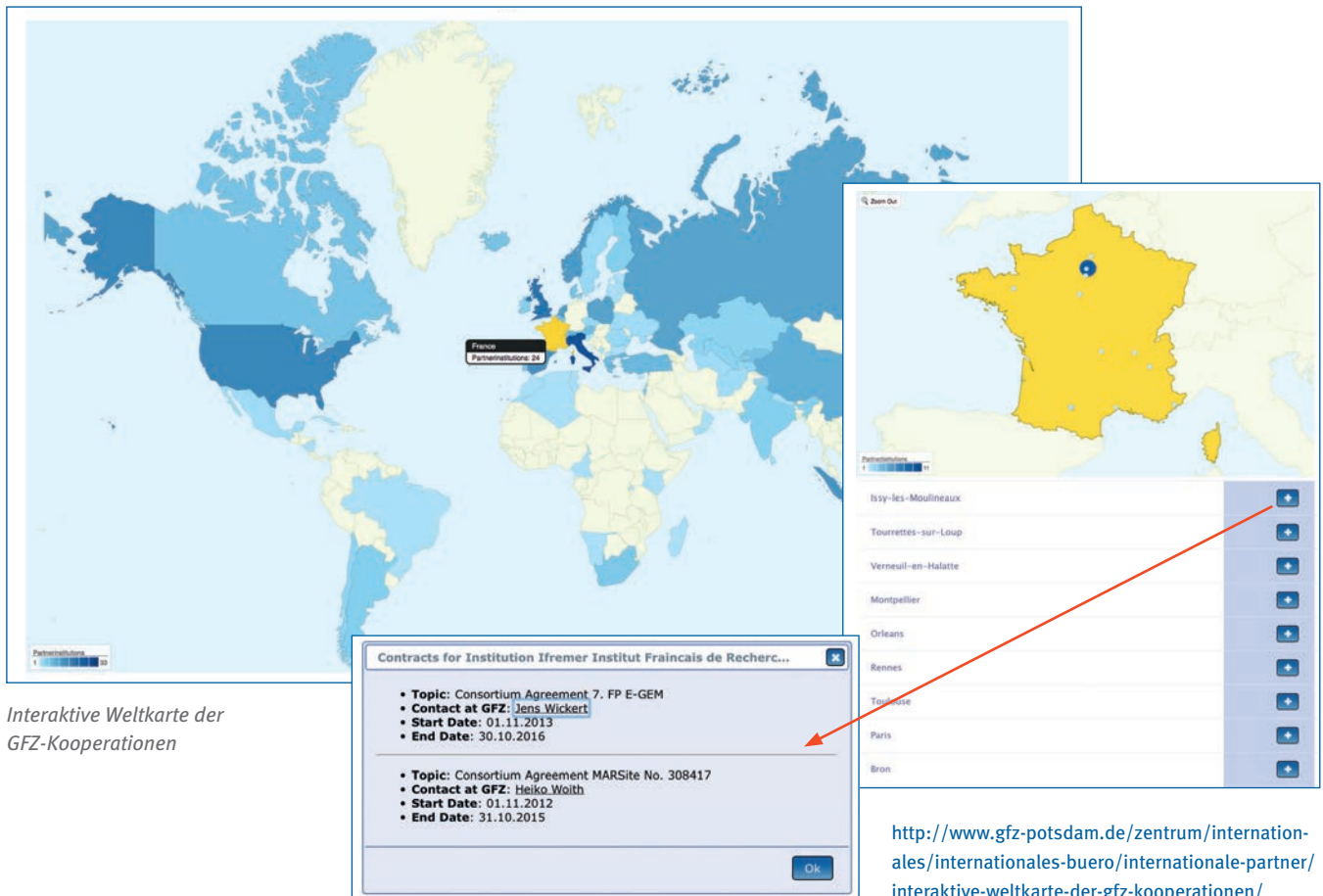
ten der bilateralen Zusammenarbeit in der Nachhaltigkeitsforschung und Nachwuchsförderung.

Zentralveranstaltung war ein gemeinsam mit dem Deutsch-Russischen Forum organisiertes Wissenschaftsgespräch zum Thema: „Energie und Umwelt: neue Herausforderungen für Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft“ am 3. April 2014 in der brandenburgischen Staatskanzlei in Potsdam. Neben Prof. Sabine Kunst, Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Brandenburg, nahmen auch der ehemalige brandenburgische Ministerpräsident und neue Vorstandsvorsitzende des Deutsch-Russischen Forums, Matthias Platzeck, sowie der Wissenschaftliche Vorstand und Sprecher des Vorstands des GFZ, Prof. Reinhard Hüttel, an dieser Veranstaltung teil.

Auch die Zusammenarbeit mit dem Research Council Oman (The Research Council, TRC) zum Aufbau des außeruniversitären Forschungszentrums „Institute for Advanced Technology Integration, IATI“ wurde erfolgreich fortgesetzt. Dazu entwickelten GFZ, UFZ und GEOMAR zwischen Juni 2013 und März 2014 zunächst ein Konzept für eine zukünftige Struktur und Governance des Zentrums. Mitte Dezember 2013 stellten die Vertreter der

Zentren GFZ, UFZ und GEOMAR den relevanten Aufsichtsgremien des TRC ihren Abschlussbericht vor. Auf dessen Grundlage wurden durch den TRC 110 Mio. Euro für den Bau des IATI freigegeben. Den wissenschaftlich-technologischen Nukleus für das neue Forschungszentrum begründen bilaterale Pilotprojekte mit omanischen Forschungseinrichtungen in den Bereichen Energie- und Wasserforschung, die Anfang 2015 an den Start gehen. Das GFZ hat dazu zwei Projektvorschläge, „New geochemical applications towards advanced petroleum exploration and production in Oman“ und „Continuous hybrid cooling using geothermal and solar heat sources and underground storage systems“, eingereicht.

Exemplarisch für die konsequente Anbahnung einer neuen Wissenschaftskooperation ist die Zusammenarbeit des GFZ mit dem Nationalen Rat für Wissenschaftliche und Technologische Forschung, der argentinischen CONICET. Nach positiver Evaluierung des Vortrags wurde im März 2014 von der Universität Potsdam und dem GFZ der Vortragsantrag auf Einrichtung des internationalen DFG-Graduiertenkollegs „SuRfAce processes, TEctonics and Georesources: The Andean foreland basin of Argentina (StRaTEGy)“ eingereicht. Würde dieser



Interaktive Weltkarte der GFZ-Kooperationen

genehmigt, könnte innerhalb von nur knapp drei Jahren aus einem im November 2011 unterzeichneten MoU ein internationales Großprojekt entwickelt werden, das für die nächste Dekade bestimmend für die geowissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen dem GFZ und Argentinien sein wird.

Mit Brasilien konnten die Kooperationsbeziehungen, insbesondere auf dem Gebiet der Mineralischen Rohstofferkundung intensiviert werden. Dazu wurden vielversprechende Kontakte mit dem Instituto Tecnológico Vale|Vale Institute of Technology (ITV) aufgebaut. Vale S.A. ist neben der Rio Tinto Group und BHP Billiton eines der drei größten Bergbau-

unternehmen der Welt. Nach einem ersten Informationstreffen im Oktober 2013, besuchte am 18. März 2014 die Leitung des Geschäftsbereichs „Mining“ das GFZ. Derzeit werden verschiedene Gemeinschaftsprojekte zwischen GFZ und Vale entwickelt.

Essentiell für die internationale Außenwahrnehmung des GFZ ist dessen Internetauftritt. Auf der neu gestalteten GFZ-Webseite ist daher ein eigener Bereich für das „Internationale Büro“ eingerichtet worden. Neben aktuellen Meldungen, hochwertigen Portaldiensten für Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftler sowie diversen Dienstleistungsangeboten des „Internationalen Büros“ ist das

Herzstück der Seite eine interaktive Weltkarte zu den internationalen Kooperationen des GFZ (s. Abb. oben). Sie wird täglich durch einen automatisierten Abgleich mit der Kooperationsdatenbank des GFZ aktualisiert. Sowohl intern, wie extern wird somit ein schneller Zugriff auf alle formalisierten Kooperationen des GFZ möglich. ■

**Kontakt:**

**Internationale Beziehungen**

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



# Ausgezeichnet

## TU-APL-Professur für Heinz Wilkes



Die Technische Universität Berlin hat am 20.03.2014 Herrn **Prof. Heinz Wilkes** aus der GFZ-Sektion „Organische Geochemie“ in Würdigung seiner hervorragenden Leistungen in Forschung und Lehre die Urkunde mit der akademischen Würde eines außerplanmäßigen Professors für das Fach „Biogeochemie“ überreicht.

Herr Wilkes führt Lehrveranstaltungen in den Bachelor- und Masterstudiengängen Geotechnologie am Institut für Angewandte Geowissenschaften der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt – der Technischen Universität Berlin durch. Seine Forschungsinteressen am GFZ liegen auf den Gebieten des biogeochemischen Kohlenstoffkreislaufs und der Geochemie der fossilen Brennstoffe. Ein Schwerpunkt ist die Untersuchung der Mechanismen und Auswirkungen des anaeroben mikrobiellen Abbaus von Kohlenwasserstoffen und Erdöl. ■

## Wiechert-Medaille für Rainer Kind



Die Deutsche Geophysikalische Gesellschaft verlieh im Rahmen ihrer Jahrestagung in Karlsruhe vom 10. bis 13. März 2014 die Emil Wiechert-Medaille an Herrn **Prof. Rainer Kind**, GFZ, für herausragende wissenschaftliche Leistungen auf den Gebieten der Seismologie und der seismologischen Erkundung des Erdmantels. Rainer Kind war von 1992 bis 2010 Leiter der Sektion „Seismologie“ am GFZ und ist seitdem als Senior Scientist weiterhin am GFZ tätig.

Die Emil Wiechert-Medaille ist die seit 1955 verliehene höchste Auszeichnung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG) und wird in unregelmäßigen zeitlichen Abständen alle drei bis fünf Jahre verliehen. Benannt ist sie nach dem deutschen Physiker und Seismologen Emil Wiechert (1861 bis 1928), auf dessen Initiative die DGG 1922 gegründet wurde und der gleichzeitig deren erster Vorsitzende war. Mit der Verleihung würdigt die Gesellschaft herausragende Arbeiten in der Wissenschaftsdisziplin Geophysik. ■

Die Mineralogical Association of Canada verleiht die Hawley-Medaille für die beste Publikation im „Canadian Mineralogist“ an Ph.D. Felix V. Kaminsky (Vancouver), Frau **Anja Schreiber** und Herr **Dr. Richard Wirth** (beide GFZ). Die Begründung lautet: „Neuere Studien über Einschlüsse von Mineralen in Diamanten können einzigartige Informationen über die Zusammensetzung des unteren Erdmantels und die Rolle von Fluiden im tiefen Erdkörper liefern. Die Arbeit von Kaminsky, Wirth und Schreiber bedeutet einen entscheidenden Fortschritt auf diesem Gebiet. Sorgfältige Untersuchungen mit dem Transmissionselektronenmikroskop, mit Elektronenbeugung und analytischer Elektronenmikroskopie sowie einer Reihe von anderen Methoden dokumentieren Phasenverhältnisse, Texturen und chemische Zusammensetzungen von Mikro- und Nanoeinschlüssen in Diamanten des unteren Erdmantels. Die Autoren zeigen, dass sich Diamanten im unteren Mantel aus einem fluiden Medium bilden, das karbonatitisch mit Anteilen von Chlori-

## Hawley-Medaille für Anja Schreiber und Richard Wirth



Anja Schreiber und Dr. Richard Wirth

den, Phosphaten und Fluoriden und zudem mit Seltenerdmetallen angereichert war. Die innovative Arbeit weist den Weg für zukünftige Untersuchungen über die Natur dieses primären, in großen Tiefen gebildeten karbonatitischen Magmas und seine Bedeutung für das Verständnis der Akkretion und Differentiation des Erdkörpers in Raum und Zeit.“

Die Medaille wurde am 21. Mai 2014 auf der GAC-MAC (Geological and Mineralogical Associations of Canada)-Konferenz in Fredericton, New Brunswick, Kanada überreicht. ■

Kaminsky, F. V., Wirth, R., Schreiber, A. (2013): Carbonatitic inclusions in deep mantle diamond from Juina, Brazil: new minerals in the carbonate-halide association. - *Canadian Mineralogist*, 51, 5, 669-688.

„Editors' Citation for Excellence in Refereeing“ an drei GFZ-Wissenschaftler

Prof. Bruno Merz, Prof. Frederik Tilmann und Dr. Daniel Farinotti



Prof. Bruno Merz, Prof. Frederik Tilmann und Dr. Daniel Farinotti

Die American Geophysical Union (AGU) verleiht für die von ihr herausgegebenen wissenschaftlichen Zeitschriften jährlich eine Auszeichnung für „exzellentes Begutachten (Excellence in Refereeing)“. Für das Jahr 2013 haben die GFZ-Wissenschaftler **Prof. Bruno Merz**, **Prof. Frederik Tilmann** und **Dr. Daniel Farinotti** diese Auszeichnung bekommen. Ausgesprochen wurden sie von den Zeitschriften *Water Resources Research* (B. Merz), *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (F. Tilmann) und *Journal of Geophysical Research – Earth Surface* (D. Farinotti). Die Ehrung wurde in der Zeitschrift *EOS* am 3. Juni 2014 veröffentlicht (Volume 95, Issue 22).

Die AGU ist weltweit die größte Vereinigung in der Domäne der Geowissenschaften, und setzt sich für die Förderung der Erd- und Weltraumwissenschaften ein. Sie gibt unter anderem mehr als 20 fachspezifische Zeitschriften heraus. Solche Zeitschriften sind das primäre Mittel für den wissenschaftlichen Austausch und stellen die Plattform dar, in welcher Resultate aus wissenschaftlichen Arbeiten vorgestellt werden. Die wissenschaftliche Qualität wird durch das sogenannte „peer review“-System gesichert. Jede Arbeit wird vor ihrer Publikation von mehreren Expertinnen und Experten der betreffenden Disziplin begutachtet. Der Entscheid über das Erscheinen einer bestimmten Arbeit basiert auf diesen Gutachten. Das Peer Review-System stützt sich stark auf die freiwillige Arbeit der Gutachterinnen und Gutachter. Die Auszeichnung für „Excellence in Refereeing“ würdigt eine für die Qualitätssicherung in der Wissenschaft wichtige Arbeit. ■

### „Certificate of Excellence in Reviewing 2013“ an Michael Kühn



Das International Journal of Greenhouse Gas Control zeichnete Herrn **Prof. Michael Kühn**, Leiter der GFZ-Sektion „Hydrogeologie“, im Juni 2014 mit dem „Certificate of Excellence in Reviewing 2013“ aus. Herr Kühn wird als Mitglied des Editorial Boards für seine exzellenten Beiträge zur Qualität des Journals geehrt.

### „Student presentation award“ für Frau Martinez-Garzon



Frau **Patricia Martinez-Garzon**, Doktorandin in der GFZ-Sektion „*Geomechanik und Rheologie*“ ist für Ihren Vortrag „Induced seismicity mechanisms at the Geysers geothermal field“ auf der Jahrestagung der Seismological Society of America (SSA) in Anchorage, USA, im Mai 2014 mit dem „SSA student presentation award“ ausgezeichnet wor-

den. Frau Martinez-Garzon vereint mit Ihren Forschungsarbeiten die beiden Disziplinen Seismologie und Geomechanik. Ihr Hauptziel ist es dabei, den Zusammenhang zwischen der Wasserinjektion in Geo-Reservoire und den dabei induzierten Erdbeben besser zu verstehen. ■

### Verein der Freunde und Förderer des GFZ verleiht erstmals den Friedrich-Robert-Helmert-Preis

Der Verein der Freunde und Förderer des GFZ – FFGFZ e.V. – hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Aktivitäten des GFZ in Potsdam finanziell und ideell zu unterstützen. Dazu zählt beispielsweise die Organisation von Veranstaltungen zum wissenschaftlichen Gedankenaustausch, die Unterstützung des Nachwuchses und des Kontakts zu Schulen durch Veranstaltungen, die Vertiefung der internationalen Beziehungen und die Pflege der geowissenschaftlichen Tradition auf dem Potsdamer Telegrafenberg. Der FFGFZ bietet den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des GFZ sowie Ehemaligen und interessierten Externen ein geowissenschaftliches Netzwerk, soziale Kontakte, Veranstaltungen und Exkursionen an.

Im vergangenen Jahr hat der FFGFZ erstmals den **Friedrich-Robert-Helmert-Preis** für die jahrgangsbeste Promotionsarbeit ausgeschrieben. Mit diesem Preis werden Promotionsarbeiten gewürdigt, die sich sowohl durch wissenschaftliche Exzellenz, als auch durch die Relevanz hinsichtlich absehbarer Folgewirkung der Ergebnisse in Wissenschaft und praktischer Nutzung auszeichnen. Der Preis ist mit einem Preisgeld in Höhe von 1500 Euro dotiert.



Herr **Dr.-Ing. Thomas Reinsch** aus der GFZ-Sektion „Reservoirtechnologien“ konnte den Vorstand des FFGFZ mit seiner Dissertation „Structural Integrity Monitoring in a Hot Geothermal Well Using Fibre Optic Fibre Optic Distributed Sensing“ überzeugen. Im Rahmen der FFGFZ-Mitgliederversammlung in Potsdam wurde der Friedrich-Robert-Helmert-Preis für den Jahrgang 2012/2013 am 6. Dezember 2013

an Herrn Reinsch vergeben. Darüber hinaus erhielten zwei weitere Dissertationen einen Anerkennungspreis: **Dr. Volker Haigis** für seine Dissertation „Seltene Erden und Wärmetransport im Erdmantel: vom Atom zu makroskopischen Skalen“ und **Dr. Christian Sippl** für seine Dissertation „Shallow and deep structure of the Pamir-Hindu Kush region from local seismic data“. ■

Mehr Informationen zu der Arbeit des FFGFZ e.V. und eine Beitrittserklärung im pdf-Format sind auf der Website des Vereins zu finden: <http://www.gfz-potsdam.de/zentrum/freunde-und-foerderer/>

### Wiess Visiting Professorship für Onno Oncken



Herr **Prof. Onno Oncken**, Direktor des GFZ-Departments „*Geodynamik und Geomaterialien*“ und Leiter der Sektion „*Dynamik der Lithosphäre*“, wurde im April 2014 das Wiess Visiting Professorship von der Rice University in Houston, USA, verliehen. Diese jährlich im Wettbewerb verliehene Professur ist mit einem Forschungsaufenthalt verbunden. In Houston wird sich Herr Oncken von November 2014 bis März 2015 unter anderem mit dem US-Kontinentalränderprogramm befassen. ■

### Ernst Huenges zum Sprecher des FVEE gewählt

Das Direktorium des Forschungsverbands Erneuerbare Energien FVEE wählte am 16. Januar 2014 Herrn **Prof. Ernst Huenges**, Leiter der Sektion „*Reservoirtechnologien*“ und des „*Internationalen Geothermiezentrums*“ am GFZ, zum neuen Sprecher. Huenges, sieht die Aufgabe der Forschung bei der Gestaltung der Energiewende darin, Technologieoptionen für hohe Anteile regenerativer Energien im Strom-Wärmesystem zu entwickeln: Aktuell müsse die Forschung Strategien für die nächste Phase der Energiewende formulieren, um die Zielvorgaben von 40 bis 45% erneuerbarer Energien in 2025 zu



Prof. Ernst Huenges am GFZ-Geothermie-Forschungsstandort Groß Schönebeck

erfüllen. Es gilt zu untersuchen, wie die einzelnen Technologien der Energiebereitstellung gemeinsam mit auszubauenden Netzen und Speichern zu einem optimierten Gesamtsystem für Strom, Wärme und Verkehr zusammengeführt werden können. Über die technischen Fragen hinaus müssten auch Finanzierungsmechanismen und Akzeptanzfragen untersucht werden, um die nächste Phase der Energiewende aktiv zu gestalten. Ziel ist ein nachhaltiges, stabiles Energiesystem, in dem heimische Wertschöpfung einen hohen Stellenwert bekommt.

Ernst Huenges ist Sprecher des Forschungsprogramms „Geothermische Energiesysteme“ in der Helmholtz-Gemeinschaft und Professor für Geothermische Technologien an der Technischen Universität Berlin. Er engagiert sich in internationalen Gremien und koordiniert beispielsweise in der Europäischen Energieforschungsallianz EERA die europäische Geothermieforschung. ■

### Doris Dransch in das Belmont Forum entsandt



Frau **Prof. Doris Dransch**, Leiterin der GFZ-Sektion „Geoinformatik“, wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Ministerium für Bildung und Forschung als Expertin für

die Exploration großer und heterogener raum-zeitlicher Daten in die internationale Arbeitsgruppe „E-Infrastructure and Data Management“ des Belmont Forums entsandt. Das Belmont Forum ist eine Gruppe von 14 nationalen Forschungsfördereinrichtungen und internationalen Forschungsorganisationen

(z. B. International Council for Science), die Forschungsaktivitäten zum Globalen Wandel im Umweltbereich koordinieren und befördern. Übergeordnetes Ziel des Belmont Forums ist, Wissen bereitzustellen, auf dessen Basis Vermeidungs- und Anpassungsstrategien hinsichtlich der großen umweltbezogenen Veränderungen und Katastropheneignisse entwickelt werden sollen. Eine Voraussetzung dafür ist, auf die vielfältigen Daten der verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen zugreifen und sie im Sinne einer holistischen Betrachtung und Entscheidung analysieren und nutzen zu können. Die Arbeitsgruppe „E-Infrastructure and Data Management“ soll die Hürden und Forschungslücken in diesem Bereich identifizieren und daraus Empfehlungen für zukünftige Forschungsaktivitäten ableiten. ■

**Belmont Forum im Internet:**  
<http://igfagcr.org/index.php/belmont-forum>

### Drei Humboldt-Preisträger und -Stipendiaten am GFZ



Von Februar bis Mai 2014 besuchte Herr **Prof. Jörn Davidsen** vom Department of Physics and Astronomy, University of Calgary, Kanada, als Alexander von Humboldt-Forschungsstipendiat

das GFZ. Er ist zu Gast in der Sektion „Geomechanik und Rheologie“. Herr Davidsen ist Physiker mit Forschungsschwerpunkten in den Bereichen statistische Seismologie und seismische Gefährdung. Während seines ersten von drei aufeinander folgenden Aufenthalten am GFZ bis 2016 forschte er u. a. zum Thema induzierte Seismizität im Bergbau und im Zusammenhang mit der hydraulischen Stimulation und der Produktion von geothermischen Reservoiren. Ein weiteres Thema ist die Fortsetzung einer bereits bestehenden Zusammenarbeit zu den statistischen Eigenschaften und der räumlich-zeitlichen Häufung von Erdbeben auf unterschiedlichen Skalen, die vom Laborexperiment bis zu Felddaten von der Nordanatolischen Verwerfungszone reichen.



Herr **Prof. Thorsten W. Becker** von der University of Southern California, Los Angeles, USA, ist ebenfalls Gast der Sektion „Geomechanik und Rheologie“. Der im Jahr 2013

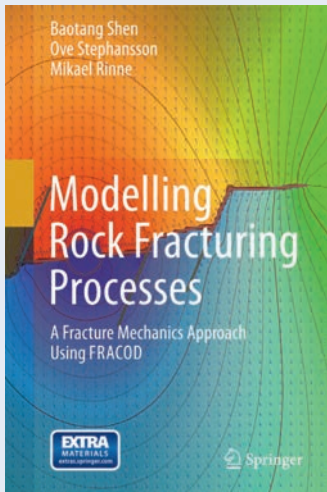
mit dem Friedrich Wilhelm Bessel-Forschungspreis der Humboldt-Stiftung ausgezeichnete Geophysiker besucht von Juni bis August 2014 das GFZ. Die Forschungsthemen von Herrn Becker sind im Bereich Geodynamik angesiedelt. Er ist (Co-)Autor von 85 Publikationen mit dem Schwerpunkt Erdmantelkonvektion und Lithosphärendynamik. Thorsten Becker verbindet numerische Modellbildung mit detaillierten geologisch-geophysikalischen Beobachtungsdaten. Während seines Forschungsaufenthalts am GFZ untersucht er u. a. räumlich-zeitliche Seismizitätsmuster aus Störungszonen und Laborexperimenten.



Im Rahmen eines Alexander von Humboldt-Forschungsstipendiums für Postdoktoranden ist Frau **Dr. Jessica Till** seit Juni 2014 zu einem zweijährigen Forschungsaufenthalt

Gast am GFZ in der Sektion „Geomechanik und Rheologie“. Während ihres Aufenthalts am GFZ wird Frau Till das rheologische Verhalten von Magnetit und Ilmenit sowie deren Einfluss auf das Deformationsverhalten der ozeanischen Kruste untersuchen. ■

# Bücher



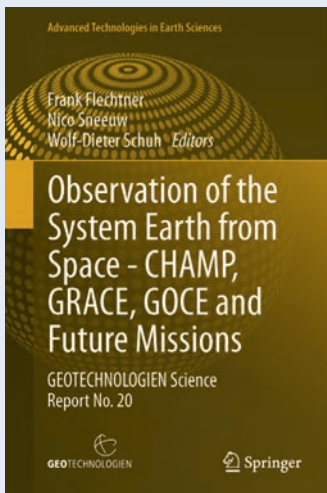
## **Modelling Rock Fracturing Processes** **A Fracture Mechanics Approach Using FRANCOD**

Baotang Shen, Ove Stephansson,  
Mikael Rinne  
Springer 2014, 173 Seiten  
ISBN: 978-94-007-6904-5

### **Über das Buch schreibt der Verlag:**

This text book provides the theoretical background of rock fracture mechanics and displacement discontinuity methods used for the modelling of geomechanical problems.

The computer program FRANCOD is used to analyse the fracture problems, assessing fracture initiation and propagation in tension (Mode I), shear (Mode II) and mixed mode I and II of solid intact or jointed geomaterials. The book also presents the fundamentals of thermo-mechanical coupling and hydro-mechanical coupling. Formulations of multiple regional mechanical, thermal and hydraulic functions, which allow analyses of fracture mechanics problems for structures made of brittle, rock-like materials, are provided. In addition, instructive examples of code verification and applications are presented. ■



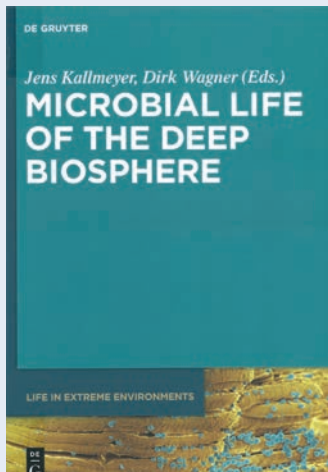
## **Observation of the System Earth from Space - CHAMP, GRACE, GOCE and future missions** **GEOTECHNOLOGIEN** **Science Report No. 20**

Series: Advanced Technologies in Earth Sciences  
Frank Flechtner, Nico Sneeuw, Wolf-Dieter Schuh (Eds.)  
Springer 2014, 230 Seiten  
ISBN 978-3-642-32135-1

### **About this book:**

Significant advances in the scientific use of space based data were achieved in three joint interdisciplinary projects based on data of the satellite missions CHAMP, GRACE and GOCE within the R&D program GEOTECHNOL-

OGIEN. It was possible to explore and monitor changes related to the Earth's surface, the boundary layer between atmosphere and solid earth, and the oceans and ice shields. This boundary layer is our habitat and therefore is in the focus of our interests. The Earth's surface is subject to anthropogenic changes, to changes driven by the Sun, Moon and planets, and by changes caused by processes in the Earth system. The state parameters and their changes are best monitored from space. The theme "Observation of the System Earth from Space" offers comprehensive insights into a broad range of research topics relevant to society including geodesy, oceanography, atmospheric science (from meteorology to climatology), hydrology and glaciology. ■



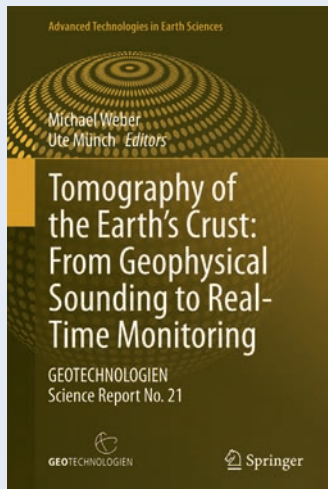
## Microbial Life of the Deep Biosphere

Life in Extreme Environments  
Jens Kallmeyer, Dirk Wagner (Eds.)  
De Gruyter 2014, 342 Seiten (Hardcover)  
ISBN 978-3-11-030009-3

### About this book:

Over the last two decades, exploration of the deep subsurface biosphere has developed into a major research area. New findings constantly challenge our concepts of global biogeochemical cycles and the ultimate limits to life. In order to explain our observations from deep subsurface ecosystems it is necessary to develop truly interdisciplinary approaches,

ranging from microbiology and geochemistry to physics and modeling. This book aims to bring together a wide variety of topics, covering the broad range of issues that are associated with deep biosphere exploration. Not only does the book present case studies of selected projects, but also treats questions arising from our current knowledge. Despite nearly two decades of research, there are still many boundaries to exploration caused by technical limitations and one section of the book is devoted to these technical challenges and the latest developments in this field. This volume will be of high interest to biologists, chemists and earth scientists all working on the deep biosphere. ■



## Tomography of the Earth's Crust: From Geophysical Sounding to Real-Time Monitoring

GEOTECHNOLOGIEN  
Science Report No. 21

Series: Advanced Technologies in Earth Sciences  
Michael Weber, Ute Münch (Eds.)  
Springer 2014, 176 Seiten  
ISBN 978-3-319-04205-3

### About this book:

The research work on the topic of “Tomography of the Earth's Crust: From Geophysical Sounding to Real-Time Monitoring” has focused on the development of cross-scale multiparameter methods and their technological application together with the development of innovative field techniques. Seismic wave field inversion theory, diffusion and potential methods were developed and optimized with respect to cost and benefit aspects. This volume summarizes the scientific results of nine interdisciplinary joint projects funded by the German Federal Ministry

of Education and Research in the framework of the Research and Development Program GEOTECHNOLOGIEN. Highlights and innovations presented cover many length scales and involve targets ranging from applications in the laboratory, to ground water surveys of heterogeneous aquifer, geotechnical applications like tunnel excavation, coal mine and CO<sub>2</sub> monitoring and the imaging and monitoring of tectonic and societally relevant objects as active faults and volcanoes. To study these objects, the authors use the full spectrum of geophysical methods (ultrasonics, seismic and seismology, electromagnetics, gravity, and airborne) in combination with new methods like seismic interferometry, diffuse wave field theory and full-wave-form inversion in 3D and partially also in 4D. Geophysical Sounding to Real-Time Monitoring has focused on the development of cross-scale multiparameter methods and their technological application together with the development of innovative field techniques. Seismic wave field inversion theory, diffusion and potential methods were developed and optimized with respect to cost and benefit aspects. ■

## Aktuelle Scientific Technical Reports des GFZ

Die Scientific Technical Reports des GFZ stehen unter einer Creative Commons-Lizenz als offen zugängliche Publikationen zur Verfügung.

Sie erscheinen in begrenzter Auflage in gedruckter Form. Gedruckte Exemplare sind gegen eine Schutzgebühr von 10 Euro erhältlich bei:

Bibliothek des Wissenschaftsparks, Albert Einstein, Telegrafenberg A17, 14473 Potsdam  
Fax: 0049-0331-288-1914  
E-Mail: [bib@gfz-potsdam.de](mailto:bib@gfz-potsdam.de)  
ISSN: 2190-7110

**Schwab, M. J., Theuerkauf, M., Brauer, A., Wilmsking, M., Lampe, R. (Eds.) (2014):**

3rd Annual ICLEA Workshop 2014: Dynamics of climate and landscape evolution of cultural landscapes in the Northern Central European Lowlands since the last ice age; Abstract volume & excursion guide; March 25 - 28, 2014 in Hansestadt Greifswald, Germany  
Scientific Technical Report (14/02), Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

<http://doi.org/10.2312/GFZ.b103-14028> ■

**Asch, G., Tilmann, F., Schurr, B., Ryberg, T. (2014):**

MINAS, temporary MINI ArrayS within the frame of IPOC

Scientific Technical Report – Data (14/03), Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

<http://doi.org/10.2312/GFZ.b103-14036> ■

**Baumann-Wilke, M., Bauer, K., Stiller, M., Schovsbo, N. H. (2014):**

Data of the active and passive seismic experiments on Bornholm in the framework of the GASH project (October 2010 and June 2012)  
Scientific Technical Report – Data (14/04), Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

<http://doi.org/10.2312/GFZ.b103-14046> ■





## System Erde. GFZ-Journal (2014) Jahrgang 4, Heft 1

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

### **Bohrungen: Ein Instrument der Wissenschaft**

*Ulrich Harms* 6-11

### **Langzeitüberwachung von Erdbebenzonen durch den Einsatz von Bohrlochseismometern**

*Marco Bohnhoff, Christina Raub, Fatih Bulut, Bernhard Prevedel, Georg Dresen, Peter E. Malin* 14-21

### **In Teufels Küche – Bohrungen ins Innere von Vulkanen**

*Thomas Wiersberg, Samuel Niedermann, Martin Zimmer* 22-29

### **Hydraulische Stimulationskonzepte zur Entwicklung von Enhanced Geothermal Systems (EGS)**

*Günter Zimmermann, Guido Blöcher, Andreas Reinicke, Fiorenza Deon, Simona Regenspurg, Jeoung Seok Yoon, Arno Zang, Oliver Heidbach, Inga Moeck, Ernst Huenges* 30-35

### **Überwachung der Bohrungsintegrität – Voraussetzung für die sichere und effiziente Nutzung geothermischer Energie**

*Thomas Reinsch und Jan Henniges* 36-41

### **Intelligente Bohrungen zur Exploration, Standort- charakterisierung und Speicherüberwachung**

*Axel Liebscher, Jan Henniges, Stefan Lüth, Sonja Martens, Fabian Möller, Bernhard Prevedel, Cornelia Schmidt-Hattenberger* 42-47

### **Mit großem Bohrer auf der Jagd nach den kleinsten Lebewesen – wissenschaftliches Bohren für geomikrobiologische Forschung**

*Jens Kallmeyer* 48-53

### **Probengewinnung in Lockersedimenten**

*Ulrich Harms, Jens Mingram, Brian Brademann* 54-59

### **Untertageexploration – Instrumente und Methodenentwicklung**

*Rüdiger Giese und Jochem Kück* 60-65

### **InnovaRig – ein wissenschaftliches Labor für die Tiefbohrtechnik**

*Bernhard Prevedel* 66-69

