

GFZ

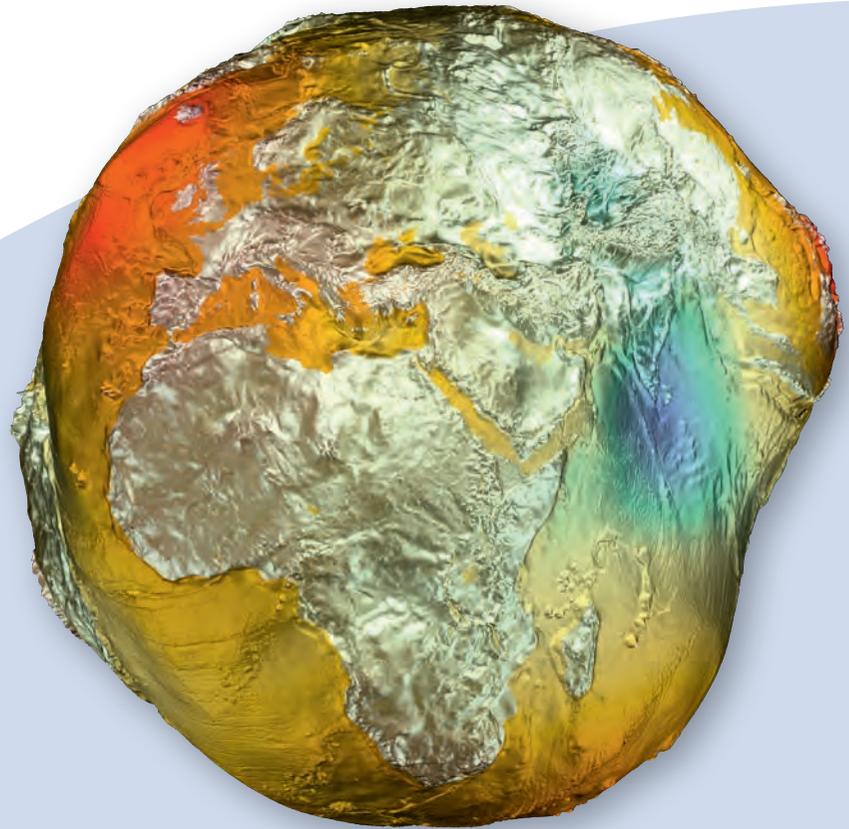
Helmholtz-Zentrum
POTS DAM

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM

**DEUTSCHES
GEOFORSCHUNGSZENTRUM**

Vom All bis zum Erdkern

Die Welt des GFZ



GFZ

Helmholtz-Zentrum
POTS DAM

Auf einen Blick

Name	Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Zugehörigkeit	Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V.
Träger	Bundesministerium für Bildung und Forschung (90 %); Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Brandenburg (10 %)
Beschäftigte	etwa 1115, davon 453 Wissenschaftler und 173 Doktoranden (Dezember 2012)
Gemeinsame Berufungen	9 mit der Universität Potsdam 6 mit der Freien Universität Berlin 1 mit der Humboldt Universität Berlin 4 mit der Technischen Universität Berlin 1 mit der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
Jahresetat	47,9 Mio. € Grundfinanzierung · 41,2 Mio. € Drittmittel und sonstige Einnahmen (2011)
Wissenschaftliche Infrastruktur	Gerätepool Geodäsie, Satelliten-Laserteleskop, Gerätepool Geophysik, Plate Boundary Observatories Chile und Türkei, Global Change Observatories Südliches Afrika und Zentralasien, Geomagnetische Observatorien Niemegek und 12 Kooperationen weltweit, KTB-Tiefenobservatorium Windisch Eschenbach, Tiefbohranlage InnovaRig, Reinstluftlabore für Isotopen-Geochemie, Laboratorien für chemische Analytik, Hochdruck/Hochtemperatur-Experimentieranlagen, Raster- und Transmissions-Elektronenmikroskopie, Hochleistungsrechner

Herzlich Willkommen

auf dem Potsdamer Telegrafenberg, der seit mehr als 130 Jahren wichtige Forschungseinrichtungen der Astrophysik und der Geowissenschaften beherbergt. Von der wissenschaftlichen Geodäsie über die Erdbebenkunde bis zur Erforschung des Magnetfeldes – die Wurzeln vieler erdwissenschaftlicher Disziplinen liegen hier. Dieser traditionsreiche, weltweit renommierte Wissenschaftsstandort bot deshalb nach der deutschen Wiedervereinigung die einmalige Chance, ein neues großes Forschungszentrum für die Geowissenschaften zu etablieren und die in Ost und West gewonnenen Erfahrungen und Kenntnisse in ein zukunftsweisendes Konzept zur Erforschung unseres Planeten einzubinden. Am 1. Januar 1992 wurde das Deutsche GeoForschungszentrum GFZ als nationale Forschungseinrichtung für die Geowissenschaften gegründet. Mit dieser Broschüre wollen wir über die Aktivitäten im GeoForschungszentrum berichten und laden Sie zu einem Streifzug ein, der die vielfältigen Facetten unserer Arbeit zeigt.



R. Hüttl

S. Schwartze

Forschungsgegenstand des GFZ ist das „System Erde“ und der Einfluss des Menschen auf den Planeten, auf dem wir leben. Wir befassen uns mit seiner Geschichte, mit seinen Eigenschaften, den in seinem Innern und an der Oberfläche ablaufenden Vorgängen sowie den Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen Geo-, Hydro-, Atmo- und Biosphäre. Ziel unserer Arbeit ist es, die zahlreichen, komplexen Prozesse zu verstehen und damit die Grundlagen für ein wirksames Geo- und Umweltmanagement zu legen. Auf diese Weise können wir zur Lösung aktueller Probleme von globaler Bedeutung beitragen, wie der Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen, der Vorsorge vor Naturkatastrophen und der Auswirkungen menschlicher Tätigkeit auf natürliche Kreisläufe, auf Umwelt und Klima. Erst seit wenigen Jahren sind die Geowissenschaften durch die rasante Entwicklung

in der Mess- und Computertechnik in der Lage, das Puzzle der gesammelten Daten und Informationen zu einem Gesamtbild zusammenzusetzen.

Häufig erschwert jedoch die Trennung in Einzeldisziplinen das Bemühen, das „System Erde“ als Ganzes zu verstehen. Mit der Gründung des GFZ in Potsdam wurde deshalb versucht, traditionelle Fachgrenzen zu überwinden und die zahlreichen verschiedenen geowissenschaftlichen Disziplinen in einem Forschungsverbund zusammenzufassen. So reicht das wissenschaftliche Instrumentarium von Bohrgeräten bis zu eigenen Erdbeobachtungssatelliten, von seismischen Geräten, die zu Hunderten gleichzeitig Erderschütterungen registrieren, bis zu speziellen Pressen, in denen Gesteinsproben im Labor unter Bedingungen untersucht werden, wie sie unerreichbar tief unter der Erdoberfläche herrschen.

Das GFZ ist auch eine Drehscheibe der internationalen Kommunikation und Kooperation in den Geowissenschaften. Geoforschung ist global und kennt keine Grenzen. Als aktiver Partner vertritt das GeoForschungszentrum die Bundesrepublik Deutschland in zahlreichen internationalen Programmen und Kooperationen.

Lassen Sie sich überraschen, wie vielfältig die von GFZ-Forschern angegangenen Fragestellungen sind und welch breites Spektrum an Methoden und Techniken eingesetzt wird! Naturgemäß kann hier nur eine kleine Auswahl von Projekten erwähnt werden.

Wir wünschen Ihnen viel Spaß bei der Lektüre!

Handwritten signature of Reinhard Hüttl in blue ink.

Prof. Dr. Dr. h. c. Reinhard Hüttl

Handwritten signature of Stefan Schwartze in blue ink.

Dr. Stefan Schwartze

Ein Jahrhundert Geowissenschaften auf dem Telegrafenberg

1832	Errichtung einer Optischen Telegrafenstation zwischen Berlin und Koblenz. Der Berg erhält seinen Namen.
1870	Gründung des Königlich Preußischen Geodätischen Instituts in Berlin unter der Leitung von Johann Jacob Baeyer
1889	Erste Fernaufzeichnung eines Erdbebens durch Ernst von Rebeur-Paschwitz auf dem Telegrafenberg
1890	Gründung des Magnetischen Observatoriums Potsdam
1892	Einweihung des Geodätischen Instituts auf dem Telegrafenberg
1898 - 1904	Absolutbestimmung der Erdschwere. Von 1909 bis 1971 galt der Potsdamer Schwerewert als internationale Bezugsgröße.
1930	Gründung des Magnetischen Observatoriums Niemegek
1933	Inbetriebnahme der ersten beiden Quarzuhren für den offiziellen Zeitdienst auf dem Telegrafenberg: Voraussetzung, um Schwankungen der Erdrotation beobachten zu können
1969	Zusammenfassung der Geodätischen und Geomagnetischen Institute Potsdams, des Geotektonischen Instituts Berlin und des Geodynamischen Instituts Jena zum Zentralinstitut für Physik der Erde (ZIPE) in der ehemaligen DDR
1988	Herausgabe des Erdbebenkatalogs der DDR und angrenzender Gebiete für die Jahre 823 bis 1984
1992	Gründung des GeoForschungsZentrums Potsdam (GFZ)
1995	Start des ersten GFZ-Erdbeobachtungssatelliten GFZ-1
1996	Beginn des Internationalen Kontinentalen Bohrprogramms (ICDP)
2000	Start des Geoforschungssatelliten CHAMP (<i>Challenging Mini-Satellite Payload for Geosciences and Application</i>) und Gründung des Erdmagnetischen Observatoriums Wingst (<i>WNG</i>)
2002	Start des Geo-Satellitentandems <i>GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)</i> und Gründung des <i>Zentralasiatischen Instituts für Angewandte Geowissenschaften (ZAIAG)</i> in Bischkek, Kirgistan
2005	Auftrag zum Aufbau eines Tsunami-Frühwarnsystems für Indonesien (<i>GITEWS</i>) durch das BMBF (Übergabe 2011)
2006	Aufbau der <i>Plattengrenzen- (PBO)</i> und <i>Global Change Observatorien (GCO)</i> des GFZ
2008	Umbenennung in Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ



Inhalt

Ein Jahrhundert Geowissenschaften auf dem Telegrafenberg	04
Vom All zum Erdkern: Die Welt des GFZ	06
Kartoffel statt Kugel: Die Figur der Erde	12
Satellitenmissionen zum Schwerefeld	14
Die Erde durchleuchtet: Tomographie mit seismischen Wellen	16
Fingerabdrücke aus dem Kosmos: Mit Nukliden die Erdoberfläche untersuchen	18
Erdbeben im Labor: Wie Gestein bricht	20
InnovaRig: Die neue Welt des Bohrens.....	22
Wärme aus der Tiefe: Geothermielabor Groß-Schönebeck.....	24
Jahreszeiten unter dem Mikroskop: Klimaarchive in Seen und Bäumen	26
Die Welt im Computer: Modellierung des Systems Erde	28
Vom Orbit zum Kern: Das Erdmagnetfeld im Detail.....	30
Das Leben in der Tiefe: Biosphäre im Untergrund	32
Hochdruck mit Diamanten: Der Erdmantel im Labor	34
Neue Energie: Erdgas aus Schwarzschiefern	36
Magnetotellurik: Mit elektrischem Strom die Erde durchleuchten.....	38
Warnung vor der Killerwelle: Tsunami-Forschung.....	40
Klimaschutz tief in der Erde: CO ₂ -Speicherung unter Tage.....	42
Brennendes Eis: Die Erforschung der Gashydrate	44

Vom All zum Erdkern: Die Welt des GFZ

Unsere Erde steckt noch immer voller Geheimnisse. So entzieht sich das Innenleben des Planeten, beispielsweise das äußerst langsame Fließen von Gestein in Erdkern und Erdmantel, der direkten Beobachtung. An der Erdoberfläche wirken so viele Kräfte gleichzeitig – von Wind und Wetter, über Pflanzenbewuchs und Gebirgsbildung bis zu jenen Veränderungen, mit denen der Mensch seine Umwelt gestaltet – dass wir noch längst nicht alle Zusammenhänge entdeckt, geschweige denn verstanden hätten. Und auch an der Grenze zwischen Erdatmosphäre und Weltraum, dort wo das irdische Magnetfeld von den energiereichen Teilchen aus dem tiefen Kosmos und der Sonne bombardiert wird, gibt es noch viel zu erforschen. Gleichzeitig gilt es, die Ursachen von Naturkatastrophen und des Klimawandels zu verstehen, ihre jeweiligen Folgen zu mindern und Strategien zur Anpassung zu entwerfen. Die Lagerstätten lebenswichtiger Rohstoffe, wie Erze, Erdöl und Trinkwasser, wollen verstanden und ihre nachhaltige Nutzbarkeit analysiert werden. Für jene Wissenschaftler, die sich mit der Erforschung der Erde beschäftigen, stellen die in unserem Planeten steckenden Geheimnisse, die von ihm ausgehenden Gefahren und seine Nutzungspotenziale eine große Herausforderung dar. Am Deutschen Geoforschungszentrum GFZ in Potsdam hat man sich dem gestellt und widmet sich als einzige Großforschungseinrichtung in Deutschland ausschließlich der Untersuchung und Erforschung des Systems Erde in all seinen Details und Facetten.

Eingebettet in die „Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren“ wird das GFZ gemeinsam vom Bund und dem Land Brandenburg finanziert. Im Anschluss an

die Wiedervereinigung im Jahre 1992 gegründet, knüpft das GFZ an eine wissenschaftlich bedeutende Tradition auf dem Potsdamer Telegrafenberg an.

Hier liegt nämlich mit dem 1892 errichteten Geodätischen Institut die Wiege der wissenschaftlichen Geodäsie, hier steckt auch eine der Wurzeln der Seismologie als geophysikalische Disziplin zur Erkundung des Erdinneren mithilfe von Erdbeben, und hier wurde – im Magnetischen Observatorium – mit einer systematischen Erforschung des Erdmagnetfeldes und seiner Veränderlichkeit begonnen.

*Vor dem Haupteingang:
das Säulenforum mit
seinen Gesteinen von allen
Kontinenten symbolisiert
die weltweiten Aktivitäten
des GFZ.*





*Messung der Asche-
partikel am Karymsky-Vulkan,
Kamtschatka. Die Ballons
werden wie Drachen über den
Schlotbereich gesteuert; die
Messsonde hängt an einem
dünnen Stahlseil unter dem
Ballondrachen.*

Seit seiner Gründung pflegen die Mitarbeiter des GFZ enge Kontakte zu Forschern an Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen weltweit. Wissenschaftler aus Potsdam sind federführend an zahlreichen internationalen Projekten beteiligt und ständig ist eine große Zahl ausländischer Forscher am GFZ zu Gast.

Die Erde verstehen lernen – das bedeutet, noch viele Rätsel zu lösen. Unter einer dünnen Kruste liegt der mächtige Erdmantel aus schwererem Gestein, der den Kern aus

feurigem Eisen – außen glutflüssig und innen fest – umschließt. Die Erde, wegen ihrer schalenförmigen Struktur oft mit einer Zwiebel verglichen, ist eine Wärmemaschine, die ihre Energie vornehmlich aus zwei Quellen bezieht. Ein Teil der in der Erde steckenden Wärme entsteht beim Zerfall radioaktiver Elemente im Erdinnern. Die Erde hat aber auch noch enorme Mengen an Ur-Wärme aus ihrer Entstehungszeit gespeichert. Die im Innern der Erde vorhandene Wärme wird nach außen abgeleitet.

Die Entdeckung, dass die äußere Hülle unseres Planeten aus einem Mosaik von Lithosphärenplatten besteht, die mit einer Geschwindigkeit von einigen Zentimetern pro Jahr um die Erde treiben, hat die Geowissenschaften gründlich verändert. Die Platten wachsen in den Scheitelgräben der Mittelozeanischen Rücken. Tiefseegräben markieren dagegen Zonen, in denen eine Platte mit einer anderen kollidiert, wobei eine der Platten schräg abwärts in den tieferen Mantel gleitet. Die meisten Gebirge sind bei Kollisionen noch aktiver oder ehemaliger Plattenränder entstanden. Wo Platten aufeinander treffen oder sich gegeneinander verschieben, kommt es immer wieder zu schweren Erdbeben.

Angetrieben wird dieser Prozess der Plattentektonik durch den Wärmetransport aus dem Innern der Erde an die Erdoberfläche. Die Gesteine des Erdmantels sind generell schlechte Wärmeleiter, aber die Erde nutzt den physikalischen Vorgang der Konvektion, um die Wärme aus dem Erdinnern nach oben zu transportieren. An manchen Stellen der Kern-Mantel-Grenze in etwa 2900 Kilometern Tiefe wird das plastische Gestein des Erdmantels stärker erwärmt als anderswo. Es wird dadurch leichter als das darüberliegende Gestein und steigt deshalb nach oben. Etwa 200 Kilometer unter der Erdoberfläche hat der Druck soweit abgenommen, dass manche Minerale des Mantelgesteins zu schmelzen beginnen. Dieser basaltische Glutfluß steigt dann weiter auf, wobei er den überwiegenden Rest des Mantelgesteins zur Seite drängt, der dann



Der Campus auf dem Telegrafenberg zu Potsdam hat eine über 130 Jahre dauernde Tradition als Wissenschaftsstandort. Hier ist die Wiege der modernen wissenschaftlichen Geodäsie und hier wurde die weltweit erste Fernaufzeichnung eines Erdbebens vorgenommen.

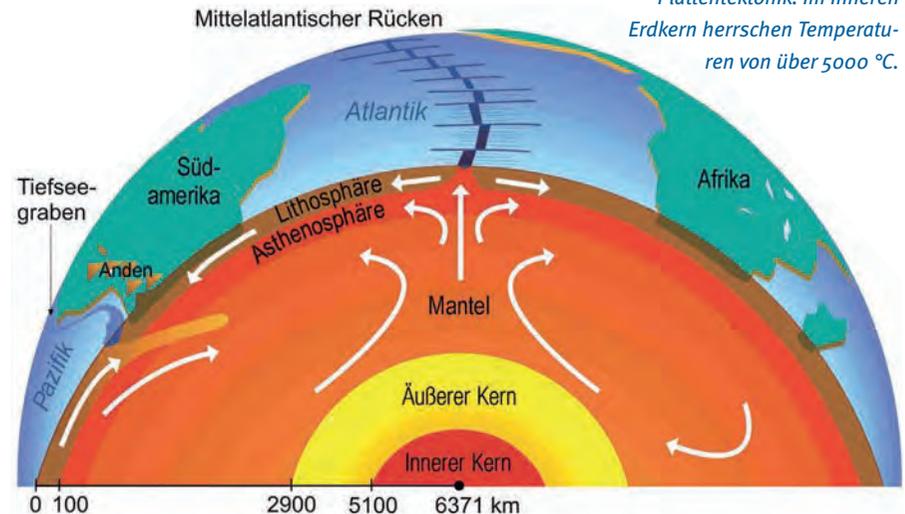


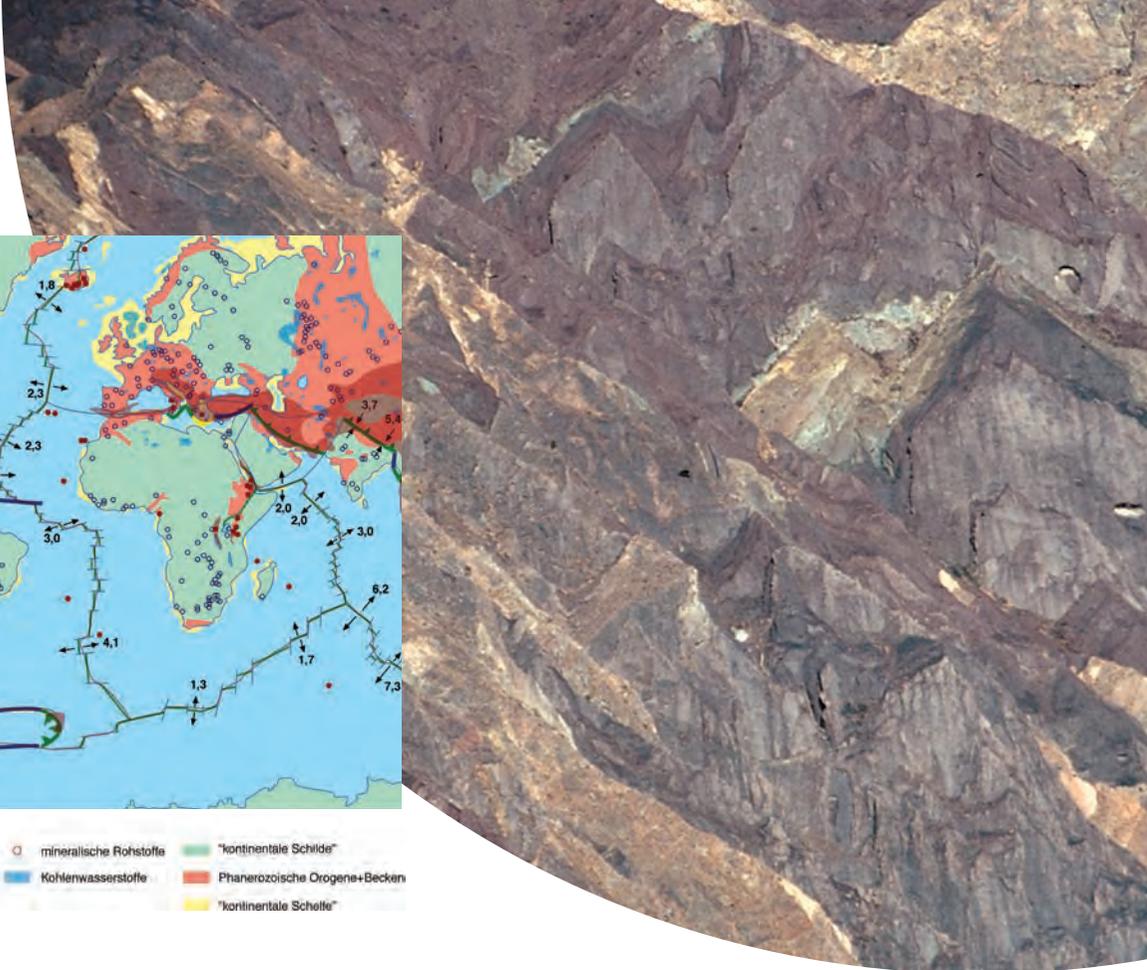
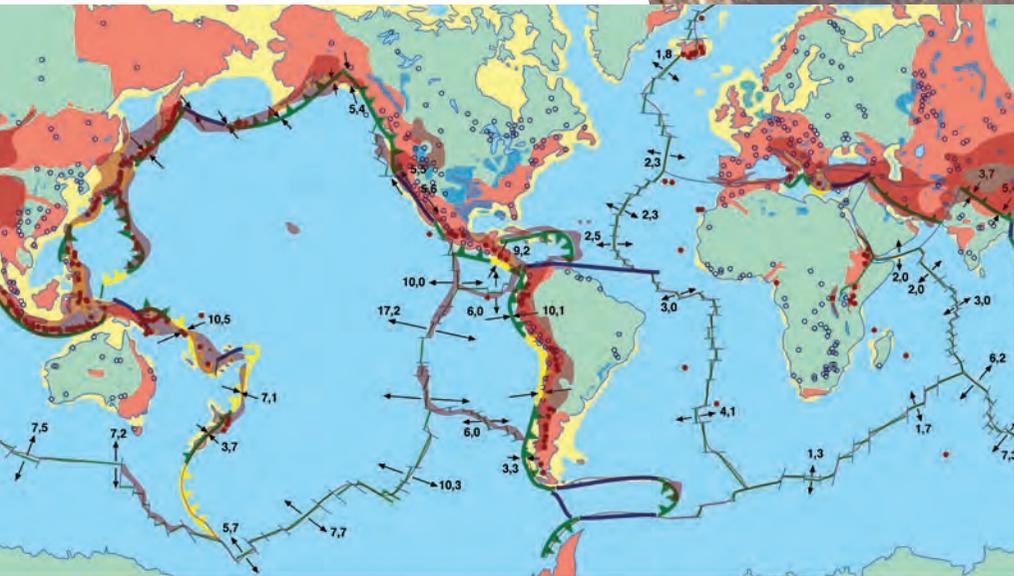
Das den Forschern am GFZ zur Verfügung stehende geowissenschaftliche Instrumentarium reicht von eigenen Erdsatelliten und selbst entwickelten Messsystemen zur immer präziseren Erfassung des Erdschwere- und des Erdmagnetfeldes aus dem Weltraum bis hin zu Laborexperimenten unter Bedingungen, wie sie im Erdinnern herrschen. Dazu gehören auch Forschungsbohrungen und verschiedene Verfahren der geophysikalischen Tiefenerkundung, etwa der „Durchleuchtung“ der Erde mithilfe natürlicher oder künstlich ausgelöster Erdbebenwellen ebenso wie mathematische Modellierungen von Geoprozessen. Zusammen mit der Geoinformatik sind sie ein Werkzeug, das den Forschern beim Verstehen der Vorgänge in der Erde hilft. Für Expeditionen und globale Messkampagnen hat das GFZ geodätische, geophysikalische und geologische Gerätepools eingerichtet. Ein Ingenieurteam kann, wenn es nötig ist, geowissenschaftliche Geräte weiter- oder auch neu entwickeln.

Pegelstation des Tsunami-Frühwarnsystems vor Indonesien im Indischen Ozean

findliche Haut der Erde. Es ist aber nicht nur das komplexe Miteinander der zahlreichen Vorgänge in und auf der Erde, welches die Geowissenschaften grundlegend von anderen Zweigen der Naturwissenschaften unterscheidet. Wollen Forscher die Erde verstehen, müssen sie sich nämlich auch mit einer riesigen Spannweite in Raum und Zeit bewegen. So reichen die Themen und das Spektrum der Forschung am GFZ vom Erdkern bis ins Weltall, vom mikroskopisch kleinen Kristall und dessen atomaren Strukturen bis zum gesamten Erdkörper, von den Jahrtausenden der Erdgeschichte bis zu den Bruchteilen von Sekunden, in denen Gestein bei einem Erdbeben bricht. Diese große Vielfalt der Forschung und die bunte Themenpalette verlangen nach einem breiten Spektrum an Methoden und Techniken, mit denen die Forscher arbeiten.

Wärmemaschine Erde: die Hitze im Erdkern und Erdmantel ist der Motor für die Plattentektonik. Im inneren Erdkern herrschen Temperaturen von über 5000 °C.





Die Auffaltung der Anden als Resultat der Kollision von Nazca-Platte und Südamerika

Die Karte zeigt den Zusammenhang zwischen tektonischen Strukturen, Erdbeben, Vulkanismus und Lagerstätten. Man sieht unmittelbar, dass der von Menschen genutzte Raum an vielen Stellen durch Naturgefahren bedroht ist.

Ein großes Zukunftspotential sehen GFZ-Forscher im Bau preisgünstiger Kleinsatelliten und hochauflösender Sensoren für langfristige Messungen und Aufgaben der Umweltüberwachung aus dem Weltraum. In einem anderen Schwerpunkt der Gerätetechnik gilt es, die rasante Entwicklung in der Mess- und der Kommunikationstechnik zu nutzen, um Daten von Messstationen zur sofortigen Auswertung an eine Zentrale zu übertragen und daraus abgeleitete Signale umgehend zu verbreiten. Solche „Echtzeit-Systeme“ sind für die Überwachung von Erdbebenzonen und Vulkanen unerlässlich, sind die Voraussetzung für die Einrichtung von Warnsystemen, mit denen nicht nur die gefährdete Bevölkerung alarmiert werden kann, sondern die auch in der Lage sind, Industrieanlagen automatisch abzuschalten und Verkehrswege zu sperren.

Die Komplexität der Forschungsprobleme erfordert bei interdisziplinärer Zusammenarbeit neue Organisationsformen. Das GFZ als Potsdamer Helmholtz-Zentrum ist daher nicht nach Fachgebieten, sondern in fünf Departments gegliedert, in denen jeweils Wissenschaftler unterschiedlicher Fachgebiete zusammenarbeiten. Jedes Department umfasst bis zu einem halben Dutzend Sektionen mit jeweils einer Reihe von Projekten. Zusätzlich werden in vier Zentren geowissenschaftliche Erfahrungen auf einem besonderen Gebiet, beispielsweise die Erschließung geothermischer Energie oder die Frühwarnung vor Naturkatastrophen, praktisch umgesetzt. Einige der wissenschaftlichen Forschungsprojekte werden auf den folgenden Seiten vorgestellt.

Kartoffel statt Kugel: Die Figur der Erde

Die Erde hat nicht die Gestalt einer idealen Kugel, wie wir sie auf einem Globus sehen. Nicht nur die Kontinente haben unterschiedliche Höhen. Auch der Meeresspiegel ist nicht überall gleich weit vom Erdmittelpunkt entfernt. Er hat vielmehr ausgedehnte Buckel und Dellen. Zu den Aufgaben des GFZ gehört es, diese unregelmäßige Form unseres Planeten möglichst genau zu bestimmen.

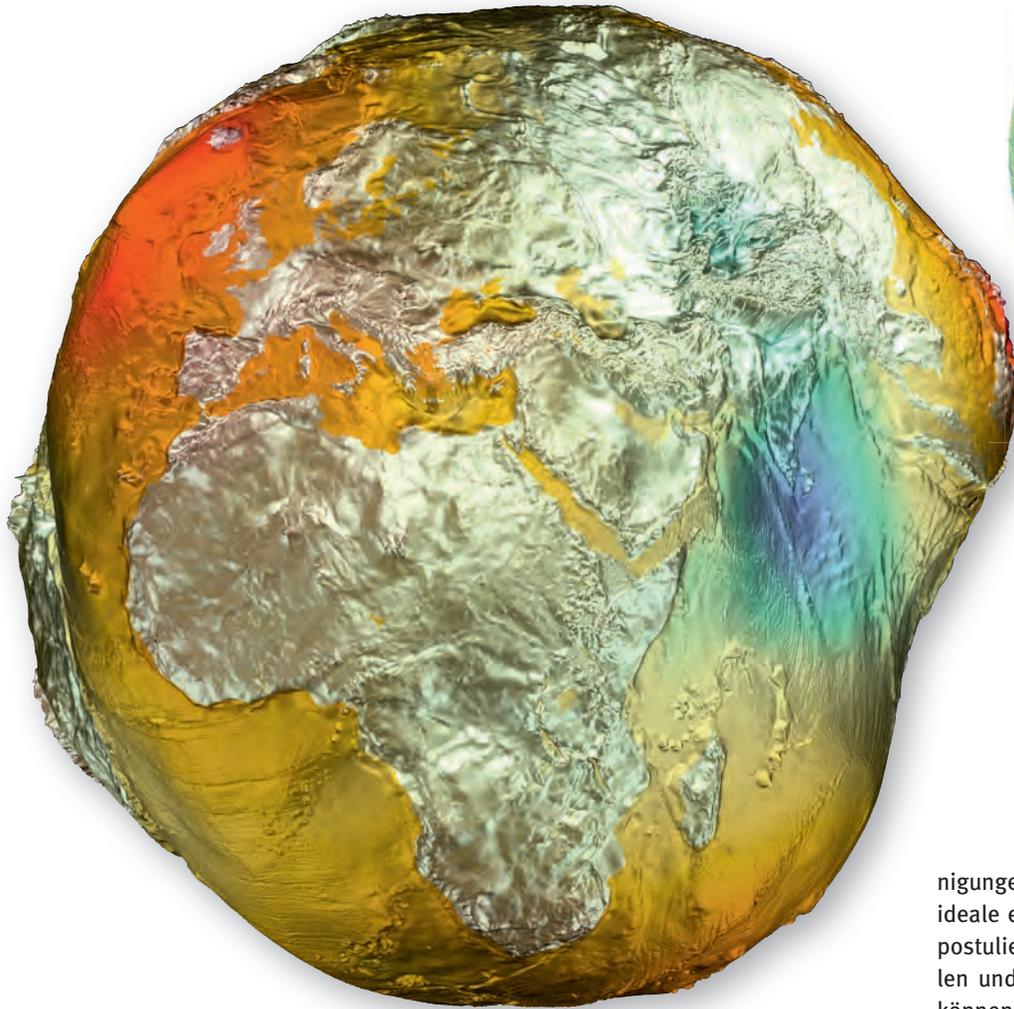
Schon Isaac Newton hat berechnet, dass die rotierende Erde wegen der Fliehkraft am Äquator dicker sein müsse als in höheren Breiten. Tatsächlich beträgt ihr Durchmesser von Pol zu Pol etwa 42 Kilometer weniger als in der Ebene des Äquators. Danach wäre sie also keine Kugel, sondern ein Ellipsoid. Doch auch das ist sie nur genähert, denn der Meeresspiegel liegt bis zu 110 Meter unter und bis zu 85 Meter über diesem angenäherten Ellipsoid. Die

Ursache dafür ist das inhomogene Innenleben der Erde: Dicke Lagen von Sedimentgesteinen wechseln sich mit großen Granitblöcken ab. Die Wurzeln der Hochgebirge reichen tief in das Innere, während die Erdkruste unter den Ozeanen recht dünn ist. Auch Dichteveränderungen in Erdmantel und Erdkern beeinflussen das Gravitationsfeld und damit die Gestalt der Erde. Experten beschreiben deshalb die Figur der Erde als „Geoid“. Dessen Oberfläche fällt auf den Meeren mit der in vollkommener Ruhe gedachten Wasseroberfläche zusammen. Auf den Kontinenten liegt das Geoid unter der Erdoberfläche und wird als fiktiver Meeresspiegel betrachtet, der aus Schweremessungen abgeleitet ist.

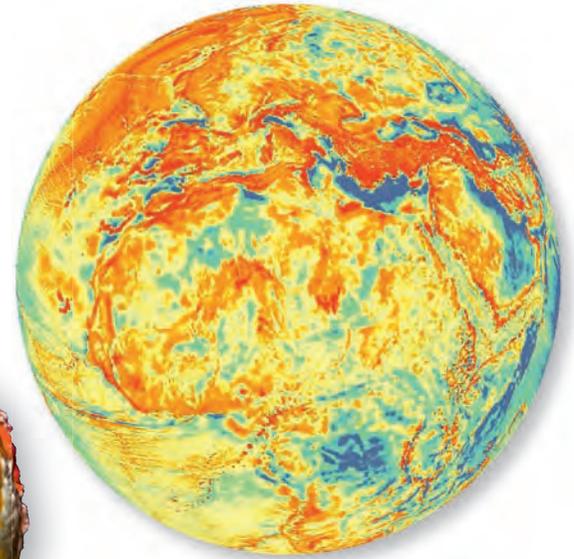
Die möglichst genaue Kenntnis des Geoids ist nicht nur für praktische Anwendungen im Vermessungswesen, in der

Die Satellitenempfangsstation des GFZ in Ny Ålesund auf Spitzbergen kann die Daten von Satelliten mit polarem Orbit, wie GRACE, bei jedem Überflug empfangen.





Navigation und in der Raumfahrt wichtig. Auch kommen viele Zweige der modernen Geowissenschaften heute ohne dieses Wissen nicht mehr aus. Aber kann das Geoid überhaupt mit hoher Genauigkeit vermessen werden? Ebenso wie die ungleichmäßige Verteilung dichter Gesteine im Erdinnern die Form des Geoids bestimmt, spüren auch Satelliten diese Variationen als kleine Störbeschleunigungen.



Die Geoid-Darstellung des GFZ zeigt das ungleichmäßige Schwerefeld unseres Planeten um das 13 000fache überhöht dargestellt. Südlich von Indien bildet die Meeresoberfläche ein 110 Meter tiefes Tal, nördlich von Papua-Neuguinea einen 85 Meter hohen Hügel. Das kleine Bild zeigt die Schwerefeldanomalien, wie sie durch die GRACE-Satelliten gemessen wurden.

Damit hat die Bahn eines Erdtrabanten nicht die ideale elliptische Form, wie sie die Keplerschen Gesetze postulieren. Vielmehr haben die Satellitenbahnen Beulen und Dellen, die wir auf verschiedene Arten messen können. Zum einen senden wir dazu Laserblitze von Bodenstationen auf spezielle Reflektoren an der Außenseite eines Satelliten. Aus der Laufzeit des am Satelliten reflektierten Strahls können wir die Höhe des Satelliten sehr genau berechnen und daraus die Form der Bahnkurve ableiten. Beim zweiten Verfahren benutzen wir präzise GPS-Empfänger auf den Satelliten, die Positionen viel genauer als herkömmliche Navigationsgeräte im Auto kontinuierlich berechnen.

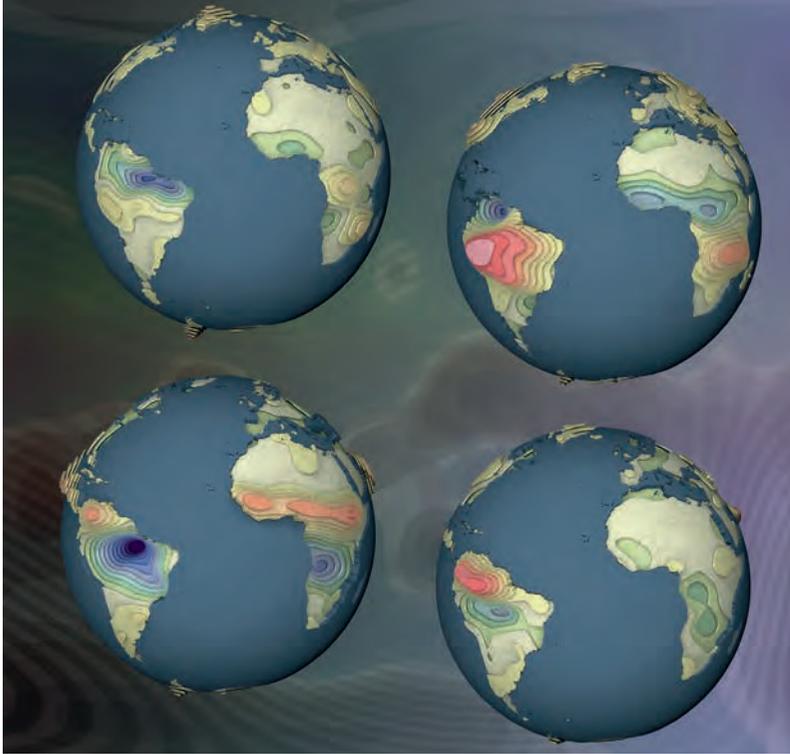
Satellitenmissionen zum Schwerefeld

Die Untersuchung des Geoids und dessen Bezug zum Schwerefeld hat auf dem Potsdamer Telegrafenberg schon eine lange Tradition. Hier wurde im Jahre 1892 das Geodätische Institut gegründet, die Wiege der wissenschaftlichen Geodäsie. Jahrzehntlang war die hier gemessene Schwerkraft der Bezugswert der weltweiten Schwerefeldbestimmung. Aber auch bei der präzisen Bahnvermessung und der daraus abgeleiteten Berechnung der Figur der Erde waren Potsdamer Geoforscher Pioniere. So setzten Astronauten im Jahre 1995 den fußballgroßen Kleinsatelliten GFZ-1 aus, der bei uns entwickelt worden war. Seine Hülle war

mit einigen Dutzend Laserreflektoren bestückt. Nach vier Jahren sehr erfolgreicher Mission verglühte dieser Minisatellit wie eine Sternschnuppe. Seine Aufgabe übernahm der GFZ-Satellit CHAMP, der vom Jahr 2000 an zehn Jahre lang Schweredaten mit weitaus höherer Präzision als GFZ-1 lieferte. Im Jahre 2002 starteten die Zwillingssatelliten des deutsch-amerikanischen Projekts GRACE. Sie fliegen als Tandem in etwa 470 Kilometer Höhe und mit rund 220 Kilometer Abstand hintereinander her. Mit äußerster Genauigkeit wird auch die kleinste Abstandsänderung zwischen den beiden baugleichen Satelliten gemessen,



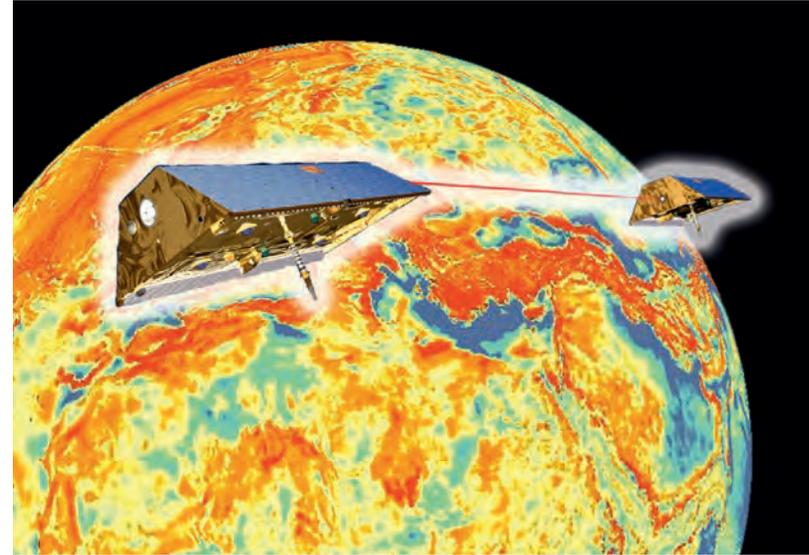
Der Geoforschungssatellit CHAMP maß vom Juli 2000 bis zum September 2010 das Erdschwerefeld, das Erdmagnetfeld und die Atmosphäre. Mit Laserteleskopen kann die Position eines Satelliten beim Überflug über die Station hochpräzise bestimmt werden.



Das Satellitentandem GRACE kann auf ungleichmäßiger Massenverteilung beruhende Schwereunterschiede hochpräzise erfassen. So stellt sich die jahreszeitliche Änderung der kontinentalen Wasserspeicherung als veränderliches Signal des Erdschwerefeldes dar (im Januar, April, Juli und Oktober 2008, im Uhrzeigersinn, beginnend oben links).

woraus wir wiederum Bahnveränderungen exakt berechnen und daraus die Feinstruktur des Erdschwerefeldes bestimmen. Aus den monatlichen Wiederholungsmessungen können wir damit sogar jahreszeitliche Schwankungen im Grundwasserspiegel messen und klimatisch bedingte Veränderungen der Eismassen auf Grönland und der Antarktis beobachten.

Seit März 2009 wird die Präzision der GRACE-Zwillinge sogar noch übertroffen. Mit dem Start von GOCE, dem „Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer“, erreicht die Genauigkeit bei der Vermessung des Geoids eine neue Dimension. An Bord befindet sich ein sogenanntes Satellitengradiometer zur präzisen Messung selbst der kleinsten Schwerkräftschwankungen. Es ist das erste Mal, dass ein solches Messinstrument im erdnahen Weltraum eingesetzt wird. Es tastet damit die Schwerkraft der Erde mit einer räumlichen Auflösung von etwa 100 Kilometer ab und liefert damit wesentlich



genauere Schweredaten und kleinere Strukturen als alle bisherigen Satellitenmissionen.

Eines der wichtigsten wissenschaftlichen Anwendungsgebiete der GOCE-Mission ist die Untersuchung der globalen Meeresströmungen. Denn sie verursachen die eingangs erwähnten Abweichungen der Meeresspiegellhöhe von der Gleichgewichtsform des Erdschwerefeldes. Die Kenntnis dieser Meerestopographie erlaubt Rückschlüsse auf die Ozeanzirkulationen, deren Veränderungen ihrerseits mit Klimaänderungen verknüpft sein können.

Stellt man schließlich alle Informationen darüber zusammen, wie das Geoid von der Gestalt einer idealen Kugel abweicht, erhalten wir ein realistisches Bild der Figur der Erde. Sie ist ein mit Buckeln und Kuhlen übersäter Körper mit unregelmäßiger Oberfläche – kurzum, die Gestalt der Erde gleicht eher einer Kartoffel.

Die Erde durchleuchtet: Tomographie mit seismischen Wellen

Geowissenschaftler, die das tiefe Innere der Erde erforschen wollen, stehen vor einem Dilemma. Eine „Reise zum Mittelpunkt der Erde“, wie sie der Science-Fiction-Autor Jules Verne so eloquent beschrieb, ist nämlich vollkommen unrealistisch. Anstatt innerhalb der Erde unmittelbar vor Ort beobachten und messen zu können, sind die Forscher vielmehr auf Informationen aus „zweiter Hand“ angewiesen. So lassen sich beispielsweise die Aufzeichnungen von Erdbebenwellen dazu nutzen, etwas über den Zustand des Erdinnern zu erfahren. Seismische Wellen enthalten nämlich Informationen über die Dichte und die Temperatur der Gesteine tief unter unseren Füßen.

Das konnte der Astronom Ernst von Rebeur-Paschwitz noch nicht wissen, als er am 17. April 1889 in seinen Aufzeichnungen



Ernst von Rebeur-Paschwitz, dem 1889 in Potsdam die weltweit erste Fernaufzeichnung eines Erdbebens gelang

gen der Erdgezeiten in Potsdam ein ungewöhnliches Signal entdeckte. Anstatt ruhig im zwölfstündigen Rhythmus der Tiden zu schwingen, zitterte die Nadel seines Messgerätes drei Stunden lang heftig. Die Ursache: Seismische Wellen eines Erdbebens im 9000 Kilometer entfernten Japan hatten den Boden unter dem Telegrafenberg in Schwingungen versetzt. Seit dieser weltweit ersten Aufzeichnung eines Fernbebens haben Erdbebenkund-

ler gelernt, seismische Wellen wie Röntgenbilder zu lesen. Zu einem der wichtigsten Werkzeuge bei dieser Erkundung des Erdinnern ist inzwischen die seismische Tomographie geworden.

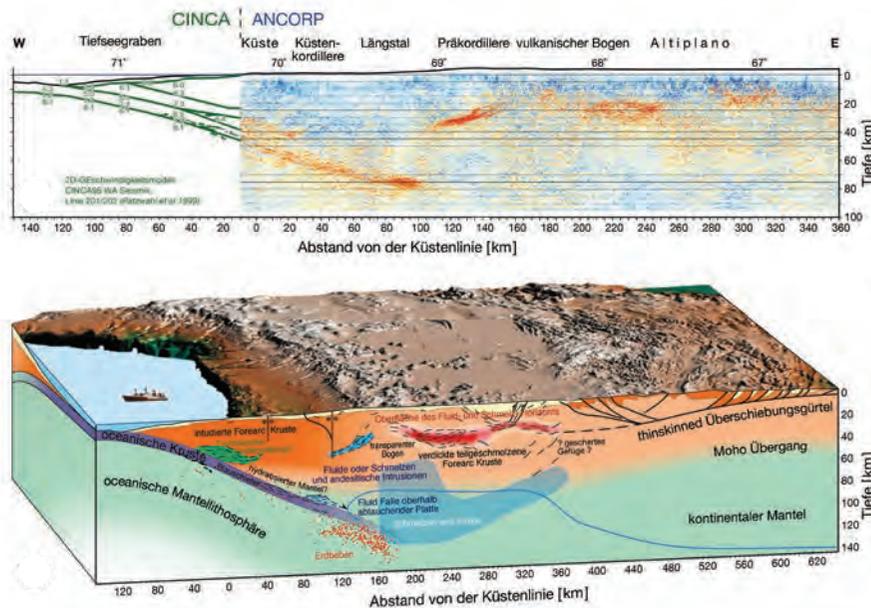
Dabei wenden die Forscher des GFZ Verfahren an, wie sie in ähnlicher Weise in der medizinischen Diagnostik eingesetzt werden. Allerdings bestehen zwischen diesen beiden Methoden erhebliche Unterschiede. Beispielsweise beruht die Tomographie mit Ultraschall darauf, dass verschiedene Gewebetypen im menschlichen Körper Schallwellen unterschiedlich stark absorbieren. In der seismischen Tomographie hingegen werden Veränderlichkeiten in der Laufzeit seismischer Wellen dargestellt. Diese Laufzeiten sind nämlich ein Maß für die Schallhärte eines Gesteins. Sie wiederum ist von der Temperatur des Gesteins abhängig. Wärmeres Gestein ist weniger schallhart als kälteres Gestein und deshalb brauchen seismische Wellen eine längere Zeit, um warme Gesteinsschichten zu durchlaufen. Durch kühleren Gesteine laufen die Wellen dagegen schneller. Weil die Unterschiede in der Geschwindigkeit aber selbst bei großen Temperaturkontrasten nur wenige Prozent betragen, sind diese Differenzen in den Aufzeichnungen einzelner Erdbebenstationen nur schwer zu messen. Sie treten jedoch deutlich zu Tage, wenn die Registrierungen von vielen Erdbeben mit Hunderten von Seismometern ausgewertet werden.

Aus diesem Grunde sind tomographische Sondierungen, die den gesamten Erdmantel umfassen, erst möglich geworden, nachdem seismologische Stationen mehr oder weniger gleichmäßig verteilt auf allen Kontinenten aufgestellt wurden. Dazu trägt auch GEOFON bei, ein vom GFZ

eingerrichtetes weltweites Netz von Erdbebenstationen, die ihre Messungen direkt und unmittelbar nach Potsdam übertragen. Es ist Teil jenes internationalen Systems, in dem Forscher vieler Länder ihre seismischen Messdaten in Echtzeit austauschen. Damit lässt sich die Stärke eines Erdbebens und die genaue Lage seines Herdes innerhalb weniger Minuten bestimmen. Bei der Speicherung dieser Aufzeichnungen ist mittlerweile aber auch eine umfangreiche Datenbank entstanden, die eine statistische Auswertung der Laufzeit der Erdbebenwellen durch die verschiedenen Regionen des Erdmantels zulässt.

In der Tomographie werden die gemessenen Abweichungen der Laufzeit gegenüber einem festen Modell dargestellt. Dabei stellte sich heraus, dass es beispielsweise in den Subduktionszonen unter Südamerika und unter dem malayisch-indonesischen Archipel kühler ist als im Rest des Erdmantels. Regionen warmen Gesteins gibt es dagegen unter dem Rift-Valley Afrikas sowie vor der westafrikanischen Küste unter den Vulkanen der Kanaren und der Kapverden. Auf diese Weise konnten die Geowissenschaftler erstmals realistische, dreidimensionale Weltkarten des Erdinnern zeigen. Trotz der Fülle der Messdaten reicht aber die Auflösung solcher tomographischen Karten für Detailuntersuchungen oft nicht aus. Die Seismologen des GFZ haben deshalb bekannte Verfahren verbessert und neue Methoden entwickelt, um den Seismogrammen noch mehr Informationen über das Erdinnere zu entlocken. So wird beispielsweise der Lauf aller Erdbebenwellen erheblich gestört, wenn sie innerhalb der Erde eine Schichtgrenze erreichen. Unter anderem können die Erdbebenwellen dabei ihren Charakter ändern und von einem Wellentyp in einen anderen übergehen. Aus den Seismogrammen werden derartige Konversionen abgelesen und daraus lassen sich dann wiederum die tiefen Strukturen der wandernden Kontinente erkennen. Solche Berechnungen ergaben beispielsweise, dass sich der indische Subkontinent mehrere hundert Kilometer weit nach Norden unter Tibet geschoben hat.

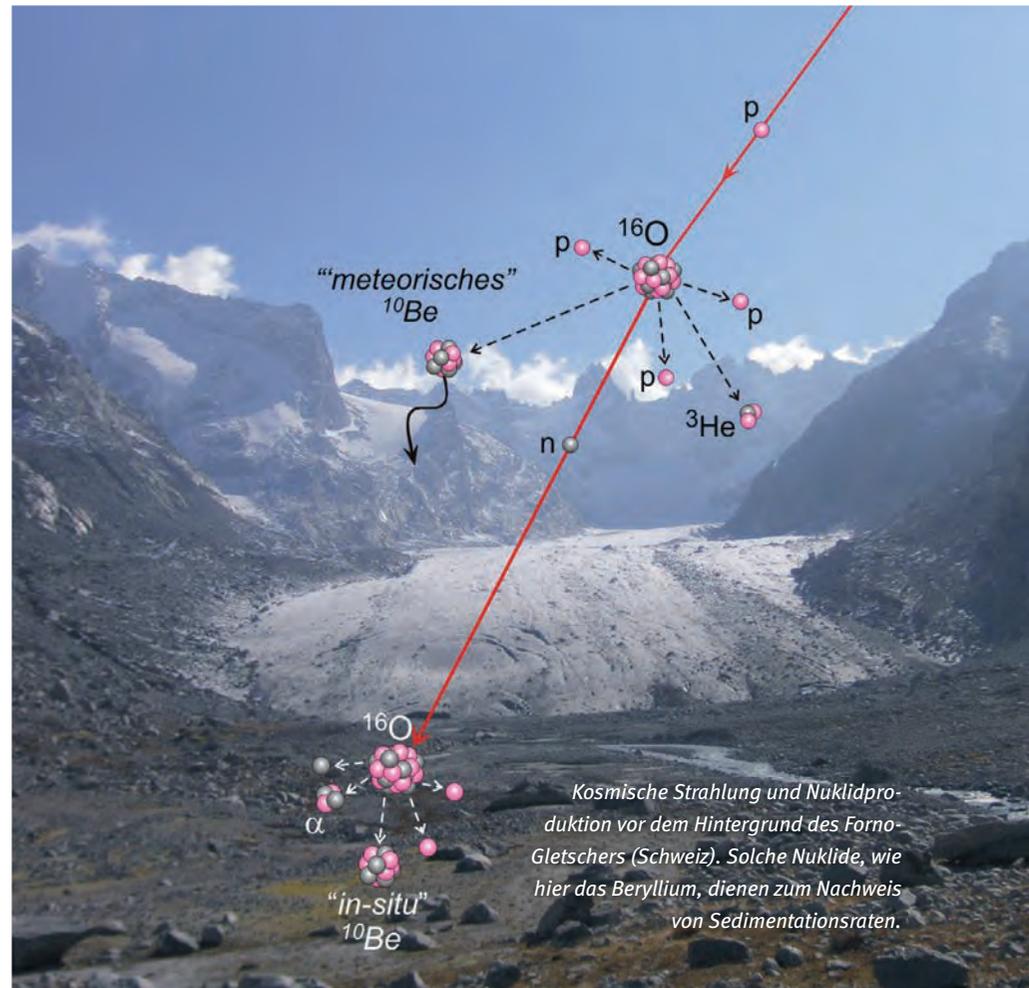
Erdbebenschäden in der Nordanatolischen Verwerfungszone. Seismologische Untersuchungen nutzen die Erdbebenverteilung in den chilenischen Anden zur Analyse des Aufbaus der Subduktionszone an der südamerikanischen Westküste.



Fingerabdrücke aus dem Kosmos: Mit Nukliden die Erdoberfläche untersuchen

Sie sind äußerst selten und schwer zu messen. Innerhalb von wenigen Millionen Jahren sind die meisten von ihnen durch Radioaktivität wieder zerfallen und deshalb dürften sie eigentlich auf dem fast fünf Milliarden Jahre alten Planet Erde gar nicht vorkommen. Aber dennoch spielen diese *kosmogenen Nuklide* inzwischen eine große Rolle bei der Erforschung der obersten Hautschicht der Erde. Sie entstehen, wenn kosmische Strahlen auf die Erdatmosphäre oder auf die Erdoberfläche treffen. Fingerabdrücken gleich sind diese extrem seltenen Isotope nämlich wichtige Indizien, aus denen Geowissenschaftler neue Erkenntnisse über die vielen Vorgänge gewinnen können, welche sich an der Erdoberfläche abspielen und die sie ohne Unterlass verändern. Forscher des GFZ sind an weltweit führender Stelle an diesen Forschungen beteiligt.

Wie kommt es, dass Teilchen, die aus den Tiefen des Kosmos stammen, uns neue Informationen über unsere unmittelbare Umgebung in den obersten Erdschichten geben können? Kosmische Strahlung besteht aus energiereichen Partikeln, die ursprünglich bei der Explosion von Sternen in unserer Milchstraße entstanden sind. In der Stratosphäre stoßen diese Protonen mit Molekülen aus der Erdatmosphäre zusammen, also mit dem Sauerstoff, dem Stickstoff oder dem Edelgas Argon. Bei diesen Kollisionen schlagen die kosmischen Teilchen kleine atomare Splitter aus den Luftmolekülen. Zurück bleiben neue, sonst in der Atmosphäre nicht vorkommende Isotope, beispielsweise das radioaktive Beryllium-10, Kohlenstoff-14 oder Chlor-36. Im Laufe der Zeit fallen diese kosmogenen Nuklide langsam auf die Erdoberfläche. Dort lagern sie sich in allen Böden,



in Pflanzen und in manchen Gesteinen ab und kommen auch im Fluss-, Grund- sowie im Meerwasser vor. Auch wenn kosmische Strahlen bis zur Erdoberfläche gelangen, erzeugen sie die seltenen Nuklide direkt im Gestein, darunter auch die Edelgasisotope Helium-3 und Neon-21. Weil der Anteil an diesen Nukliden aber äußerst gering ist, können sie nur mit modernster Messtechnik in einem

mit einem kleinen Teilchenbeschleuniger und Massenspektrometern ausgerüsteten Laboratorium erfasst werden.

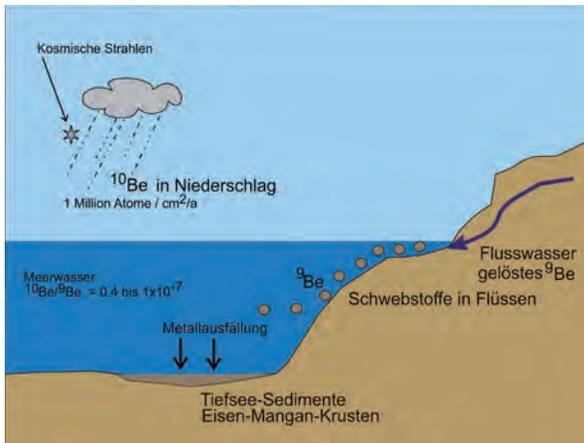
Das bekannteste dieser Nuklide ist zweifellos Kohlenstoff-14 – heutzutage ein in vielen Zweigen der Wissenschaft eingesetztes Werkzeug zur Altersbestimmung allen pflanzlichen Materials. Die Forschergruppen am GFZ konzentrieren sich aber auf andere Nuklide, vor allem Beryllium-10, Aluminium-26 oder Neon-21. So lässt sich beispielsweise aus dem Verhältnis des kosmogenen Nuklids Beryllium-10 zum stabilen Beryllium-9 das Alter von Sedimenten auf dem Ozeanboden bestimmen. Der besondere Wert dieser Datierungsmethode liegt darin, dass sie in Sedimenten angewendet werden kann, die keine datierbaren Fossilien enthalten. Aber auch das Alter chemischer

Sedimente in den Ozeanen, wie den Manganknollen, kann auf diese Weise bestimmt werden. Dabei fanden die Forscher heraus, dass diese potentiellen Industrierohstoffe nur zwischen 1 und 10 Millimeter pro Millionen Jahre wachsen. Ebenso können Forscher über die Messung der Konzentration des Nuklids Chlor-36 inzwischen das Alter von Grundwasserhorizonten bestimmen.

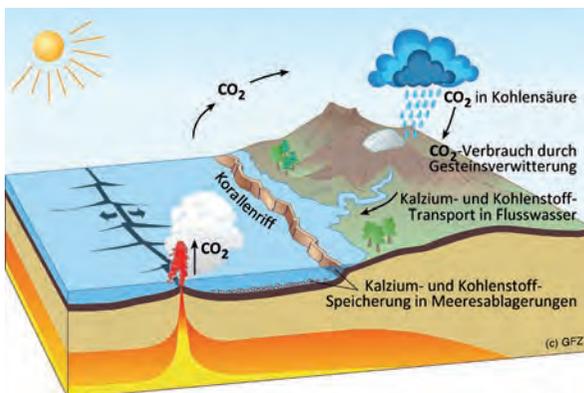
Die Bedeutung der kosmogenen Nuklide geht aber weit über die Altersbestimmung von Böden, Sedimenten oder Aquiferen hinaus. So lässt sich aus der Messung ihrer Konzentration in bestimmten Gesteinen feststellen, wann sich der eiszeitliche Eispanzer zurückzog oder wann eine Gesteinsschicht durch Erosion freigelegt wurde.

Außerdem kann man aus dem gleichzeitigen Vergleich der Konzentrationen der Nuklide in Böden und Flusssedimenten berechnen, wie hoch die Erosionsraten sind und wieviel Material unter dem Einfluss von Wind und Wetter von Bergen in Flüsse gespült wird. Treten kosmogene Nuklide in Eisbohrkernen auf, sind sie Indikatoren für die Sonnenaktivität und den Zustand des irdischen Magnetfeldes. Diese Größen beeinflussen nämlich die Intensität der auf die Erde treffenden kosmischen Strahlung.

Aus der Summe der daraus abgeleiteten Informationen kann man wiederum schließen, welche Vorgänge die Erdoberfläche veränderten und wann es dazu gekommen ist. So haben Seismologen daraus beispielsweise die Wiederkehrperioden von Erdbeben berechnet; Klimaforscher erhielten neue Anhaltspunkte über den Klimawandel bevor der Mensch ins Spiel kam; Geomorphologen können die Entstehungsgeschichte einer Landschaft mit viel größerer zeitlicher Genauigkeit als bisher erfassen. Die Untersuchung der von den kosmogenen Nukliden erzeugten geochemischen Fingerabdrücke wird auf diese Weise immer mehr zu einem universellen Werkzeug in vielen Disziplinen der Geowissenschaften.



Der globale Beryllium-Zyklus (oben) und der Kohlenstoffkreislauf



Erdbeben im Labor: Wie Gestein bricht

Erdbeben können als Naturkatastrophen eine verheerende Wirkung haben. Für Forscher sind diese schlagartigen Bewegungen der Erde allerdings faszinierende Studienobjekte extremer mechanischer Vorgänge: So rast beispielsweise die Front, entlang der das Gestein bei einem Erdbeben bricht, mit einer Geschwindigkeit von mehr als 10 000 Kilometern pro Stunde durch die Erdkruste. Geowissenschaftler am GFZ untersuchen, was sich im Einzelnen bei solchen Brüchen abspielt. Sie analysieren aber auch, unter welchen physikalischen Bedingungen Fels plastisch zu fließen beginnt, wie er also deformiert wird.

Harter Fels ist nämlich keineswegs so fest und haltbar, wie er im Alltag erscheint. Genügend großen mechanischen Kräften ausgesetzt, kann Gestein bersten oder sich ganz allmählich plastisch verformen. Diese Vorgänge sind aber an der Erdoberfläche selbst mit empfindlichen Messgeräten nur äußerst schwer zu erfassen. Die Gesteinsbrüche laufen meist sehr schnell ab. Die plastischen Verformungen in der tieferen Erdkruste und im Erdmantel erfolgen unterdessen extrem langsam. Im Labor lassen sich diese Vorgänge aber in hydraulisch oder mit Gasdruck betriebenen Pressen an Gesteinsproben unter kontrollierten Bedingungen nachvollziehen und untersuchen.

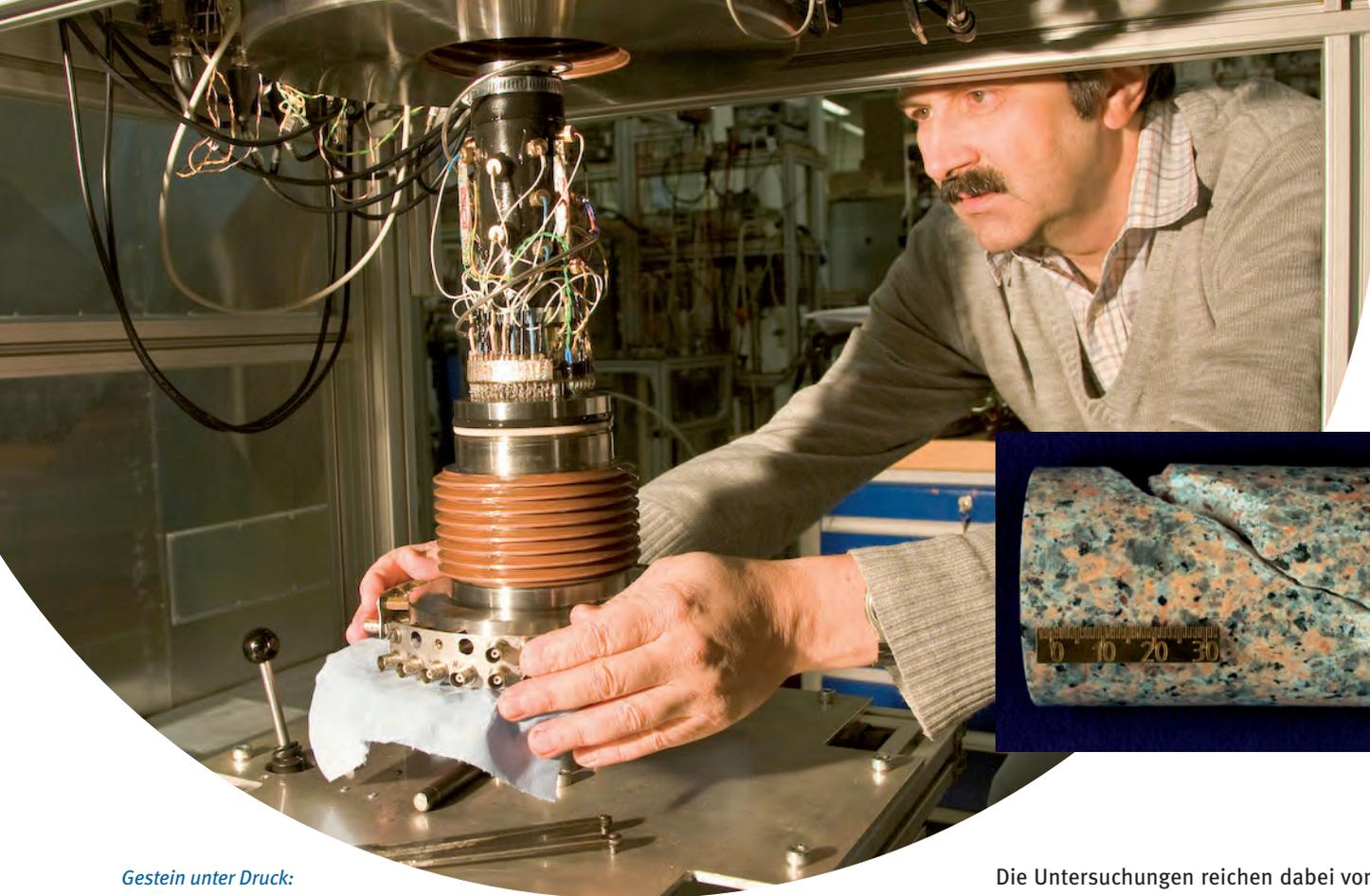
So verfügt das Gesteinslabor am GFZ über Pressen, die Gestein unter sehr hohen Druck und Temperatur setzen können. Dabei entstehen mechanische Spannungen im Gestein, denen es ab einer gewissen Stärke nachgibt. Bei niedrigen Temperaturen entstehen Sprödbrüche, derselbe Vorgang, der in der Natur für Erdbeben verantwortlich

ist. In ihren Versuchen brechen und analysieren die Forscher unter anderem auch Gesteine, die unmittelbar aus Erdbebenzonen stammen, beispielsweise einen Serpentin, der in der San Andreas-Verwerfung in Kalifornien in drei Kilometern Tiefe erbohrt wurde.

Diese hochmodernen Pressen verfügen auch über akustische Aufnehmer, die jene Mikrobrüche registrieren, mit denen das Gestein auf den immer höher werdenden Druck reagiert. Diese Geräusche entsprechen den vielen kleinen Vorbeben, die in der Natur vor einem großen Beben auftreten und mit Seismometern registriert werden. Damit sie das Knistern im Labor mit den echten Mikrobeben vergleichen können, messen die Forscher aus Potsdam auch unmittelbar in Erdbebengebieten. Sie konzentrieren sich dazu unter anderem auf die nordanatolische Verwerfung in der West-Türkei, eine der ge-



So wird Spannung im Gestein sichtbar: links die Dünnschliff-Aufnahme eines tordierten Carrara-Marmors, recht die Computertomographie-Aufnahme einer zylindrischen Quarzitprobe, in der eine Scherzone deutlich abgebildet wird.



*Gestein unter Druck:
im Druckstempel werden
Gesteinsproben bis zum
Bruch belastet. Die dabei
entstehenden akustischen
Emissionen werden von
kleinen Mikrofonen aufge-
zeichnet, die an der Probe
befestigt sind.
Die Granitprobe zeigt den
Zustand nach dem Bruch.*

fährlichsten Erdbebenzonen der Welt. Auf zwei kleinen, der Großstadt Istanbul im Marmarameer vorgelagerten Inseln haben sie ein Seismometer-Netz aufgebaut, mit dem sie selbst die kleinsten Erdbeben in dieser Gegend aufzeichnen können. Entsprechende Messgeräte am Meeresboden vervollständigen diese Messungen. Aber auch in einer der tiefsten Schachtanlagen der Welt, dem 3,5 Kilometer tiefen Goldbergwerk Mponeng in Südafrika, stehen Messgeräte des GFZ. Sie nehmen die äußerst kleinen Brüche im Gestein auf, die beim Erzabbau entstehen.

Mit diesen Messungen decken die Forscher einen großen Teil des Spektrums der möglichen Gesteinsbrüche ab.

Die Untersuchungen reichen dabei von den oft nur wenige Millimeter kleinen Brüchen in den Gesteinsproben im Labor über die Gebirgsschläge im Goldbergwerk bis hin zu den kilometerlangen Brüchen, die bei größeren Erdbeben entlang einer gefährlichen Verwerfung auftreten. Damit erforschen sie aber nicht nur Grundsätzliches über die mechanischen Eigenschaften von Gesteinen. Sie liefern auch die physikalischen Grundlagen zur Beantwortung jener geomechanischer Fragen, die bei der Erschließung des Untergrundes eine Rolle spielen, beispielsweise bei der Nutzung geothermischer Energie oder der geologischen Speicherung von Kohlendioxid. Anhand dieser Untersuchungen lassen sich auch eine Reihe von Georisiken abschätzen. Darauf aufbauend können Erdbeben zwar nicht vorhergesagt werden, aber immerhin hilft die genaue Kenntnis des Bruchablaufs und der damit verbundenen Seismizität, sich auf künftige Erdbeben vorzubereiten und damit ihre Folgen zu mindern.



InnovaRig: Die neue Welt des Bohrens

Die Dimension der Erde ist riesig. Allein ihr Radius entspricht etwa der Strecke von Berlin nach New York. Verglichen damit sind die tiefsten Bohrungen auf der Welt, darunter auch die Kontinentale Tiefbohrung in der Oberpfalz mit ihrer Teufe von mehr als neun Kilometern, lediglich Piekser in die Haut der Erde. Dennoch sind solche Tiefbohrungen für Geowissenschaftler oft die einzige Möglichkeit, ihre Hypothesen und Modellvorstellungen über das Erdinnere an der Wirklichkeit zu überprüfen – und dabei gleichzeitig neue Informationen über die Erdkruste zu Tage zu fördern. Bisher wurde für solche Untersuchungen meist auf Bohranlagen zurückgegriffen, die normalerweise für die Suche und die Erschließung von Erdöl- und Erdgaslagerstätten eingesetzt werden. Vielfach genügen diese Anlagen den Anforderungen der Forschung aber nur bedingt. Besonders das kontinuierliche Erbohren und Ziehen von festen Gesteinsproben, den sogenannten Bohrkernen, dauert mit diesen Bohrgeräten sehr lang und ist teuer. Aber gerade die Analyse solcher Kerne lässt erst Schlüsse über den tatsächlichen Zustand der Erdkruste in einigen Kilometern Tiefe zu.

Um diesem Mangel abzuhelpfen, entwickelte das GFZ in enger Zusammenarbeit mit dem Hersteller Herrenknecht-Vertikal in Schwanau und dem Betreiber H. Anger's Söhne in Hessisch Lichtenau eine eigene Tiefbohranlage mit dem Namen „InnovaRig“. Mit dieser Anlage kann bis zu 5000 Meter tief gebohrt werden und zwar nicht nur für die Forschung sondern auch für kommerzielle Zwecke. Deshalb ist InnovaRig äußerst vielseitig ausgelegt. So

*Die moderne Bohranlage
InnovaRig beim Abteufen
einer Geothermiebohrung im
voralpinen Molassebecken*



Ein Rollenmeißel am Kopf des Bohrgestänges



Der Pipe Handler entnimmt das Bohrgestänge automatisch gesteuert dem Gestänge-lager. Der „Iron Roughneck“ verschraubt das Gestänge automatisch und ersetzt daher diese gefährliche Arbeit der „Roughneck“ genannten Bohrarbeiter, ein hoher Beitrag zur Arbeitssicherheit auf der Bohrplattform.

sind mit ihr die klassische Rotary- wie auch alle modernen Bohrverfahren wie die Richtbohrtechnik oder das Casing-Drilling möglich. Sie erlaubt es aber auch, Gesteins- und Fluidproben schnell aus dem Bohrloch zu entnehmen und darin mit wissenschaftlich Geräten zu messen.

Außerdem ist sie mit einer Reihe von Messeinrichtungen ausgerüstet, wie beispielsweise automatisch arbeitenden Analytoren für den Gasgehalt der Bohrspülung. Ebenso sind Vorrichtungen zur elektronischen Erfassung und Speicherung der dabei gewonnenen Messdaten vorhanden.

Bei der Entwicklung der Bohranlage wurde besonderer Wert auf deren Umweltverträglichkeit gelegt. So fallen während des Bohrbetriebes gegenüber herkömmlichen Anlagen nur wenig Emissionen an und es werden ausschließlich biologisch abbaubare Öle und Schmierstoffe verwendet. Intensiver Schallschutz erlaubt auch das Bohren in bewohnten Gebieten. Die Anlage ist weitgehend

automatisiert, so dass die einzelnen Elemente des Bohrgestänges von „Robotern“ aufgenommen und verschraubt werden. Diese Aufgabe musste bisher die „Roughnecks“ genannten Bohrarbeitern bewältigen, die diese schmutzige und gefährliche Schwerarbeit oft bei Wind und Wetter auf der Arbeitsbühne ausführen mussten.

InnovaRig wird, neben geothermalen Bohrprojekten im europäischen In- und Ausland, auch für Bohrungen im Rahmen des „Internationalen Bohrprogramms auf den Kontinenten“ (ICDP) eingesetzt werden. Dieses Programm, zu dem sich seit dem Jahr 1996 wissenschaftliche Einrichtungen aus mittlerweile 20 Ländern zusammengeschlossen haben, wird von Fachleuten am GFZ koordiniert. Ziel des ICDP ist es, Forschungsbohrungen an Land zu fördern und zu planen. Unter anderem wurden im Rahmen dieses Programms bereits die Schlote und Ablagerungen von Vulkanen in Japan und auf Hawaii, der Chicxulub-Einschlagkrater auf der Yucatan-Halbinsel in Mexiko sowie die San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien angebohrt. Für ICDP könnte InnovaRig in der geplanten Tiefbohrung im Vulkangebiet der Phlegräischen Felder bei Neapel eingesetzt werden. Daneben sind Forschungsbohrungen zur Untersuchung der unterirdischen Speicherung von Kohlendioxid sowie zur der Erkundung der Erdwärme im Kristallin geplant. Ihre Bewährungsprobe hat die Anlage in kommerziellen Projekten der Geothermie im Raum München und im Rahmen einer Forschungsbohrung in Hannover bestanden.

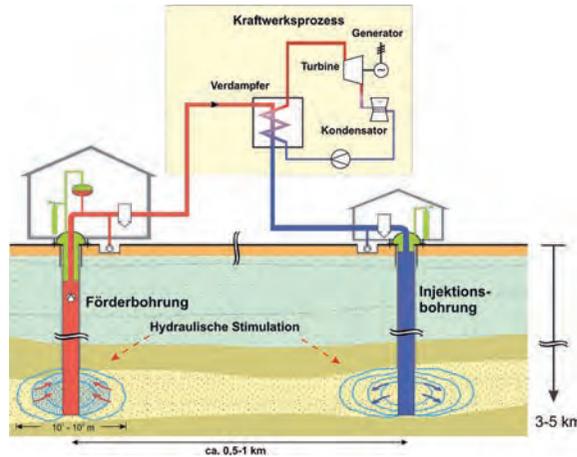
Wärme aus der Tiefe: Geothermielabor Groß Schönebeck

In den Vulkangebieten Italiens und Islands wird sie schon lange genutzt, in Mitteleuropa steckt ihre Erschließung dagegen noch in den Kinderschuhen. Dabei gibt es wohl keine andere Energieform, die derart universell ist wie die Geothermie. Denn auch weit von aktiven Vulkanen entfernt steht die Erdwärme unabhängig von Jahreszeit und Klima jederzeit an jedem Ort zur Verfügung und ist praktisch unerschöpflich. Im Gegensatz zu vielen anderen regenerativen Energieformen ist die Geothermie sowohl bei der Stromerzeugung als auch bei der Bereitstellung von Fernwärme grundlastfähig. Mit den heute vorhandenen Verfahren und Techniken sind jedoch die Investitionen und Risiken beim Bau und Betrieb einer geothermischen Anlage noch relativ hoch. Das sind also Gründe genug dafür, dass sich Forscher in verschiedenen Sektionen am GFZ intensiv mit der Erdwärme beschäftigen. Dazu steht ihnen in der brandenburgischen Ortschaft Groß Schönebeck ein weltweit einmaliges Laboratorium zur Verfügung.

Dort erschließen nämlich zwei etwa 4300 Meter tiefe Forschungsbohrungen Gesteinshorizonte, in denen sich etwa 150 Grad heißes Wasser befindet. Eine solche Temperatur ist notwendig, damit die Erdwärme effizient in elektrischen Strom umgewandelt werden kann. Das heiße Wasser muss aber auch ohne Unterbrechung fließen. Deshalb haben die GFZ-Forscher ein wenig nachgeholfen, indem sie das Reservoir stimulierten. Dazu haben sie große Mengen Wasser unter hohem Druck über die Bohrungen in den Untergrund verpresst. Bei diesem „Hydrofrac“ weiteten sich die bereits vorhandenen kleinen



Geothermische Stromerzeugung setzt zwei Bohrungen, einen nachhaltigen Thermalwasserkreislauf und ein oberflächiges Kraftwerk voraus. Über die Förderbohrung wird das Wasser aus der Tiefe gefördert und nach seiner thermischen Nutzung im Kraftwerk über die Injektionsbohrung wieder in den Speicher geleitet. Das geförderte Wasser gibt seine Wärme über einen Wärmetauscher an ein schon bei geringen Temperaturen siedendes Arbeitsmittel ab, das in einem Sekundärkreislauf den Generator zur Stromerzeugung antreibt.



Fördertest in Groß Schönebeck: heißes Wasser aus 4300 Metern Tiefe

Poren und Klüfte im Gestein zu einem weitverzweigten Rissystem auf.

Aus einer der beiden Bohrungen wird nun das heiße Grundwasser unter verschiedenen Betriebsbedingungen an die Oberfläche gefördert. In jedem dieser Fälle untersuchen die Forscher und Ingenieure dann sowohl die thermische Effizienz der Förderung als auch die Zuverlässigkeit der technischen Komponenten, vor allem der Pumpen im Bohrloch und der Wärmetauscher über Tage. Sie behalten auch den Zustand der Rohrleitungen und Ventile im Auge, denn das aus der Tiefe geförderte Wasser ist korrosiv und kann zu Schäden an den Leitungen führen. Die dabei gewonnenen Erfahrungen fließen dann in Modellrechnungen ein, mit denen der gesamte Kreislauf analysiert wird. Aus diesen auf der Welt einzigartigen

Analysen leiten die Forscher schließlich Empfehlungen für Betreiber von geothermischen Anlagen ab, nach denen sie ihren Betrieb optimieren können. Solche zeitaufwendigen Untersuchungen sind nur in einer Forschungsanlage wie Groß Schönebeck möglich.

Beim Aufbau der Forschungsplattform Groß Schönebeck wurden die grundlegenden Fragen der Erschließung und Nutzung geothermischer Reservoirs beleuchtet. Dazu gehörte, das Reservoir zu charakterisieren und speicherschonend zu erschließen. Gleichzeitig entwickeln die GFZ-Mitarbeiter Verfahren, mit denen sich die Ergiebigkeit der Lagerstätte noch weiter steigern lässt. Sie verbessern aber auch jene verfahrenstechnischen Prozesse, die an die Nutzung des Untergrundes gekoppelt sind bis hin zur effizienten Wandlung der Energie in Wärme und Strom. Im hausinternen Labor untersuchen sie schließlich, wie Wasser oder verflüssigte Gase Gesteinsporen durchströmen und welche chemischen Vorgänge sich dabei abspielen.

Das natürliche Laboratorium Groß Schönebeck ist deshalb ein wichtiges Projekt zur Entwicklung der geothermischen Energie. Neue Techniken können dort unter wirklichkeitsnahen Bedingungen erprobt und weiterentwickelt werden. Weil dort die geologischen Bedingungen für weite Teile Europas typisch sind, lassen sich die gewonnenen Ergebnisse und die entwickelten Verfahren auf andere Standorte übertragen. Geothermische Anlagen nutzen heimische Energie und setzen nahezu kein Kohlendioxid frei. Deshalb eröffnet der verstärkte Einsatz der Geothermie für die Grundlastversorgung mit Strom und Wärme neue Chancen für die Umsetzung der Klimaschutzziele in Europa.

Jahreszeiten unter dem Mikroskop: Klimaarchive in Seen und Bäumen

Wenn die meterlangen Kerne aus Schlück, die Wissenschaftler des GFZ vom Grund tiefer Seen ziehen, fein geschichtet sind, ist die Freude groß. Dann haben sie mit ihrem Stechkernsystem nämlich wieder einmal Jahresschichten durchstoßen. Jede dieser als Warven (nach dem schwedischen „varvig lera“ für geschichteter Ton) bezeichneten Sedimentschichten enthält wertvolle Informationen über die Klima- und Umweltbedingungen der Vergangenheit. Ohne solche natürlichen Archive wäre die moderne Erforschung des Klimawandels nicht möglich. Denn die erst seit 150 Jahren regelmäßig betriebenen Wetteraufzeichnungen sind nur eine Momentaufnahme der Klimageschichte. Die gesamte Spannbreite der Klimadynamik läßt sich nur dann erfassen, wenn es gelingt, weit in prähistorische Zeiten zurückreichende Klimaarchive genau auszuwerten. Dazu zählen die Forscher unter dem

Die Sedimente in den Maaren (hier das Pulvermaar in der Eifel) sind für Klimaforscher ein ideales Klimaarchiv.



Mikroskop die Jahreslagen in Sedimenten von Binnenseen und in Baumringen genau aus. Beide Archive sind im Siedlungsraum des Menschen zu finden und liefern somit entscheidende Informationen über die Auswirkungen von Klima in unserem direkten Lebensumfeld.

Die Untersuchungen der Forscher des GFZ begannen in den Maarseen der Eifel. In diesen heute mit Wasser gefüllten Schloten erloschener Vulkane, sank über lange Zeit alles auf den Seegrund nieder, was in den Seen an Algen gedieh und abstarb, was von den Hängen hinabgespült und von Winden hineingeweht wurde. Jeweils eine helle Lage aus den Resten sommerlicher Algenblüten und eine dunkle, bestehend aus im Herbst und Winter durch Regen eingespültem Material, bilden zusammen eine Jahresschicht. Wenn die Forscher diese Schichten unter dem Mikroskop analysieren, unternehmen sie Zeitreisen, auf denen sie viele Tausend Jahre in die Vergangenheit zurück blicken. Sie sehen warme Sommer mit starken Algenblüten, kalte Winter mit lang andauernder Eisbedeckung, aber auch die Spuren extremer Überflutungen oder Vulkanausbrüche. So lassen sich nicht nur Verschiebungen der Jahreszeiten als Folge von periodischen Klimaveränderungen beobachten, sondern auch die viel selteneren, extremen und plötzlichen Klimawechsel aufspüren, deren Ursachen bis heute große Rätsel bergen.

Eine der am besten erhaltenen Schichtungen der letzten 14 000 Jahre fanden die GFZ-Forscher im Meerfelder Maarsee, der windgeschützt in einem 180 Meter tiefen Vulkankrater liegt. In dessen lückenloser Warvenreihe steckte eine



Vom Floß aus stechen Wissenschaftler des GFZ Bohrkerne aus dem Sediment von Binnenseen.



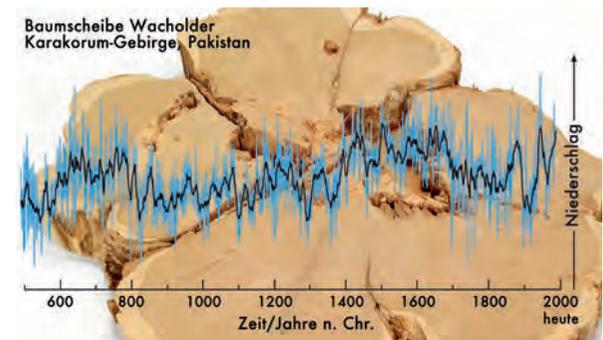
besondere Überraschung, denn sie haben den wohl extremsten Klimasturz seit der letzten Eiszeit aufgezeichnet. Die Untersuchungen enthüllten, dass die als Jüngere Dryas bekannte, 1100 Jahre lange Kaltphase innerhalb von nur einem Jahrzehnt begann. Damit konnte nachgewiesen werden, dass solche extremen Klimaveränderungen nicht nur – wie bisher angenommen – in der Arktis sondern auch in unserem Lebensraum möglich sind. Die Daten der Warven aus dem Maarsee enthielten gleichzeitig wertvolle Informationen über die Ursachen für diesen Klimasturz. Entgegen der Annahme, dass Änderungen des Golfstroms am Anfang der abrupten Abkühlung standen, war es vermutlich eine plötzliche Änderung der Windsysteme, die zu dieser derart schnellen Abkühlung geführt hat.

Ergänzt werden die aus Binnenseen gewonnenen Klimainformationen prähistorischer Zeiten durch die Untersuchung von Baumringen. Bäume nehmen Kohlendioxid aus der Atmosphäre sowie Wasser aus dem Boden auf und bauen daraus ihre Stämme. Im Frühjahr wächst das Holz schneller, es hat größere Zellen und ist leichter. Im Sommer wächst es langsamer und bildet kleinere Zellen. Dieses Spätholz ist dichter und dunkler. Zusammen bilden je eine Schicht Früh- und Spätholz einen Jahrring. Zählt man die Jahrringe, so erhält man das Alter des Baumes. Untersucht man die Ringe aber genauer, so erfährt man viel über die Umwelt und das Klima im Lebensraum des Baumes. Aus der Dicke eines Ringes, seiner Farbe und Gestalt sowie aus der chemischen Zusammensetzung können Forscher messen, wie sich Temperatur und Niederschlag verändert haben. Aus Jahrringen können sie sogar ablesen, wie lang und intensiv Trockenzeiten waren, wie häufig sich Waldbrände ereigneten und ob Wälder von Insekten befallen wurden.

Der Schwerpunkt der Klimaforschung auf dem Telegrafenberg ist Eurasien. So untersuchen die GFZ-Wissenschaftler unter anderem, wie die das Wetter in Europa bestimmenden Westwind-Systeme und der Monsun in Asien zusammenhängen und wie sie sich gegenseitig beeinflussen.



*Eingefärbter Dünnschnitt (60 μm) einer Weymouth-Kiefer (*Pinus strobus*)*



1500 Jahre Klimaentwicklung im Karakorum-Gebirge Pakistans spiegeln sich in der Baumscheibe eines Wacholders wider.

Außerdem wird erforscht, wie sich globale Klimaveränderungen in den verschiedenen Regionen ausgewirkt haben. Dazu haben die Forscher an zahlreichen Orten, die von der europäischen Atlantikküste bis an den Pazifik Ostasiens und von Sibirien bis zum Indischen Subkontinent reichen, Seesedimente und Baumringe gemeinsam analysiert. Zusammen ergeben diese beiden Klimaarchive nämlich eine lückenlose Klimageschichte in bisher nicht erreichter zeitlicher Präzision, die bis in die letzte Warmzeit vor mehr als 130 000 Jahren zurückreicht.

Die Welt im Computer: Modellierung des Systems Erde

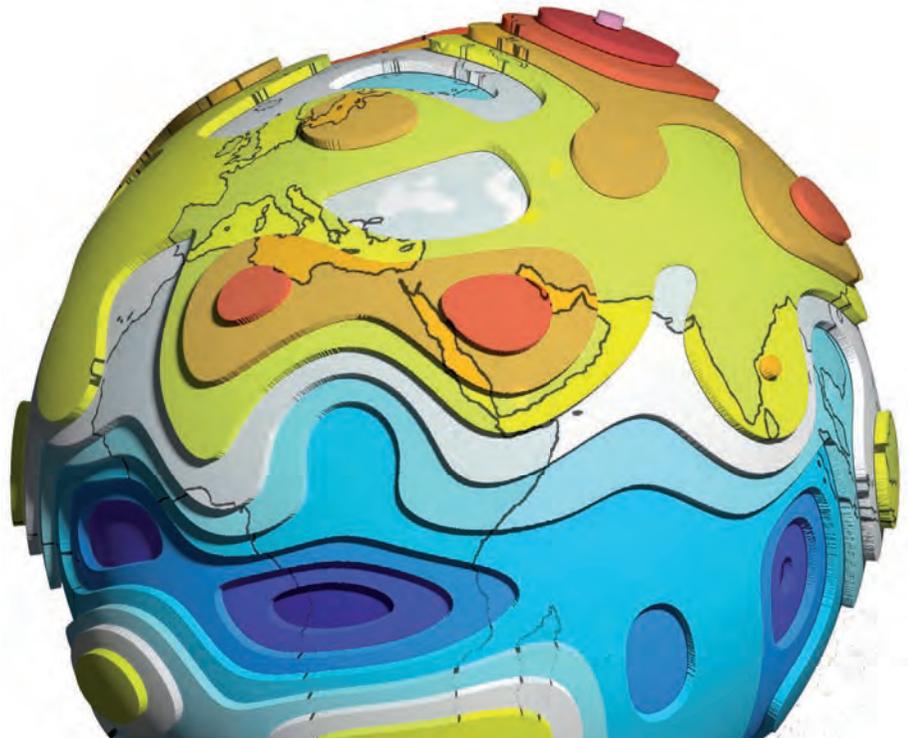
Es mag reiner Zufall sein, dass das neben dem Sauerstoff häufigste in der Erdkruste vorkommende Element auch die Mutter der digitalen elektronischen Revolution ist. Als Halbleiter ist Silizium heute nämlich das Herz nahezu aller Computerchips. Im Quarz und vielen Silikatgesteinen gebunden ist es dagegen der Stoff aus dem die Erde ist. Das vom Silizium geprägte digitale Zeitalter ist freilich auch an den Geowissenschaften nicht spurlos vorüber gegangen, denn Computer gehören heute zu wichtigen Hilfsmitteln am GFZ. Sie erleichtern nicht nur die Erfassung von Messdaten, sondern können auch das Innere der Erde und die darin ablaufenden Vorgänge modellieren. So bringen die Forscher auf dem Telegrafenberg mit ihren Computerprogrammen die Elektronen in den Siliziumchips unter anderem dazu, das Eintreten von Tsunamis zu modellieren, den Geheimnissen von Sedimentbecken auf die Spur zu kommen oder den Einfluss von Wind und Strömungen auf die Erddrehung zu untersuchen.

Vieles tief unter unseren Füßen ist nicht nur deshalb unbekannt, weil es weitgehend unzugänglich ist. Die meisten Vorgänge im Inneren der Erde spielen sich auch auf Zeitskalen ab, die weit außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsvermögens liegen. So rasen die Brüche von Erdbeben mit Geschwindigkeiten von etwa 10 000 Kilometern pro Stunde durch Verwerfungszonen. Die riesigen Lithosphärenplatten bewegen sich dagegen noch langsamer als ein Fingernagel wächst. Überall dort, wo mehrere Lithosphärenplatten zusammenstoßen, beispielsweise an Transformstörungen oder in Subduktionszonen, werden die Gesteine in Erdkruste und Erdmantel deformiert. Dabei entsteht Wärme, die wiederum Einfluss auf das mechanische Verhalten von Gesteinen hat

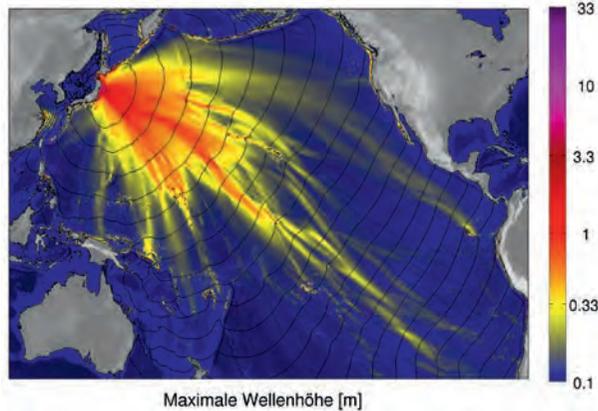
und gleichzeitig zu petrologischen Änderungen führt. GFZ-Forscher haben numerische Verfahren entwickelt, diese derart unterschiedlich schnellen dynamischen Vorgänge auf dem Computer zu simulieren.

Indem sie in ihren Simulationen gleichzeitig die thermomechanischen und petrophysikalischen Veränderungen berücksichtigen, sind die Ergebnisse der Modellrechnungen besonders realistisch. Deshalb sind sie auch die Grundlage für ein neues, hauptsächlich auf der Messung von Krusten-deformationen mit GPS basierendes System zur Warnung vor Tsunami, dem GPS-Shield.

Numerische Simulation des irdischen Magnetfeldes



Das Bild zeigt die maximale Tsunamiwellenhöhe, welche sich aus einem GPS basierten Modell des Tohoku-Erdbebens (2011) ergibt. Gut sichtbar sind Fokussierungseffekte aufgrund unterschiedlicher Wassertiefen sowie die starke Zunahme der Wellenhöhe in der Nähe der Küste. Die dünnen schwarzen Linien stellen die Tsunamiausbreitung in Stundenschritten dar.



Eine andere Arbeitsgruppe befasst sich mit der Modellierung von Sedimentbecken auf dem Computer. Diese Becken, wie beispielsweise das norddeutsche Becken, das sich unter dem norddeutschen Tiefland bis in mehr als 12 Kilometern Tiefe erstreckt, gehören zu den geologisch reichsten Landschaften der Erde. In vielen Becken sind nämlich große Lagerstätten verborgen, von Kohle über Erdöl und Erdgas bis hin zu Lockergesteinen für die Bauwirtschaft. Wie entstehen aber solche Becken und welcher Druck und welche Temperaturen herrschen dort in einigen Kilometern Tiefe unter der Erdoberfläche? Mit ihren Computermodellen untersuchen die Forscher auf dem Telegrafenberg, wie sich ein komplettes Becken im Laufe der Erdgeschichte gesenkt und gleichzeitig mit Sedimenten gefüllt hat. Daraus leiten sie dann wichtige Informationen für die Nutzung der Ressourcen in solchen Becken ab, wie dem Grundwasser, den Kohlenwasserstoffen und der tiefen Geothermie. Sie untersuchen auch, wie sich ein Becken zur Speicherung von Geomaterialien, beispielsweise Kohlendioxid, nutzen lässt.

Basis für Modellrechnungen sind die großen Datensätze, die aus Messungen stammen: hier stehen Seismometer zum Feldeinsatz bereit.



Dabei konzentriert sich die Arbeitsgruppe nicht nur auf Sedimentbecken an Land. Sie haben auch dreidimensionale Modelle des Vøring- und Møre-Beckens im Nordatlantik vor der norwegischen Küste und des Kwanza-Beckens vor Angola entwickelt. Dabei geht es unter anderem auch um die Salzbewegungen innerhalb eines Beckens. Wie eng die Modellierer dabei mit jenen Forschern am GFZ zusammenarbeiten, die im Gelände tätig sind, wird an einem Projekt in Namibia deutlich. Von Land und von See haben verschiedene Arbeitsgruppen refraktionsseismische Profile des Orange-Beckens vor der Küste des südwestafrikanischen Landes aufgenommen. Aus den Ergebnissen dieser Messungen, können sie im Groben auf die geologische Schichtung und den Aufbau des Beckens schließen. Wenn man aber ein Computermodell mit diesen Messdaten füttert, entsteht ein wesentlich umfassenderes Bild des Beckens. Daraus erschließen sich grundlegende geologische Informationen, wie die Rekonstruktion der Absenkungsgeschichte des Beckens und die Berechnung der Wärmeflußentwicklung.

Andere Forscher modellieren, wie sich Veränderungen in den großräumigen Windsystemen der Atmosphäre, in den Strömungen der Ozeane aber auch in den Wasservorkommen auf den Kontinenten auf die Erdrotation, das Schwerfeld und die Erdfigur auswirken. Sie untersuchen, wie die Erdkruste viskoelastisch auf Änderungen der Eismassen auf den Kontinenten und die daraus folgenden Schwankungen des Meeresspiegels reagiert. Eine solche glazialisostatische Anpassung auf den verminderten Druck des Eises lässt sich im Unterschied zu kurzfristigen elastischen Verformungen noch Jahrtausende nach dem Rückzug des Eises messen. Außerdem modellieren sie, wie Variationen und Koppelungen der Konvektionsströme im Erdmantel und im äußeren Erdkern zu den dekadischen Schwankungen der Erdrotation führen. Eine Gruppe junger Wissenschaftler versucht gleichzeitig durch Kombination geodätischer Beobachtungsdaten mit numerischen Modellsimulationen natürliche Beiträge zur Klimavariabilität aufzudecken.

Vom Orbit zum Kern: Das Erdmagnetfeld im Detail

*Magnetfeldmessungen
im südlichen Afrika*

Das Magnetfeld unseres Planeten ist ein erstaunlich kapriziöser Zug der Erde, die wir sonst als so beständig erleben. Seine Stärke verändert sich laufend, aber auch seine Lage – die Magnetpole wandern fast eine Million mal schneller als es die Kontinente tun. Das Magnetfeld ist vielschichtig. Es gibt das dominierende Hauptfeld, das durch langsame Fließbewegungen geschmolzenen Eisens im äußeren Erdkern hervorgerufen wird. Hinzu kommt das örtlich mehr oder weniger stark ausgeprägte „Lithosphärenfeld“ durch magnetisierte Gesteine in der Erdkruste und vielleicht auch im oberen Erdmantel. Zudem funkt ständig die Sonne dazwischen. Sie beeinflusst durch elektrisch geladene Teilchen des Sonnenwindes den Zustand der Magnetosphäre und dadurch wiederum in mehrfachen Wechselwirkungen das an der Erdoberfläche gemessene Feld. Forscher des GFZ bemühen sich, die einzelnen Komponenten in diesem verwirrenden Zusammenspiel möglichst exakt zu trennen.

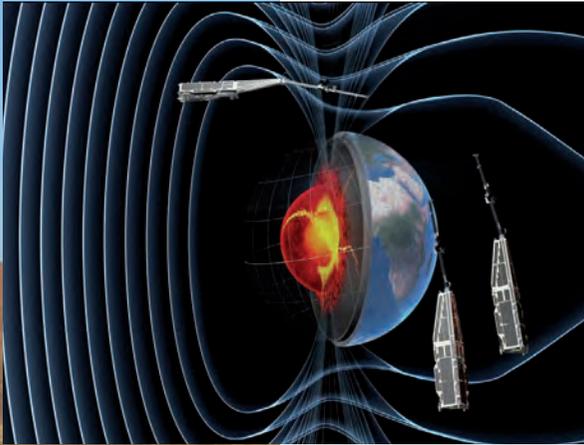
Jede Komponente ist von immenser praktischer Bedeutung für unser Leben. Das Hauptfeld schützt uns wie ein unsichtbarer Schirm vor den elektrischen Teilchen von der Sonne. Es fängt sie ein und leitet die meisten um die Erde herum. Allerdings ist die Kraft des irdischen Magneteten nicht konstant. Im Laufe der Erdgeschichte gab es immer wieder Schwächephasen und sogar Umpolungen. Das wissen wir aus der Untersuchung magnetisierter Gesteine. Auch in den direkten regelmäßigen Messungen des Magnetfeldes, die es seit rund 150 Jahren gibt, zeigt sich der Trend zur Abschwächung. Zusätzlich erzeugen die aus starken Sonnenausbrüchen stammenden elektrisch geladenen Teilchen entlang der Linien des erdma-

gnetischen Feldes Ströme, die wiederum das schnell veränderliche Außenfeld hervorrufen. Diese Ströme üben mannigfache störende Einflüsse auf Stromversorgungsnetze und auf die zahlreichen Kommunikations- und Navigationssatelliten aus, auf deren fehlerfreies Funktionieren unsere Zivilisation immer mehr angewiesen ist. Solche Zwischenfälle würden sich bei weiterer Abschwächung des Magnetfeldes dramatisch häufen. Unterdessen gibt das Lithosphärenfeld Aufschluss über verborgene geologische Strukturen in der Erdkruste. Die jetzt erkennbaren Muster zeigen Zusammenhänge zwischen Teilen verschiedener Kontinente, die durch die Plattentektonik zerrissen worden sind. Das Lithosphärenfeld verrät auch mögliche Lagerstätten. Bei der Planung von Explorationsprojekten, sei es die Suche nach Erdöl, Erdgas, Erzen oder Wasser, werden Karten herangezogen, die magnetische Anomalien in der Region anzeigen.

Rund um die Erde wird daher das Magnetfeld mit seinen verschiedenen Komponenten laufend und ohne Unterbrechung registriert. Das GFZ spielt in diesem weltweit koordinierten Beobachtungsnetz eine wichtige Rolle. So betreibt es das 1890 in Potsdam gegründete und später 45 Kilometer südwestwärts nach Niemegek verlagerte Adolf Schmidt-Observatorium für Geomagnetismus. Seit dem Jahr 2000 ist das Observatorium Wüst nordlich von Hamburg hinzugekommen. Mit modernsten Geräten ausgestattet, zählen sie zu den weltweit leistungsfähigsten geomagnetischen Observatorien. In Zusammenarbeit mit internationalen Partnern betreibt oder unterstützt das



Die geplante Satellitenmission SWARM zur Messung des irdischen Magnetfeldes besteht aus drei Satelliten, die auf dem Prinzip des CHAMP-Satelliten beruhen.



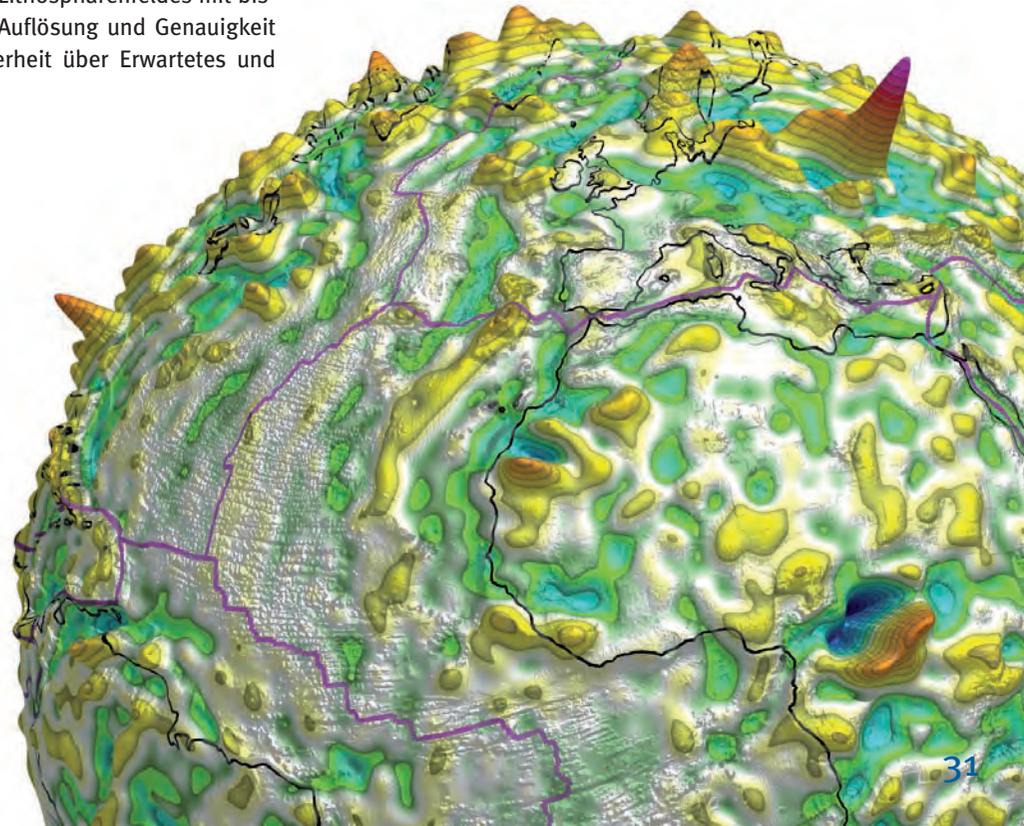
GFZ zusätzlich Observatorien in Bolivien, Bulgarien, Namibia, Rumänien, Russland sowie auf der im Südatlantik gelegenen Insel St. Helena.

Ein Meilenstein in der geomagnetischen Forschung ist die Beobachtung des Magnetfeldes aus dem All, seit dem Jahre 2000 mit dem GFZ-Satelliten CHAMP und in Zukunft mit der ESA-Mission SWARM. Ein wes-

entliches Ergebnis der Messungen von CHAMP ist eine Weltkarte, die den Anteil des Lithosphärenfeldes mit bislang unerreichter räumlicher Auflösung und Genauigkeit darstellt. Sie verschafft Sicherheit über Erwartetes und

reizt durch Unerwartetes. Erwartet und bestätigt wurde etwa eine relativ schwache Magnetisierung der ozeanischen, vor allem der pazifischen Lithosphäre und im Gegensatz dazu eine stärkere Magnetisierung sehr alter Teile der Kontinente. Zu den Überraschungen zählen ein geologisch noch nicht erklärbares magnetisches Hoch des Lithosphärenfeldes am Nordpol sowie eine nur schwache Magnetisierung der uralten Teile Südamerikas. Bei der Analyse der mit CHAMP aufgezeichneten Messdaten stellten die GFZ-Forscher auch erstmals fest, dass beispielsweise ozeanische Gezeiten und Meeresströme äußerst schwache magnetische Signale erzeugen. In diesem Sinne können Magnetfeldmessungen auch zur Fernerkundung von dynamischen Vorgängen unseres sich dauernd verändernden Planeten genutzt werden.

Dreidimensionale Darstellung des Magnetfeldsignals der Lithosphäre in 100 Kilometern Höhe. Deutlich erkennbar sind die Bangui-Anomalie in Zentralafrika und die Anomalie bei Kursk.



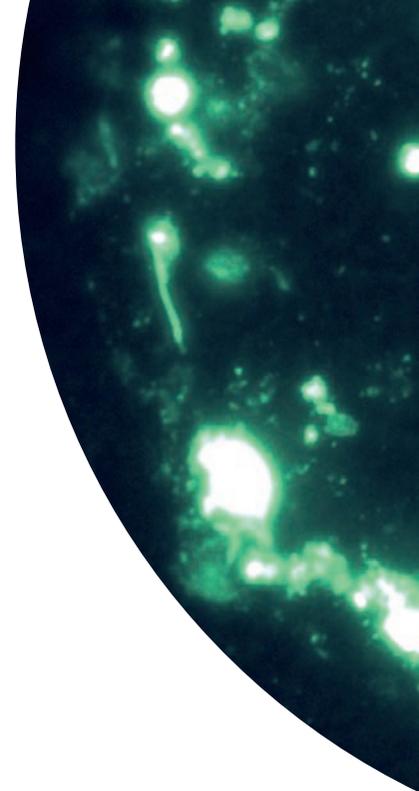
Das Leben in der Tiefe: Biosphäre im Untergrund

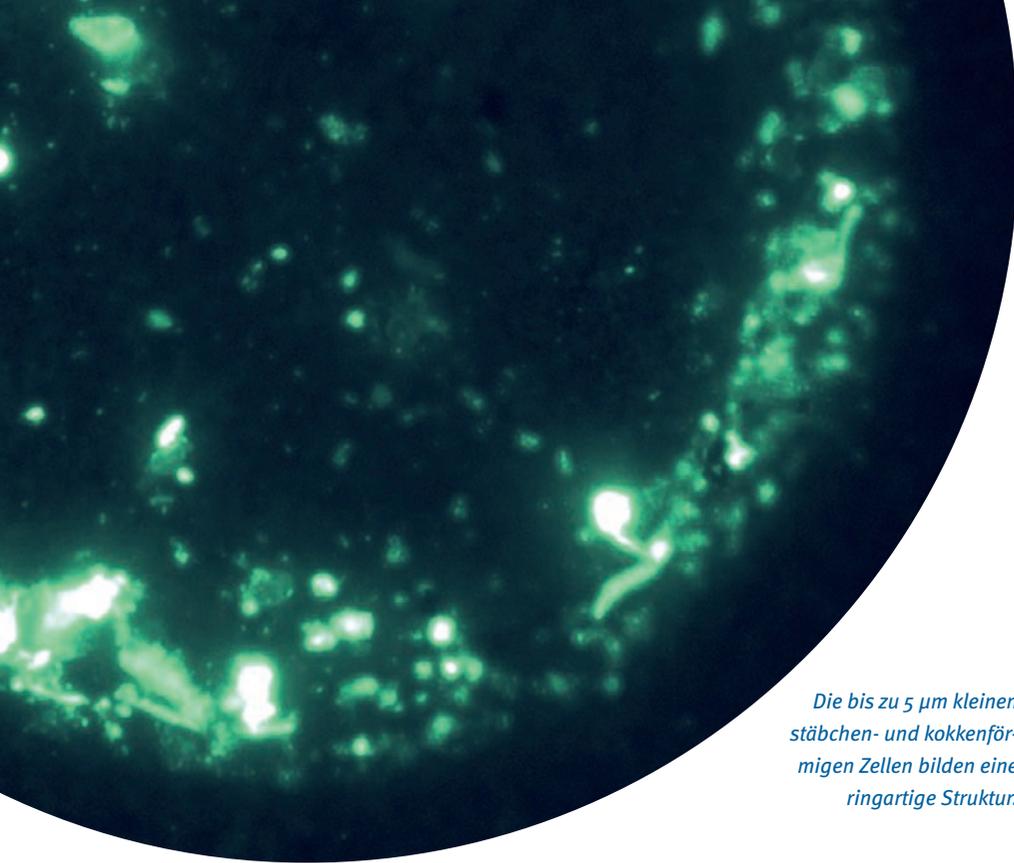
Beim Blick auf andere Himmelskörper wird klar, dass die Erde ein ganz besonderer Planet ist: auf ihr herrscht nämlich Leben. Aus dem Weltraum bietet sich die Biosphäre als ausgedehnte grüne Vegetation dar – das Leben auf der Erdoberfläche. Die Entdeckung, dass mikrobielles Leben aber auch tief unterhalb der Erdoberfläche weit verbreitet ist, war demgegenüber eine große Überraschung. Kaum jemand hatte damit gerechnet, dass unter den im Vergleich zur Oberfläche unwirtlichen Bedingungen des tiefen Untergrunds Leben überhaupt möglich ist. So dringt kein Sonnenlicht ins Erdinnere vor und die Photosynthese ist damit nicht möglich. Darüber hinaus nehmen in der Erde Temperatur und Druck mit jedem Kilometer Tiefe um 20 bis 50 Grad und 10 bis 20 Megapascal zu. Dennoch ist mikrobielles Leben in etlichen Kilometern Tiefe in scheinbar lebensfeindlicher Umgebung, bei Drücken von 60 Megapascal und 120 Grad nachgewiesen worden. Sauerstoff ist im tieferen Untergrund nicht verfügbar, so dass die Atmungs- und Stoffwechselfor-

gänge der dort lebenden Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen stattfinden und sich damit grundlegend von denen an der Erdoberfläche unterscheiden. Inzwischen schätzen Geowissenschaftler sogar, dass die Biomasse der „tiefen Biosphäre“ in etwa mit der Menge der Biomasse der Erdoberfläche vergleichbar ist. Wie die Lebensprozesse dieser Mikroorganismen ablaufen, ist Gegenstand intensiver Forschung am GFZ. Hier einige Beispiele:

In Sedimentgesteinen scheinen sich die Mikroben von jenem organischen Material von Algen und Pflanzen zu ernähren, das über die Jahrtausende dort abgelagert wurde. Ihre Energie beziehen die Mikroorganismen dabei aus biochemischen Reaktionen. Es wird vermutet, dass wichtige Substrate aus dem sedimentierten organischen Material durch mikrobielle und geologische Umwandlungsprozesse freigesetzt werden und damit als Nahrungsgrundlage für die „tiefe Biosphäre“ dienen. Solche gekoppelten Bio-Geosysteme können dabei in unterschiedlichen Tiefenzonen der Erdkruste vorkommen; ihre Stoffwechselprodukte gelangen durch Risse und Spalten bis an die Oberfläche. Darüber hinaus wurden Mikroorganismen auch in Gesteinen entdeckt, die im Gegensatz zu Sedimentschichten gänzlich von der Biosphäre an der Erdoberfläche und ihren Überresten abgeschlossen sind. Diese Organismen sind in der Lage, die notwendigen Stoffe fürs Leben aus Wasser, Kohlendioxid, Wasserstoff und Stickstoff selber herzustellen.

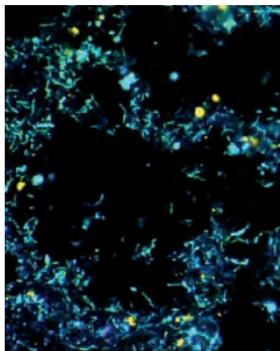
Die Huntly-Bohrung, Neuseeland. Der Bohrkern (links) enthält Kohlestückchen, eine mögliche Nahrungsquelle für mikrobielle Lebensgemeinschaften in der Tiefe.





Die bis zu 5 µm kleinen stäbchen- und kokkenförmigen Zellen bilden eine ringartige Struktur.

Unten: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme der mikrobiellen Lebensgemeinschaften im Fluid der Injektionsbohrung (670 Meter Tiefe) am Pilotstandort Ketzin, ein Jahr nach Start der CO₂-Injektion



In einem südafrikanischen Goldbergwerk wurden GFZ-Forscher bei der Suche nach derartigen Lebensformen fündig. Dort entdeckten sie in 2,8 Kilometern Tiefe Bakterien, die seit Millionen von Jahren völlig ohne Sonnenenergie überleben. Während manche oberflächennahe Mikroben sich in Minuten verdoppeln können, brauchen die Bakterien in der Goldmine dazu bis zu 300 Jahre. Diese langsame Lebensweise sichert das Überleben der Mikroben in einer scheinbar unwirtlichen Tiefe, denn die Geschwindigkeit, mit der Nährstoffe und damit die verfügbare Energie nachgeliefert wird, ist sehr gering. Doch wovon leben diese Bakterien im Goldbergwerk überhaupt? Sie nutzen eine Energiequelle, die völlig unabhängig von der Sonne ist. Stattdessen reduzieren sie biochemisch Sulfat zu Sulfid mit radiolytisch produziertem Wasserstoff, der beim Zerfall natürlich im Untergrund

vorkommender radioaktiver Stoffe wie Uran, Thorium und Kalium entsteht. Diese Mikrobengemeinschaft lebt also ausschließlich von geologisch erzeugten Nährstoffen. Auch bei einer Forschungsbohrung im Permafrost im Nordwesten Kanadas fanden GFZ-Forscher in einer Tiefe von mehr als einem Kilometer eindeutige Spuren von Leben. Es handelte sich um Membranlipide, organische Moleküle aus bakteriellen Zellwänden, die beim Absterben von Mikroorganismen sehr schnell abgebaut werden. Ihr Nachweis in tief liegenden Sedimenten ist daher ein wichtiger Indikator für unterirdische Ökosysteme. Vollzieht man nun die geologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes mit Computermodellen nach, um die dort ablaufenden thermisch kontrollierten Prozesse besser in ihrer zeitlichen Abfolge zu verstehen, lässt sich auch die Geschichte der tiefen Biosphäre in diesem Gebiet entschlüsseln. Aus der Kombination von biogeochemischen Analysemethoden und geologischer Prozessmodellierung zeigte sich, dass in bis zu 15 Millionen Jahre alten Sedimenten in noch mehr als 5,5 Kilometern Tiefe intakte Lipide existieren können. Ein gekoppeltes Bio-Geosystem ist unter starkem Druck und hoher Temperatur also durchaus lebensfähig.

Auch in Erdöl- und Erdgaslagerstätten sind Mikroben aktiv, denn manche Mikroorganismen haben schon seit langem erkannt, dass Kohlenwasserstoffe ideale Energiequellen sind, und verarbeiten sie in ihrem Stoffwechsel. Dabei entstehen enorme Mengen Kohlendioxid und Methan. Diese Gase hätten einen erheblichen Einfluss auf das globale Klima, wenn sie in die Erdatmosphäre gelangten. Weltweit ist der größte Teil der bekannten Erdölreserven mehr oder weniger stark von solchen biologischen Prozessen verändert worden. Dabei verringert sich die Menge an verfügbaren Energieressourcen und ihr wirtschaftlicher Wert nimmt ab. Die Veränderungen machen es aber auch schwieriger, Erdöl und Erdgas umweltschonend zu fördern. Aus diesen Gründen gehen GFZ-Forscher der Frage nach, wie die Mikroben die Lagerstätten verändern und welche Rolle sie im globalen Kohlenstoffkreislauf spielen.

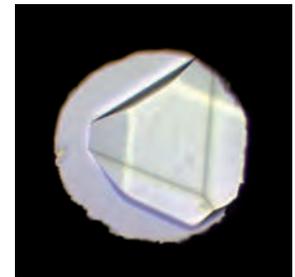
Hochdruck mit Diamanten: Der Erdmantel im Labor

Die Proben sind kaum größer als ein Staubkorn, die Experimentierkammern haben das Volumen eines Fingerhutes – dennoch können GFZ-Forscher darin Zustände erzeugen, wie sie im Erdmantel Hunderte von Kilometern tief unter unseren Füßen herrschen. Dort erreichen die Temperaturen nämlich mehrere tausend Grad Celsius und der Druck ist bis zu zehntausend Mal so groß wie der Luftdruck an der Erdoberfläche. Ziel der Versuche in den verschiedenen Hochdruckanlagen auf dem Telegrafenberg ist es, Erkenntnisse über die unzugänglichen Tiefen zu gewinnen und herauszufinden, wie die unterschiedlichen Gesteine auf die jeweiligen Bedingungen in der Tiefe reagieren.

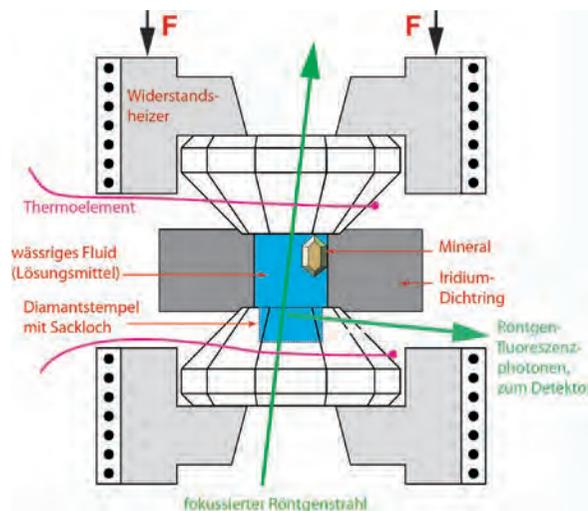
Selbst wenn man tief genug in den Erdmantel hinein bohren könnte, müsste das physikalische und chemische Verhalten von Hochdruckmineralen mit Labormethoden untersucht werden. Denn viele der exotischen Gesteine tief im Erdinneren verwandeln sich bei nachlassendem Druck schnell wieder in Alltagsminerale. Daher müssen die Messungen stattfinden, während die meist winzigen Proben unter extremen Druck gesetzt und beheizt werden. Die winzigen Experimentierkammern sind deshalb von vergleichsweise riesigen Apparaturen umgeben: Laser zum Beheizen der Proben, Mikroskope, Röntgengeräte und Spektrometer zum Erfassen der Resultate.

Das Herzstück dieser Experimente sind jedoch die vielseitig einzusetzenden „Diamantstempelzellen“. In ihnen werden die staubkorngroßen Proben zwischen zwei speziell spitz zugeschliffenen Diamanten gepresst, erhitzt und gleichzeitig untersucht. Eine einzigartige Kombina-

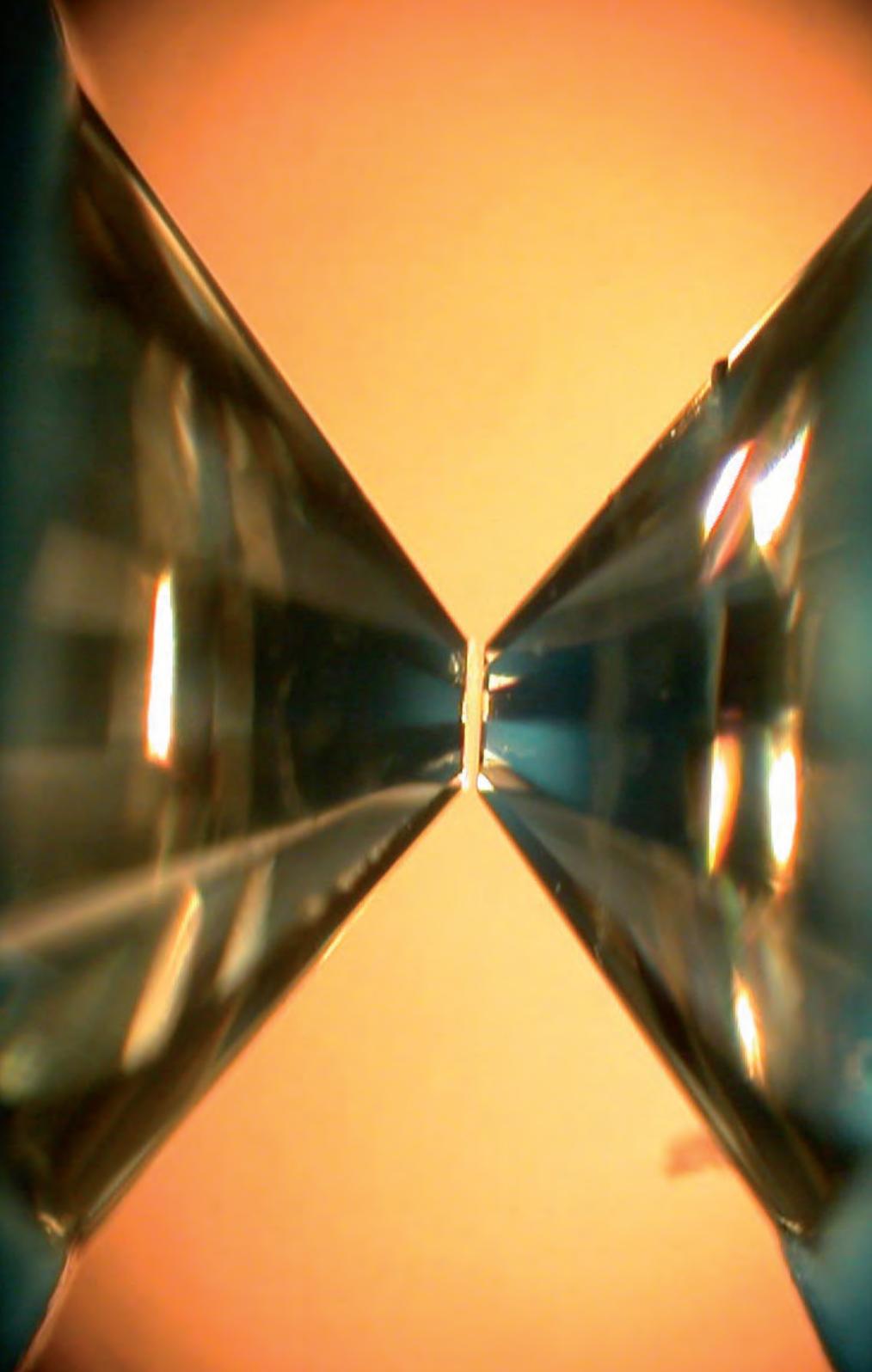
tion von Eigenschaften prädestiniert gerade Diamanten für solche Versuche: Unter allen bekannten Materialien haben sie die höchste Festigkeit und die höchste Wärmeleitfähigkeit, sind elektrische Isolatoren und reagieren unter den meisten Bedingungen nicht mit dem Probenmaterial. Sie sind transparent nicht nur für Licht, sondern auch für Strahlen in einem großen Bereich des elektromagnetischen Spektrums sowie für Ultraschall. Dadurch können die Proben während der Experimente mit verschiedenen optischen, spektroskopischen und röntgenographischen Verfahren sowie mit Ultraschall-Interferometrie untersucht werden.



Unter hohem Druck nimmt Wasser die Form von Eis VI an.



Prinzip einer Diamantstempelapparatur



*Diamantstempel,
von der Seite aus betrachtet*

Die unerreichbaren Regionen der Erde mit solch äußerst diffizilen Experimenten zu erforschen, ist für Geowissenschaftler kein Selbstzweck. In der Tiefe spielen sich nämlich dynamische Prozesse ab, die das Geschehen an der Oberfläche prägen. So wird der Erdmantel vom tiefen Erdkern aufgeheizt. Als Folge verlieren die Gesteine ihre Festigkeit und beginnen als äußerst zähe Masse zu fließen. Dabei entstehen Konvektionsströme, die als Motor der Plattentektonik gelten und die Gebirgsbildung, den Vulkanismus und sogar Erdbeben steuern.

Im Detail sind diese Vorgänge aber noch bei weiten nicht verstanden und viele wichtige Fragen sind noch offen, etwa: Wie gut leiten die Gesteine in der Tiefe Wärme? Wie wird die elektrische Leitfähigkeit beeinflusst? Wie verändern sich die Laufzeiten von Erdbebenwellen, wie die Porenräume zwischen den Mineralen und damit die Durchgängigkeit für Fluide? Wie verhalten sich Gesteinsschmelzen? Viele Untersuchungen befassen sich mit Umwandlungen von Mineralen bei hohen Drücken und Temperaturen. Nicht zuletzt können die Forscher durch ein Mikroskop auch direkt verfolgen, was in der Diamantenkammer geschieht – wie sich etwa aus einer ursprünglich homogenen Schmelze beim Abkühlen Teilschmelzen bilden, in denen jeweils bestimmte Elemente besonders angereichert sind.

Die Hochdruckexperimente sind aber auch von unmittelbarem Wert für die Praxis, wenn es etwa gilt, den Wärmefluss aus dem Erdinnern zu bestimmen und damit das Potenzial an nutzbarer geothermischer Energie exakter abzuschätzen. Die Untersuchungen geben auch Aufschluss über Reaktionen, die zur Bildung von Erzlagerstätten führen. Kurzum: Die Experimente zwischen den Spitzen der wertvollen Edelsteine öffnen neue Fenster ins Erdinnere.

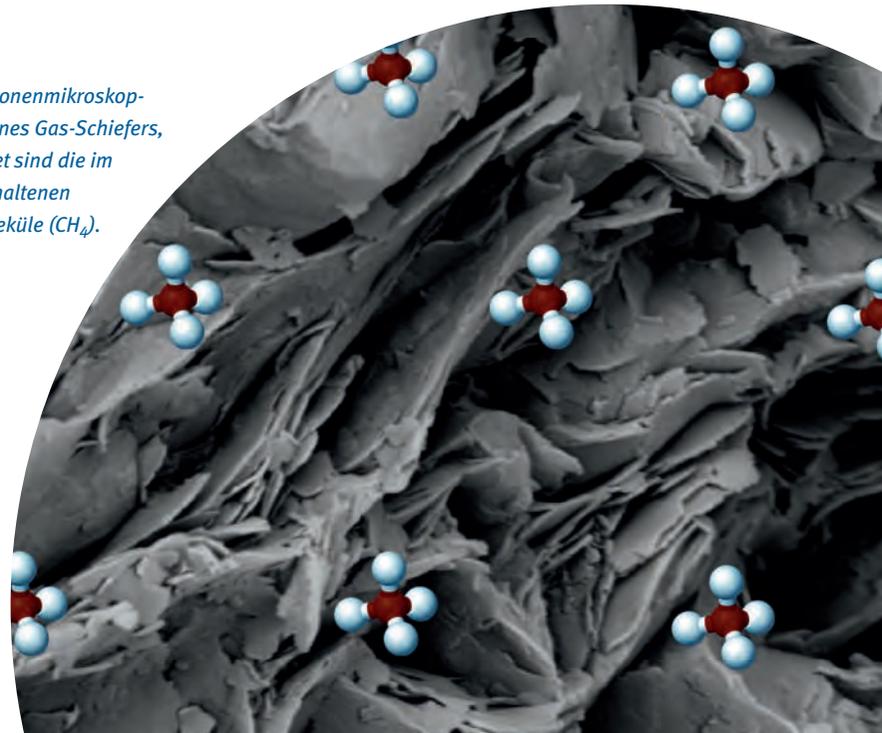
Neue Energie: Erdgas aus Schwarzschiefern

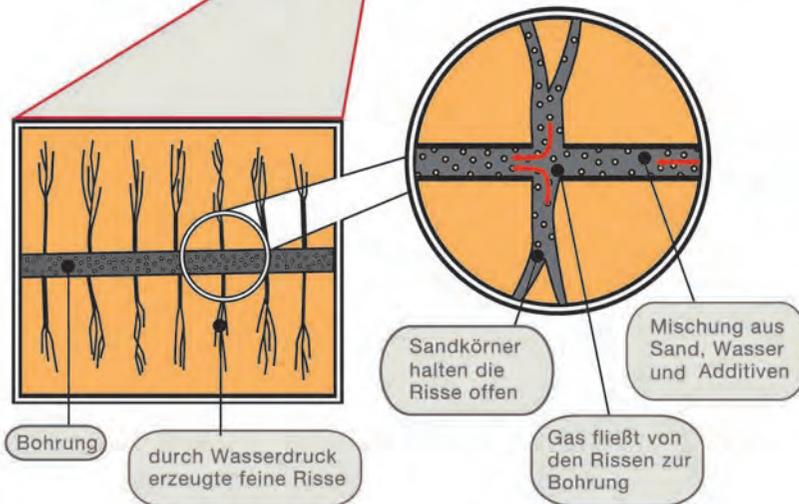
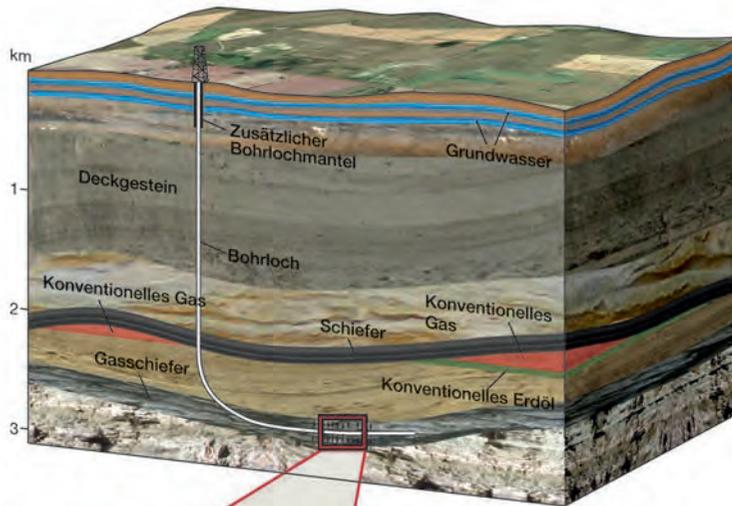
Was haben die wunderbar erhaltenen Fossilien von Seelilien im „Urweltmuseum Hauff“ im schwäbischen Holzmaden mit den vielen Bohrtürmen zu tun, die man beim Landeanflug auf den amerikanischen Großflughafen Dallas in Texas sieht? Auf den ersten Blick scheint kein Zusammenhang zwischen dem hektischen Treiben in der texanischen Metropole und dem gemütlichen Dorf am Rand der Schwäbischen Alb zu bestehen. Ein Blick in den Untergrund zeigt jedoch, warum Forscher des GFZ von beiden Orten begeistert sind. Unter Holzmaden wie auch unter Dallas gibt es nämlich mächtige Schichten eines dunklen, schiefrigen Gesteins. Diese als Schwarz- oder bituminöse Tonschiefer bezeichneten, fossilienreichen Gesteine enthalten riesige Mengen an Erdgas und sind eine bis heute weitgehend unangezapfte Quelle für diesen Energieträger. Potsdamer Forscher sind in einem Gemeinschaftsprojekt mit anderen europäischen Geowissenschaftlern und der Industrie dabei, das in diesen „Gas Shales“ unter Europa steckende Energiepotential zu entschlüsseln.

Man konnte diesen Gesteinen bis vor einigen Jahren mit herkömmlichen Bohrverfahren nur wenig Erdgas gewinnbringend entlocken. Das lag an deren dichter Struktur, die im Gegensatz zu gut durchlässigen Gesteinssorten für Flüssigkeiten und Gase nahezu undurchlässig ist. In den vergangenen zwei Jahrzehnten lernte man aber, sich dennoch einen effektiven Zugang zu dem in den Schwarzschiefern enthaltenen Erdgas zu verschaffen. Man erzeugte nämlich mit Flüssigkeiten und hohem Druck von Bohrlöchern aus künstliche Risse im Gestein, um deren Durchlässigkeit zu erhöhen (hydraulic fracturing). Gleichzeitig entwickelte

sich die Bohrtechnik weiter, so dass heute Richtungsänderungen während des Bohrens zum Standard der Technik gehören und Horizontal-Bohrungen in großer Tiefe möglich sind. Mit hydraulic fracturing in horizontalen Bohrlochbereichen wird seit etwa 20 Jahren aus dem Barnett-Schiefer in Texas Erdgas gewonnen. Inzwischen hat sich herausgestellt, dass in diesem Schiefer wahrscheinlich die zweitgrößte Erdgaslagerstätte in den Vereinigten Staaten steckt. Sie enthält nämlich Reserven von mehr als 850 Milliarden Kubikmetern.

Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahme eines Gas-Schiefers, eingezeichnet sind die im Schiefer enthaltenen Methan-Moleküle (CH₄).





Tonige Gesteine sind meistens schlecht durchlässig. Wenn sie förderwürdige Mengen Erdgas enthalten (engl.: „shale gas“), kann es nur mit zusätzlichem technischen Aufwand gewonnen werden. Shale gas-Bohrungen werden im unteren Bereich abgelenkt und folgen dem Verlauf der gasführenden Gesteinsschicht. Das Gestein wird mittels „hydraulic fracturing“ aufgebrochen, um das Erdgas freizusetzen. Dazu wird Wasser mit hohem Druck in die Gesteinsschicht gepresst. Beigemischter Sand dient dazu, die entstandenen kleinen Risse offen zu halten. Zugesezte Chemikalien unterstützen den Fracturing-Prozess. Nachdem die Risse im Gestein entstanden sind, kommt ein Teil des Wassers an die Oberfläche zurück und das Erdgas kann gefördert werden.

Alaunschiefer. Bisher hat niemand erkundet, wie groß das Energiepotential von Europas dunklem Tonschiefer wirklich ist. Nach bisherigen, allerdings sehr groben Schätzungen stecken darin allein unter Westeuropa mehr als 40 Billionen Kubikmeter Erdgas. Das ist immerhin vergleichbar mit den insgesamt in Russland nachgewiesenen konventionellen Erdgasreserven. Die GFZ-Forscher wollen wissen, wie solche Lagerstätten von Schiefergas in geologischen Sedimentbecken überhaupt entstehen und wie Erdgas in solchen dichten Gesteinen Millionen von Jahren ungestört lagern kann.

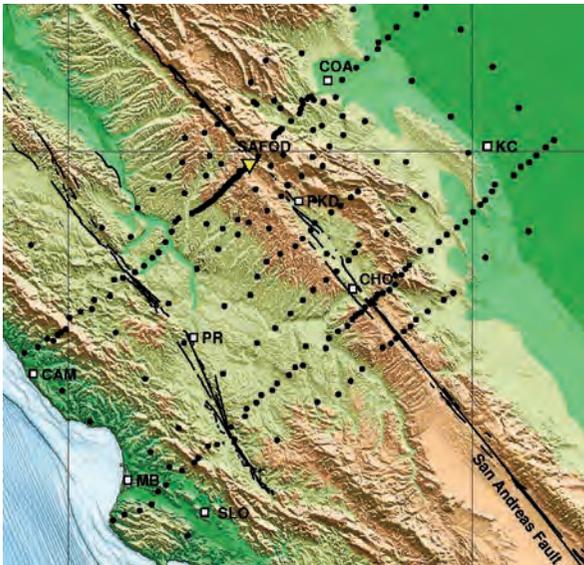
Fossile Energierohstoffe werden noch über Jahrzehnte im deutschen, europäischen und weltweiten Energiemix wichtig sein. Erdgas spielt dabei eine zunehmend zentrale Rolle, weil es bei der Verbrennung der sauberste fossile Energieträger ist. Auch deshalb geht es den GFZ-Forschern darum, das Schiefergas als mögliche neue Energiequelle sicher und umweltfreundlich erschließbar zu machen. Denn die Erfahrungen in den USA haben gezeigt, dass es neben wirtschaftlichen Vorteilen und einer erhöhten Sicherheit der Energierohstoff-Versorgung auch Umwelt- und Gesundheitsrisiken bei der Produktion gibt. Durch Wissenschaft und Technologie-Entwicklung müssen diese Risiken erforscht und minimiert werden, damit die mögliche Schiefergas-Förderung in Europa erfolgreich und umweltgerecht durchgeführt werden kann. Damit tragen die Wissenschaftler auf dem Telegrafenberg dazu bei, unsere unterirdischen Reserven an Kohlenwasserstoffen besser zu verstehen und schonender damit umzugehen.

Solche Schwarzschiefer kommen auch in Deutschland und in anderen europäischen Ländern vor, etwa im vor etwa 175 Millionen Jahren entstandenen Posidonienschiefer. Auch unter Großbritannien und weiten Teilen der Niederlande befinden sich ähnliche, vor etwa 320 Millionen Jahren im Karbon entstandene Schiefer und unter manchen Teilen Schwedens lagert der noch ältere kambrische

Magnetotellurik: Mit elektrischem Strom die Erde durchleuchten

Elektrischer Strom ist aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Er versorgt uns mit Licht, treibt in Haushalten Waschmaschinen und Kühlschränke an, erweckt Computer zum Leben und wird künftig auch vermehrt Autos bewegen. Die fließenden Elektronen sind gleichsam Alleskönner, die uns das Leben ungemein erleichtern. Mit elektrischem Strom lässt sich aber auch das sonst unzugängliche Innere der Erde erkunden – und Forscher des GFZ haben es im Laufe der Jahre perfektioniert, mit Elektrizität die Erde unter unseren Füßen zu durchleuchten.

Magnetotellurische Messpunkte quer zur San Andreas-Verwerfung, Kalifornien

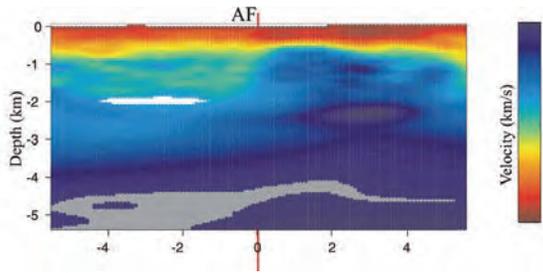


Wie gut Strom fließt, hängt vor allem vom elektrischen Widerstand ab. Manche Metalle wie Kupfer oder Aluminium setzen dem Stromfluss wenig Widerstand entgegen. Andere Stoffe, beispielsweise Granit oder Marmor, leiten dagegen den elektrischen Strom praktisch überhaupt nicht. Salzwasser mit seinen vielen darin gelösten Ionen ist dagegen wiederum ein guter Leiter. Auch tief in der Erde gibt es Schichten unterschiedlicher Leitfähigkeit. Wie gut einzelne Gesteinsschichten den elektrischen Strom leiten, hängt von ihrem Wassergehalt, ihrer chemischen Zusammensetzung und vor allem von ihrer Mineralisation ab. So sind Gesteine, die Erze, Graphit und Sulfide enthalten, sehr gute unterirdische Leiter. Da man den elektrischen Widerstand der Gesteine im tiefen Untergrund aber nicht direkt messen kann, nehmen die Forscher mit Sonden an der Erdoberfläche elektrische und magnetische Felder auf. Als „Stromquelle“ dienen ihnen dabei die Sonne und Blitze, denn der dauernd wehende Sonnenwind und Gewitter erzeugen in der Magnetosphäre und Ionosphäre elektrische Wechselströme. Deren Magnetfelder wiederum induzieren elektrische Ströme in den Erdschichten. Sie lassen sich mit den Sonden an der Erdoberfläche messen. Mit Computerprogrammen werden die Messungen dann ausgewertet und als Ergebnis erhält man ein Modell der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit mit der Tiefe. In der wissenschaftlichen Fachsprache heißen solche Messungen „magnetotellurische Tiefensondierungen“, kurz MT.

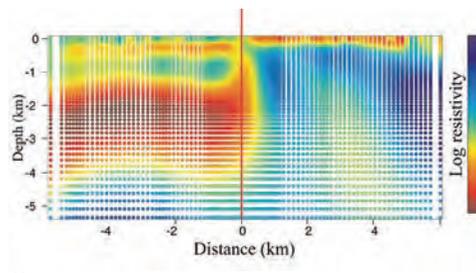
Auf diese Weise haben GFZ-Forscher inzwischen eine Reihe geologisch hochinteressanter Gebiete vermessen. Dabei gilt ihr besonderes Augenmerk den sogenannten

Auslage eines magnetotellurischen Experiments für das Plate Boundary Observatorium in Chile

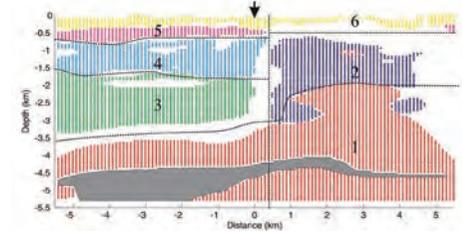




Seismik



Magnetotellurik



Lithologie

Der Schnitt quer über den Jordangraben zeigt in der Zusammenschau von Seismologie, Magnetotellurik und lithologischem Profil deutlich die Scherzone als Grenzfläche zwischen Afrikanischer und Arabischer Platte.



Scherzonen, also jenen Bereichen der Erdkruste, in denen sich zwei Gesteinsschollen aneinander vorbei schieben. Bei der Untersuchung einer der berühmtesten Scherzonen der Welt, der San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien, fanden sie beispielsweise eine nahezu senkrecht stehende Zone hoher Leitfähigkeit auf einer Seite der Verwerfung. Diese Zone weitet sich in der unteren Kruste auf und scheint mit einer breiten Leitfähigkeitsanomalie im oberen Erdmantel verbunden zu sein. Es gilt inzwischen als nahezu sicher, dass die hohen Leitfähigkeiten von Fluiden verursacht werden, die aus dem Erdmantel aufsteigen. Bei hohen Drücken können diese Fluide möglicherweise zum Spannungsabbau in der Verwerfung beitragen, indem sie Mikroerdbeben auslösen oder die beiden Flanken der Verwerfung aseismisch aneinander vorbei kriechen lassen.

Bei anderen Untersuchungen spürten die GFZ-Forscher in den Scherzonen keine Fluide auf, sondern fanden stattdessen Graphit, einen außerordentlich guten elektrischen Leiter. Die unter hohem Druck stattfindende Bewegung der Gesteinsschollen führt nämlich dazu, dass in den Gesteinen enthaltener Kohlenstoff zu Graphit wird und sich zwischen den Schollen ablagert. Solche graphitisierten Scherbahnen bleiben oft über Hunderte von Millionen Jahren erhalten und erlauben daher Rückschlüsse auf die Vorgänge aus den Urzeiten der Plattentektonik. So untersuchten die Potsdamer Geowissenschaftler mit ihren MT-Sonden die möglicherweise älteste erhaltene Kollisionsszone von Kontinenten. Vor etwa 3,5 Milliarden Jahren stießen im heutigen Südafrika zwei Kontinente

zusammen und hinterließen dabei graphitisierte Bewegungsbahnen. Die elektrische Durchleuchtung der Erde erlaubt also nicht nur einen Blick in tiefe Schichten, sondern öffnet auch ein Fenster in die Kinderstube der Erde.

Im Rahmen einer umfassenden Untersuchung des Jordan-Grabens im Grenzgebiet zwischen Israel, Palästina und Jordanien stellten die GFZ-Forscher ihre Messsonden auch im Bereich des Toten Meeres auf. Ähnlich wie die San-Andreas-Störung ist auch der Jordangraben eine Scherzone, bei der sich die Arabische und die Afrikanische Platte horizontal gegeneinander verschieben. Zwar fanden sie dort keine so deutlich ausgeprägte Leitfähigkeitsanomalie wie in Kalifornien, die mit dem Toten Meer zusammenhängenden Salzlaken unter der Erdoberfläche sowie zu unterirdischen Domen aufquellende Salzschieben traten in den Messungen aber deutlich hervor. Die Potsdamer Forschergruppe setzt ihre MT-Verfahren aber nicht nur für die geophysikalische Grundlagenforschung ein. Mit der Magnetotellurik haben sie beispielsweise auch den Untergrund im Bereich von Erdwärmeprojekten untersucht. Bevor überhaupt gebohrt wird, erhält man auf diese Weise einen Einblick in die elektrische Leitfähigkeit der Lagerstätte und sammelt damit Hinweise auf das in ihr steckende Potential zur Energiegewinnung aus Erdwärme. Dabei können auch aktive Signalquellen zum Einsatz kommen, um generelle Fragestellungen der Explorationsgeophysik angehen zu können. Neben der Geothermieforschung stehen hierbei die CO₂-Sequestrierung und unkonventionelle Erdgaslagerstätten im Vordergrund.

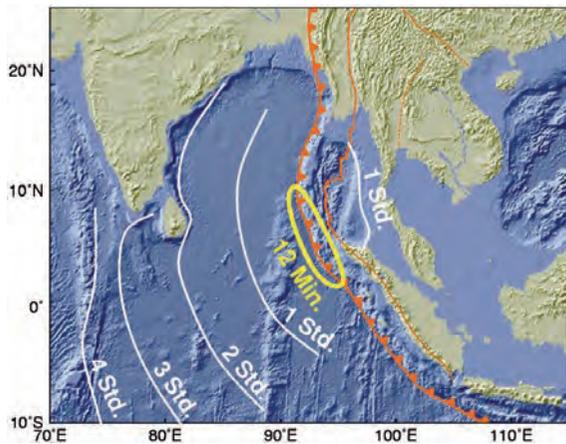
Warnung vor der Killerwelle: Tsunami-Forschung

So schnell wird niemand jene dramatischen Bilder vergessen, die zum Ende des Jahres 2004 um die Welt gingen. Ein extrem schweres Erdbeben, das vor der indonesischen Insel Sumatra seinen Anfang nahm, hatte einen verheerenden Tsunami ausgelöst, der damals innerhalb weniger Stunden den gesamten Indischen Ozean heimsuchte. Von Sumatra bis Sri Lanka, von Indien bis Kenia riss diese tödliche Welle eine Viertelmillion Menschen in den Tod und zerstörte Hunderte von küstennahen Siedlungen. Die deutsche Bundesregierung leistete damals nicht nur unmittelbare Katastrophenhilfe. Berlin versprach dem am schlimmsten von der Katastrophe betroffenen Land, Indonesien, auch ein Warnsystem vor solchen Killerwellen, das deutsche Wissenschaftler eigens für die Verhältnisse in dem Inselreich entwickeln würden. Denn im Gegensatz zum Pazifischen Ozean, für den es schon seit mehr als 50 Jahren Tsunamiwarnungen gibt, traf die von dem schweren Seebeben vor Sumatra ausgelöste Welle die Küsten der Anrainerstaaten des Indischen Ozeans völlig unvorbereitet. Indonesien, mit seinen insgesamt 81 000 Kilometer langen Küsten, ist dabei das am meisten durch Tsunami gefährdete Land in der Region. Schon knapp vier Jahre später, im November 2008, konnte der indonesische Staatspräsident Yudhoyono den Kern des „German-Indonesian Tsunami Early Warning Systems“ (GITEWS) in Betrieb nehmen. Nach einer gemeinsamen Betriebsphase hat Deutschland GITEWS im März 2011 offiziell an Indonesien übergeben. Der verantwortliche Betreiber des Systems ist seitdem der Meteorologische, Klimatologische und Geophysikalische Dienst (BMKG) in Jakarta. Seit der Inbetriebnahme wurden mit dem Warnsystem in Indonesien tausende Erdbeben und mehr als zehn Tsunami erfolgreich registriert.

Insgesamt waren mehr als 120 Wissenschaftler von sieben deutschen Forschungsinstituten an der Entwicklung und am Aufbau des Systems beteiligt. Mitarbeiter des GFZ koordinierten das Projekt und leisteten maßgebliche Beiträge zu allen Einzelkomponenten. Im Ernstfall beträgt die Zeit zwischen einem Erdbeben und dem Auflaufen der Welle an der Küste nur rund zwanzig Minuten. Den Kern des Frühwarnsystems bildet deshalb die schnelle und zuverlässige Erfassung von Erdbeben. Dazu stellten die deutschen Forscher zusammen mit Wissenschaftlern aus Indonesien, Japan und China ein dichtes Netz von 160 seismischen Messstationen auf. Allerdings lässt sich aufgrund seismischer Messungen allein nicht entscheiden, ob ein Erdbeben einen Tsu-

*Blick in den Kontrollraum
des GITEWS-Warnzentrums
in Jakarta*





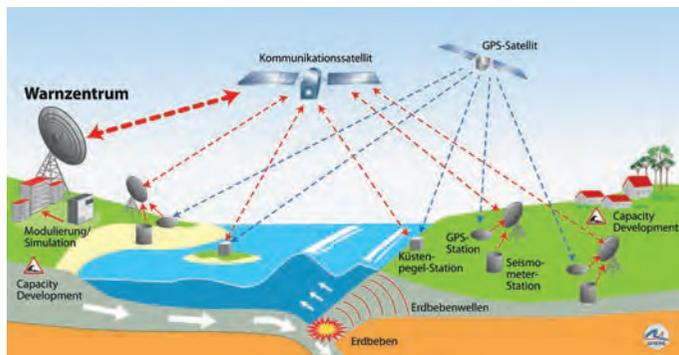
Die Ausbreitung des Tsunami vom Dezember 2004

nami erzeugt hat oder nicht. Deshalb stellten die Forscher empfindliche GPS-Stationen an Land und auf vorgelagerten Inseln auf, mit denen Bodenverschiebungen von wenigen Zentimetern erfasst werden können. Derartige Messungen enthalten wichtige Informationen über den Mechanismus des Erdbebens und sind damit ein entscheidender Indikator für die Entstehung eines Tsunami. An den Küsten wurden

zusätzlich Pegel zur Dauermessung des Wasserstands eingerichtet.

Die Messdaten der insgesamt über 300 Sensoren werden per Satellit, Funk oder Telefon in Echtzeit zu dem Warnzentrum in Jakarta übertragen. Dort erfasst eine ebenfalls am GFZ entwickelte Software in Sekundenschnelle die einlaufenden Messdaten und wertet sie automatisch aus. Die Rechner wurden zusätzlich mit den Ergebnissen eines eigens für das Warnsystem entwickelten Programms gefüttert, das Tsunamiwellen in den Gewässern Indonesiens simuliert. Diese digitale Bibliothek enthält derzeit mehr als dreitausend verschiedene Szenarien. Aus allen diesen Daten zeichnen

Schematischer Aufbau des GITEWS mit seinen Teilkomponenten



die Computer schließlich eine Lagekarte, welche die Höhe und die Ankunftszeit eines Tsunami für jeden Küstenabschnitt zeigt. Sie ist wiederum die Grundlage für differenzierte Warnmeldungen, die

dann an die einzelnen Verwaltungsbezirke in Indonesien verschickt werden.

Im Rahmen des Projektes ging es aber nicht ausschließlich um den Aufbau des eigentlichen Warnsystems für Indonesien und andere Anrainerstaaten des Indischen Ozeans. Bei der Entwicklung von GITEWS ergaben sich auch zahlreiche Fragestellungen, die nur mit geowissenschaftlicher Grundlagenforschung beantwortet werden können. So stellten GFZ-Mitarbeiter beispielsweise fest, dass sich eine neue GPS-Messtechnik gemeinsam mit ausgefeilten Modellrechnungen außergewöhnlich gut dazu eignet, um festzustellen, ob ein Erdbeben einen Tsunami auslösen konnte oder nicht.

Mit der Übergabe des Warnsystems an Indonesien ist das Projekt aber noch längst nicht abgeschlossen. Neben einem umfangreichen akademischen und technischen Trainingsprogramm für indonesische Wissenschaftler und Ingenieure erarbeiteten die deutschen Forscher auch Konzepte und Strategien zur Vorsorge und dem Management von Katastrophen.

Am GFZ wurde außerdem ein Zentrum für Tsunami-Frühwarnung eingerichtet, um wissenschaftliches Know-how in entsprechende Technologien umzusetzen. Mittlerweile weiß man nämlich, dass nicht nur die Küsten des Pazifischen und des Indischen Ozeans durch Tsunami gefährdet sind. Diese Killerwellen kommen – wenngleich weniger häufig – auch im Atlantik und sogar im Mittelmeer vor. Gerade zwischen Gibraltar und dem Suez-Kanal ist eine Tsunami-Warnung aber besonders schwierig, denn im Vergleich zu den großen Ozeanen ist das Mittelmeer relativ klein und damit sind die Warnzeiten entsprechend kurz. Trotz aller Forschung und Entwicklung sind sich die GFZ-Wissenschaftler bewusst, dass Naturereignisse wie ein Tsunami nicht verhindert werden können. Solche Katastrophen werden auch bei perfekt arbeitenden Alarmsystemen weiterhin ihre Opfer fordern. Das Ziel ihrer Arbeit ist es aber, die Auswirkungen einer solchen Naturkatastrophe mit einem Frühwarnsystem zu minimieren.

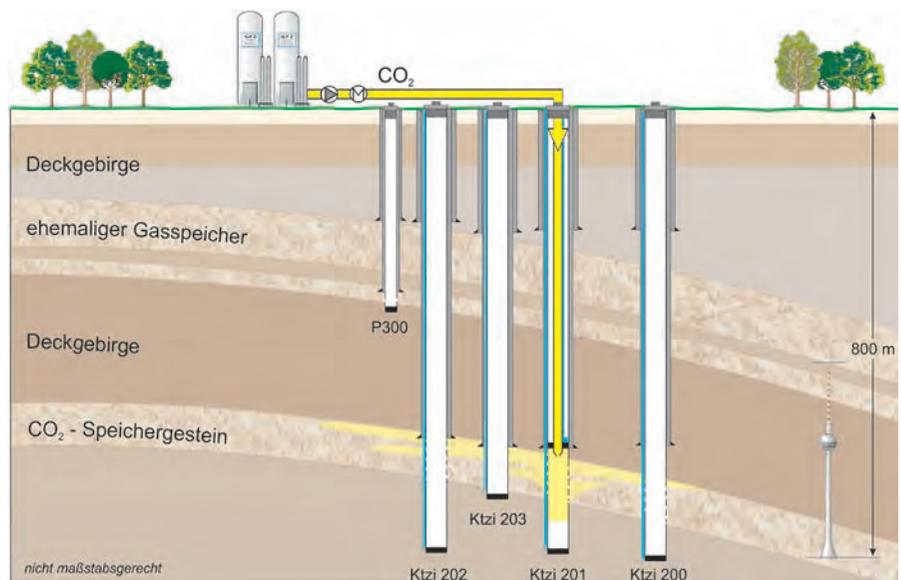
Klimaschutz tief in der Erde: CO₂-Speicherung unter Tage

Wie kann man der seit Beginn des Industriezeitalters stetig steigenden Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre begegnen? Eine Möglichkeit, den Ausstoß des Treibhausgases zu verringern, besteht darin, das CO₂ aus den Rauchgasen von Kohle- und Biomassekraftwerken sowie Stahl- und Zementwerken und der Petrochemie abzuscheiden und es dann langfristig und sicher zu lagern. Als besonders vielversprechende Lagerplätze gelten die feinen Porenräume von Sandsteinformationen in der Erdkruste. Die Poren sind dabei oft mit salzhaltigem Wasser gefüllt. In der Nähe des im Havelland westlich von Berlin gelegenen Ortes Ketzin/Havel untersuchen Forscher des GFZ in einem großangelegten Feldversuch die Grundlagen einer solchen Speicherung und prüfen ihre praktische Verwirklichung. Im ersten derartigen Projekt auf dem europäischen Kontinent wird dort seit dem Juni 2008 Kohlendioxid sicher und verlässlich etwa 650 Meter tief in den Untergrund gepumpt.

Auf den ersten Blick erscheint es schwierig, ein Gas unter Tage speichern zu wollen. Gas hat eine geringere Dichte als das ansonsten im Gestein vorhandene Wasser und ist daher bestrebt, aufzusteigen. Durch vorhandene Klüfte und Risse, die in der Erdkruste weit verbreitet sind, könnte es anschließend wieder an der Erdoberfläche austreten. Die Natur macht es uns aber in Erdgaslagerstätten vor, dass Gase zum Teil Millionen von Jahre ohne Leckagen unter Tage verbleiben. Es gibt nämlich Gesteinsschichten, die für Flüssigkeiten und Gase so gut wie undurchlässig sind. Oberhalb von gasführenden Gesteinen gelegen verhindern sie ein Aufdringen des Gases und halten es an Ort und Stelle. Allerdings verhält sich CO₂ im Gestein anders als Erdgas. Deshalb ist umfangreiche For-

schung notwendig, bevor Kohlendioxid im industriellen Maßstab in unterirdische Speicher gepumpt werden kann. Völlig neu ist die Idee des Einpumpens von CO₂ in den Untergrund allerdings nicht, denn dieses Gas wird in Öl- und Gasfelder gepresst, um die Förderleistung zu erhöhen. In Ketzin ist ein auf der Welt einmaliges Feldlabor entstanden, in dem unter der Leitung des GFZ Wissenschaftler aus Deutschland, Europa und vielen anderen Ländern die offenen Fragen der Speicherung von Kohlendioxid untersucht werden. Zu den Partnern gehören neben Großforschungseinrichtungen, Universitäten und der Industrie auch Regierungsbehörden.

Aufstellung des Pilotprojekts zur geologischen CO₂-Speicherung in Ketzin





*Arbeiten an der
Einspeisungsanlage*

*CO₂ beim Übergang vom
flüssigen in den
gasförmigen Zustand*



Durch geowissenschaftliche Untersuchungen hatten die Forscher zunächst festgestellt, dass es unter Ketzin oberhalb einer porösen, mit Salzwasser gesättigten Sandsteinschicht, eine nahezu undurchlässige, 210 Meter mächtige Tonsteinschicht gibt. Sie verhindert das ungewollte Austreten von Gasen. Anschließend wurde dort eine Demonstrationsanlage gebaut, in der das im verflüssigten Zustand per LKW angelieferte CO₂ auf 50 Grad erwärmt und dann im gasförmigen Zustand unter erhöhtem Druck in die Sandsteinschicht gepumpt wird. Dabei verdrängt es das in den Gesteinsporen vorhandene Salzwasser und breitet sich in der Sandsteinschicht aus. Im Laufe der Zeit wird das CO₂ im Gestein gebunden, beispielsweise durch Kapillarkräfte, durch die Lösung des Gases im Salzwasser und durch die Ausfällung von Karbonatmineralen. Insgesamt wollen die Forscher bis 2013 etwa 70 000 Tonnen CO₂ in den Forschungsspeicher unter Ketzin einbringen.

Diese CO₂-Speicherung wird von einem umfangreichen Forschungsprogramm begleitet. Dabei untersuchen die Forscher nicht nur, wie dicht der Speicher wirklich ist. Sie wollen auch herausfinden, wie die Gesteine und Fluide in der Erdkruste im Detail mit dem CO₂ reagieren. Außerdem wird verfolgt, ob und wie das reiche mikrobielle Leben in den Gesteinsschichten unter Tage durch das Einpumpen von Kohlendioxid beeinflusst wird. Mit verschiedenen Messverfahren untersuchen Geophysiker von der Erdoberfläche aus, wie sich das CO₂ in der Speicherformation ausbreitet und in wie weit es die Poren im Gestein tatsächlich füllen kann. Nirgendwo sonst auf der Erde hatten Forscher bisher die Möglichkeit, dieses allmähliche Füllen einer porösen Sandsteinformation mit Kohlendioxid unmittelbar am Ort des Geschehens zu verfolgen. Deshalb installierten sie in Ketzin das weltweit umfangreichste Beobachtungs- und Überwachungssystem für solche Versuche. Dazu gehören auch zwei Beobachtungsbohrungen, die es den Forschern erlauben, das Einbringen von CO₂ auch in der Tiefe und nicht nur von der Erdoberfläche aus zu messen und zu beobachten.

Alle in diesem Feldlabor aufgezeichneten Informationen gehen in Computermodelle ein, welche die Geologie des Untergrundes sowie die physikalischen und chemischen Prozesse abbilden und quantifizieren können. Mit umfangreichen Messungen überprüfen die Forscher, ob diese Modelle das Verhalten des Kohlendioxids im Speicher widerspiegeln und wie genau sie es berechnen können. Denn nur wenn die Modelle diese Prüfungen an Wirklichkeit bestehen, können sie künftig dazu benutzt werden um vorherzusagen, ob eine sichere Speicherung von CO₂ unter Tage tatsächlich langfristig ohne Leckagen möglich ist.

Brennendes Eis: Die Erforschung der Gashydrate

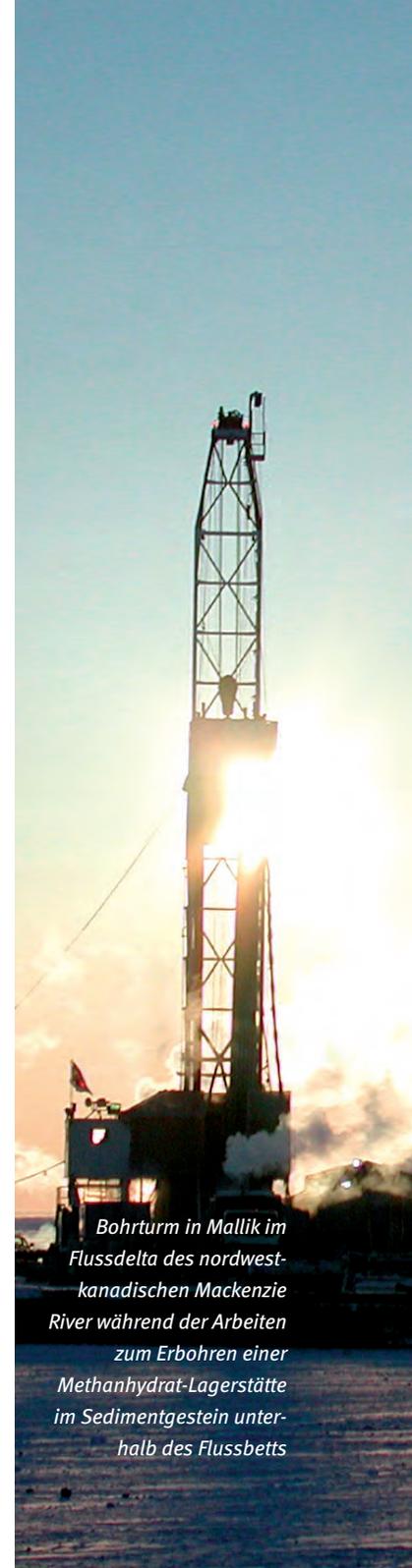
Sie bestehen aus Wasser und Gas, sind aber dennoch ein fester Stoff. Bei normalem Luftdruck zerfallen sie mit lautem Zischen, wenn man sie anzündet verbrennen sie in einer gelblichen Flamme. Was auf den ersten Blick als kuriose Wissenschaftsrätsel erscheint, entpuppt sich bei genauem Hinsehen jedoch als ein äußerst realer Stoff. Diese sogenannten Gashydrate haben nicht nur außergewöhnliche Eigenschaften, in ihnen steckt auch ein Energieschatz, der etwa zweieinhalb Mal so groß ist wie alle bekannten Erdöl- und Erdgasvorräte auf der Welt zusammen. Außerdem verleihen sie den Kontinentalhängen in vielen Ozeanen Stabilität und gelten als ein effektiver Klimaregulator, der im Laufe der Erdgeschichte mehr als einmal den Treibhauseffekt stark beeinflusst hat. Gründe genug also, dass sich Forscher in mehreren Sektionen des GFZ intensiv mit diesen einzigartigen Molekülen beschäftigen.

Bei den Gashydraten bilden Wassermoleküle eine Käfigstruktur, in denen Gastmoleküle, beispielsweise Kohlenwasserstoffe, eingeschlossen werden. Meistens ist es Methan, das sich mit Wasser zu diesen sogenannten Clathraten verbindet. Sie können aber auch mit höheren Kohlenwasserstoffen oder Kohlendioxid entstehen. Gashydrate sind nur bei hohem Druck und niedrigen Temperaturen stabil, sonst zerfallen sie. Weil sie bei flüchtigem Hinsehen große Ähnlichkeit mit normalem Wassereis haben, werden sie oft auch als „Methaneis“ bezeichnet.

In der Natur kommen Gashydrate vornehmlich in zwei Regionen vor, nämlich in den Permafrostgebieten der Arktis und in Sedimenten der Ozeane. In Permafrostgebieten bilden sich

die Gashydrate unterhalb des Dauerfrostes, wenn geeignete Druck und Temperaturbedingungen vorherrschen. Unterhalb der Gashydrate können sich Erdgaslagerstätten befinden, aus denen ständig etwas Methan in die Sedimentschichten eintritt, in denen sich bei genügend hohem Druck mit dem vorhandenen Wasser Gashydrate bilden. Den weitaus größten Teil der Gashydrate gibt es jedoch in den Meeresedimenten bei Wassertiefen von mehr als 400 Metern. Dort ist der hydrostatische Druck so groß, dass Gashydrate auch oberhalb des Gefrierpunktes entstehen können. Das Methan stammt dabei entweder ebenfalls aus tieferliegenden fossilen Erdgaslagerstätten. In vielen Fällen ist es aber auch ein frisches Zersetzungsprodukt organischer Stoffe in jungen Sedimenten. Aufgrund ihrer kristallinen Struktur wirken Gashydrate in den Meeresedimenten wie Zement, denn sie verdrängen das Wasser aus den Porenräumen und verfestigen den Schlamm.

Die insgesamt auf der Welt im Methaneis enthaltene Menge an Kohlenstoff ist enorm. Denn obwohl ein Kubikmeter Gashydrat zu etwa 80 Prozent aus Wassermolekülen besteht, ist im Rest derart viel Methan enthalten, dass es als Gas bei normalem Luftdruck und Zimmertemperatur ein Volumen von fast 180 Kubikmetern einnehmen würde. Weil die Gashydrate in den Meeressedimenten so weit verbreitet sind, schätzt man, dass dort etwa die dreitausendfache Menge an Kohlenstoff gebunden ist, der im Methan der Atmosphäre enthalten ist. Kommerziell abgebaut, wäre das untermeerische Methaneis also eine riesige Ressource von Kohlenwasserstoff. Durch Meerereswärmung freigesetzt, trüge das Methan dagegen erheblich zum Treibhauseffekt bei.

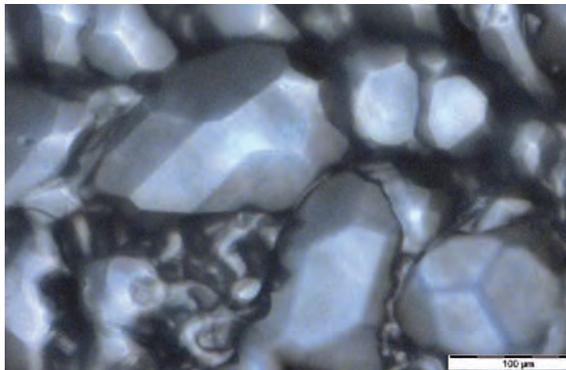


Bohrturm in Mallik im Flussdelta des nordwestkanadischen Mackenzie River während der Arbeiten zum Erbohren einer Methanhydrat-Lagerstätte im Sedimentgestein unterhalb des Flussbetts

Synthetisch erzeugtes Gashydrat im Laborversuch. Das im Wassergitter eingefangene Methan brennt.



Methanhydrate unter dem Mikroskop



Um die einzigartigen Eigenschaften des Methaneises zu verstehen, ist noch viel Grundlagenforschung notwendig. So bestimmen Forscher in GFZ-Laboratorien die thermodynamischen, kinetischen und physikalischen Parameter natürlicher Gashydratproben und von synthetischen, gemischten Hydraten. Dabei untersuchen sie insbesondere, wie diese Stoffe entstehen und unter welchen Bedingungen sie zerfallen und wieviel Energie benötigt wird, um bei der Förderung von Gas aus hydratführenden Sedimenten die natürlichen Hydrate zu zersetzen. Solche grundlegenden Untersuchungen haben auch praktische Anwendungen: So suchen die Forscher am GFZ nach innovativen Methoden zur Gasförderung. In einer Versuchsanlage werden diese Methoden

getestet, bevor sie in einem Feldversuch eingesetzt werden. Eine weitere, eher angewandte Forschungsrichtung untersucht, wie sich aus Industrieanlagen abgeschiedenes Kohlendioxid in Gashydraten lagern lässt. Im Idealfall könnten diese beiden Anwendungen sogar miteinander verbunden werden. Neben den experimentellen Arbeiten werden jedoch auch Simulationen durchgeführt, die die Ergebnisse aus den kleinen Dimensionen des Laborversuchs auf die großen Dimensionen der natürlichen Umgebung hochrechnet. Dies ist wichtig, um die Rolle der Gashydrate in dem komplexen System Erde zu verstehen. Am GFZ ist man in Sachen Methaneis aber nicht nur im Labor oder am Rechner tätig. Im Rahmen eines internationalen Forschungsprogramms untersuchten die Potsdamer Wissenschaftler auch Gashydrate im Permafrost. Dazu wurde im Mackenzie-Delta im hohen Norden Kanadas (Mallik) eine Gashydratlagerstätte angebohrt, beprobt und Methoden der Gasförderung untersucht.



Wissenschaftlicher Vorstandsbereich	Administrativer Vorstandsbereich	Administration				
Forschungsbereich Erde & Umwelt, F&E-Planung, Öffentlichkeitsarbeit Dr. O. Bens	Forschungsbereich Energie, EU-Angelegenheiten, Technologietransfer Dr. U. Schneider	Rechtsangelegenheiten, Organisation und Controlling, Innenrevision	V1 Personal- und Sozialwesen Dr. B. Hörstrup	V2 Haushalt und Finanzen C. Schippmann	V3 Beschaffung und Materialwirtschaft M. Röpke	V4 Allgemeine und technische Dienste Dr. M. Pestke

Erdsystemanalyse					Erdsystem- management	Erdsystem- beobachtung
Department 1 Geodäsie und Fernerkundung	Department 2 Physik der Erde	Department 3 Geodynamik und Geomaterialien	Department 4 Chemie und Stoffkreisläufe der Erde	Department 5 Prozesse der Erdoberfläche	Geoengineering- Zentren	Wissenschaftliche Infrastrukturen
Prof. H. Schuh	Prof. M. Weber	Prof. O. Oncken	Prof. J. Erzinger	Prof. B. Merz	Dr. J. Lauterjung	
1.1 GPS/Galileo-Erdbeobachtung Prof. H. Schuh	2.1 Erdbebenrisiko und Frühwarnung Prof. T. Dahm	3.1 Dynamik der Lithosphäre Prof. O. Oncken	4.1 Reservoir-technologien Prof. E. Huenges	5.1 Geomorphologie Prof. N. Hovius	Zentrum für Geologische Speicherung CGS Dr. A. Liebscher	Modular Earth Science Infrastructure Prof. M. Weber
1.2 Globales Geomonitoring und Schwerfeld Prof. F. Flechtner	2.2 Geophysikalische Tiefensondierung Prof. M. Weber	3.2 Geomechanik und Rheologie Prof. G. Dresen	4.2 Anorganische und Isotopengeochemie Prof. J. Erzinger	5.2 Klimadynamik und Landschaftsentwicklung Prof. A. Brauer	Internationales Geothermiezentrum ICGR Prof. E. Huenges	Observatorien • Globale Netzwerke • Erdsystemobservatorien Prof. O. Oncken
1.3 Erdsystem-Modellierung Prof. M. Thomas	2.3 Erdmagnetfeld Prof. M. Weber (kommissarisch)	3.3 Chemie und Physik der Geomaterialien Prof. W. Heinrich	4.3 Organische Geochemie Prof. B. Horsfield	5.3 Hydrogeologie Prof. M. Kühn	Zentrum für integrierte Kohlenwasserstoffforschung CIHR (in Gründung) Prof. B. Horsfield	• TERENO-Nordost / Geoökol. Forschung Prof. B. Merz (kommissarisch)
1.4 Fernerkundung Prof. H. Kaufmann	2.4 Seismologie Prof. F. Tilmann	3.4 Oberflächennahe Geochemie Prof. F. v. Blanckenburg	4.4 Sedimentbeckenanalyse Dr. M. Scheck-Wenderoth	5.4 Hydrologie Prof. B. Merz	Zentrum für Frühwarnung EWS Dr. S. Parolai	Wissenschaftliches Bohren Dr. U. Harms
1.5 Geoinformatik Prof. D. Dransch	2.5 Geodynamische Modellierung Dr. S. Sobolev		4.5 Geo-Mikrobiologie Prof. D. Wagner		Zentrum für GeoInformationsTechnologie CeGIT Prof. J. Wächter	Rechenzentrum R. Kopsischke
	2.6 Erdbebengefährdung und Spannungsfeld Prof. G. Grünthal				Personalrat Dr. H. Schelle	Bibliothek und Informationsdienste LIS R. Bertelmann
					Gleichstellungsbeauftragte Dr. U. Weckmann	

Wenn Sie mehr wissen wollen

Auskunft über das GFZ erteilt die
Öffentlichkeitsarbeit, Franz Ossing.
Er ist unter der Adresse
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg, 14473 Potsdam,
über Telefon (0331-28810 40), Fax (0331-28810 44)
und E-Mail (ossing@gfz-potsdam.de) zu erreichen.

Das Internet bietet unter www.gfz-potsdam.de
eingehende Informationen über das GFZ.

Unterrichtsergänzende Materialien für Schulen
finden sich ebenfalls dort:
<http://schule.gfz-potsdam.de>

IMPRESSUM

Herausgeber:

Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Stiftung des Öffentlichen Rechts des Landes Brandenburg
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Tel.: +49 331 288 0
www.gfz-potsdam.de

Verantwortlich i.S.d.P.: Franz Ossing**Konzept und Text:** Horst Rademacher**Layout:** Stephen Ruebsam, unicom-berlin.de,
Grit Schwalbe, GFZ**Druck:** Druckerei Arnold, Großbeeren
5. Auflage,
Februar 2013**Bildnachweis:**

Alle Abbildungen GFZ, außer Seite 8: Lutz Hannemann; Seite 9: Marie Tharp; Seite
14 Inlay: Astrium; Seite 15 rechts: GFZ/Astrium; Seite 21 oben links: H. Frater/GFZ;
S. 31 oben: ESA/AOES Medialab



Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Tel.: +49 (0)331 288-0
www.gfz-potsdam.de