

# System Erde

GFZ-Journal

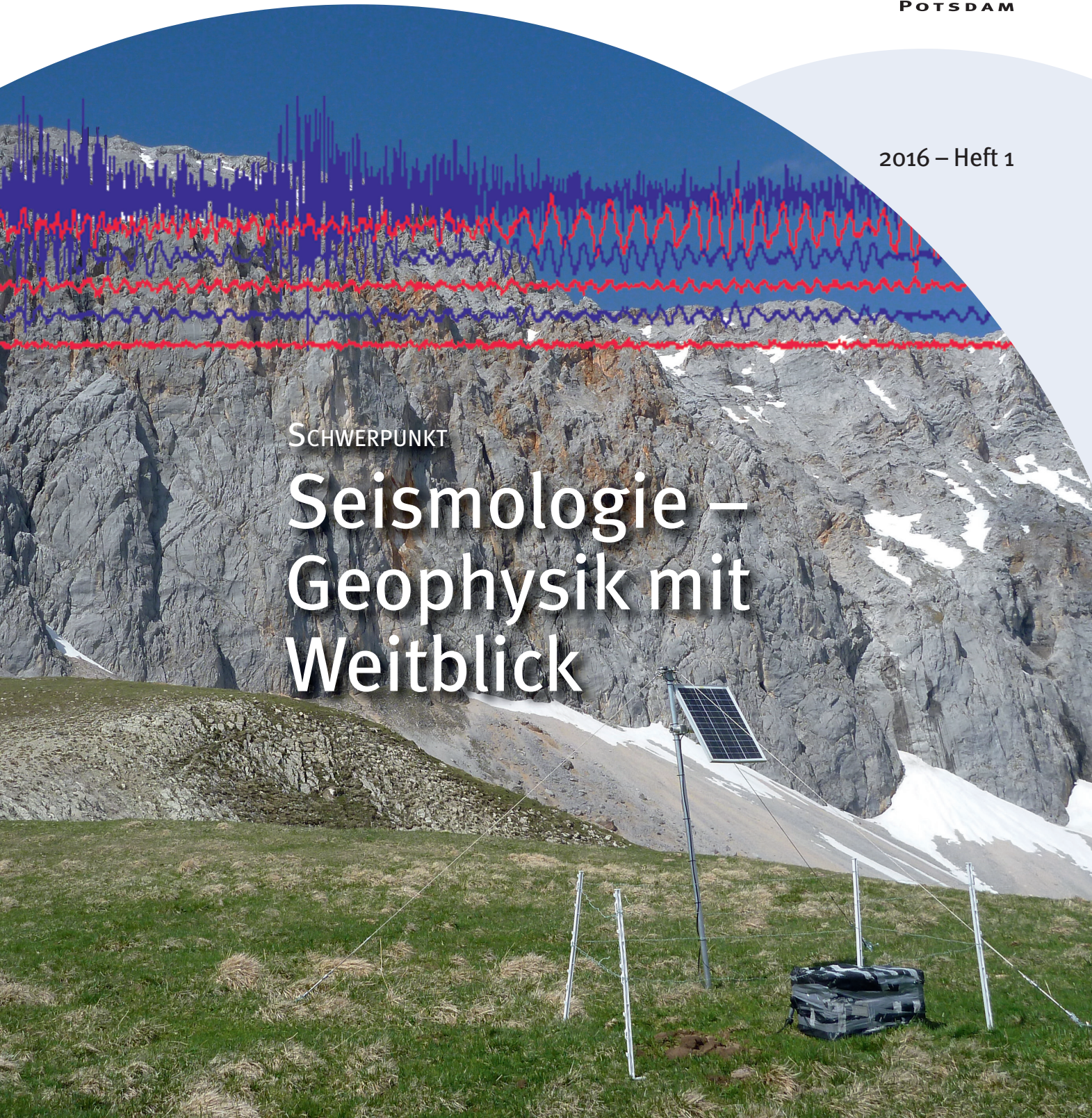
**GFZ**

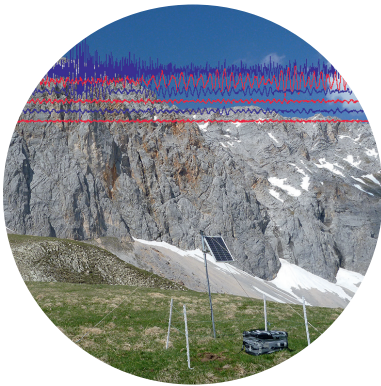
Helmholtz-Zentrum  
**POTS DAM**

2016 – Heft 1

SCHWERPUNKT

## Seismologie – Geophysik mit Weitblick





## Titelbild

*Seismische Messstation im Wettersteingebirge. Die Station ist Teil eines Steinschlag-Observatoriums in der Nähe der Zugspitze, das neben einem Netzwerk von Seismometern auch Wetterstationen und Kameras umfasst. Die Seismometer zeichnen Erschütterungen auf, die von Steinschlägen und anderen Oberflächenprozessen, wie etwa Sedimenttransport in Flüssen und Erdrutschen, ausgelöst werden. Die seismischen Daten ermöglichen es, diese Prozesse voneinander zu unterscheiden, ihre Wechselbeziehungen zu erforschen, sie räumlich und zeitlich genau einzuordnen sowie ihre Größe abzuschätzen.*

*Seismogramm (oberer Bildbereich): Erdbeben der Stärke  $M=8,1$  am 1. April 2014 (UTC) nahe der Stadt Iquique in Chile, aufgezeichnet von der GEOFON-Station in Flechtingen (Deutschland) in rund 11 200 km Entfernung*

*Foto: Dr. Anne Schöpa, GFZ*

## Impressum

### Herausgeber:

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

Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

### Redaktion:

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

### Layout:

Grit Schwalbe, GFZ

### Druck:

Brandenburgische Universitätsdruckerei, Golm

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ 2016  
ISSN 2191-8589

Alle Abbildungen GFZ, soweit nicht anders gekennzeichnet



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

# Editorial

## Seismologie – Geophysik mit Weitblick



Am 17. April 1889 suchte Ernst von Rebeur-Paschwitz auf dem Telegrafenberg zu Potsdam den Standort seines Messgeräts im Keller des heutigen Gebäudes A31 auf, mit dem er die Gezeiten der Erdkruste aufzeichnete. Er fand einen ungewöhnlich starken Ausschlag in der Messkurve, den er zunächst für eine Störung der Messapparatur hielt. Ein gleichartiges Messgerät, das der junge Wissenschaftler in Wilhelmshaven betrieb, zeigte aber ein vergleichbares Signal. Die Ursache ließ sich schnell feststellen: ein Erdbeben im pazifischen Raum in der Nähe Japans. Von Rebeur-Paschwitz war die weltweit erste Fernaufzeichnung eines über 9000 Kilometer entfernten Erdbebens gelungen. Darüber berichtete er in *Nature*, so entstand

im Juli 1889 die erste Publikation der Forschungseinrichtungen auf dem Potsdamer Telegrafenberg in diesem angesehenen Wissenschaftsmagazin.

Von Rebeur-Paschwitz' Aufzeichnungen, seine Publikation und die anschließende Diskussion im Rahmen der Preußischen Akademie der Wissenschaften markieren den wesentlichen Anstoß zur Begründung der globalen Seismologie mit dem Ziel, weltweit Erdbeben zu erfassen und zu lokalisieren. Seit diesen ersten Anfängen hat sich die Seismologie hochdynamisch weiterentwickelt. Ihre Anwendungsgebiete reichen von der Rohstoffexploration über die Erdbebenforschung einschließlich der Entwicklung von Frühwarnsystemen bis hin zur Erkundung des Aufbaus des Erdkörpers vom Erdkern bis zur Oberfläche.

Natürliche Seismizität, von lokalen Erschütterungen bis zu Katastrophenbeben, gehört zur täglichen Lebensäußerung unseres dynamischen Planeten Erde. Moderne Messgeräte, eine große Dichte an Messstationen und moderne Auswerteverfahren erlauben heute einen Blick in die seismische Aktivität der Erde, der noch vor wenigen Dekaden unvorstellbar gewesen wäre. Zwar wird die Vorhersage von Erdbeben auf absehbare Zeit nicht möglich sein, aber die Abschätzung der seismischen Gefährdung hat sich in den vergangenen Jahren weltweit als gutes Verfahren zur Minderung der Auswirkungen von Erdbeben auf die menschliche Gesellschaft etabliert. Möglich wurde das durch die Zusammenarbeit mit anderen, nicht nur geowissenschaftlichen Disziplinen, die einen völlig neuen Blick auf die dynamischen Prozesse unseres Planeten und die daraus resultierenden Risiken und Gefahren ermöglicht.

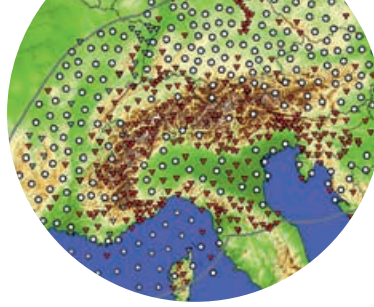
Die Seismologie gehört zur DNA des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ, das mit seinem GEOFON das zweitgrößte globale seismologische Messnetz betreibt. Mit der Mess- und Auswertungssoftware SeisComP3 hat das GFZ einen weltweiten Standard geschaffen und der Wissenschaft sowie dem Katastrophenschutz zur Verfügung gestellt; seine Qualität hat das Programmpaket als Herzstück des Tsunami-Frühwarnsystems im Indischen Ozean mehrfach unter Beweis gestellt.

Die Erfassung von Erdbeben ist essentiell zur korrekten Risikoabschätzung. Historische Quellen können Aufschluss über die seismische Gefährdung in Regionen geben, in denen die Wiederholungsraten Hunderte von Jahren betragen, wo also verlässliche Messaufzeichnungen über solche Zeiträume nicht existieren. Hier müssen Geowissenschaftler mit Sozialwissenschaftlern und Historikern gemeinsam die überlieferten Quellen prüfen, um schließlich Empfehlungen abgeben zu können, auf deren Basis die ökonomische Last erdbebensicherer Bauens mit geowissenschaftlicher Gewichtung abgeglichen werden kann.

Die vorliegende Ausgabe des GFZ-Journals „System Erde“ soll einen Einblick in die am GFZ betriebene Forschung zur Seismologie geben. Wir wünschen eine informative Lektüre.

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

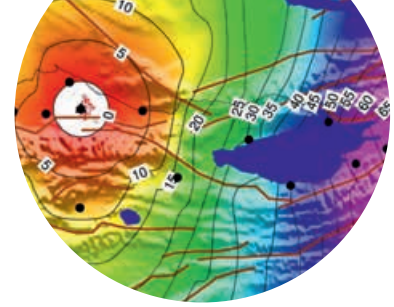
Dr. Stefan Schwartz  
Administrativer Vorstand



# Inhalt

- 6** Die vielfältigen Anwendungsfelder der Seismologie  
*Frederik Tilmann*
- 12** Seismisches Abbilden von Krustenstrukturen  
*Klaus Bauer, Trond Ryberg, Benjamin Braeuer, Christian Haberland, Michael Weber*
- 18** Die Streuung des globalen seismischen Wellenfelds  
*Christoph Sens-Schönfelder und Roel Snieder*
- 24** Neue Einsichten in den Ablauf großer Erdbeben  
Kombination innovativer Analyseverfahren erlaubt Rekonstruktion von Bruchverläufen  
*Frederik Tilmann, Bernd Schurr, Simone Cesca, Torsten Dahm, Joachim Saul, Mauro Palo, Marcos Moreno, Jonathan Bedford, Onno Oncken, Rongjiang Wang, Yong Zhang*
- 32** Auf dem Weg zur Schadensabschätzung in Echtzeit  
Dezentralisierte regionale und Vor-Ort-Frühwarnung in ACROSS  
*Stefano Parolai, Tobias Boxberger, Marco Pilz, Dino Bindi, Massimiliano Pittore, Marc Wieland, Kevin Fleming, Michael Haas, Adrien Oth, Claus Milkereit, Torsten Dahm, Jörn Lauterjung*

<b>74</b>	<b>Netzwerk</b>	<b>77</b>	Erdwärme verursacht schnellen Eisfluss und Gletscherschmelze in Grönland
74	Wie brechen Kontinente auseinander? Neue Erkenntnisse aus Südafrika	78	Spuren isländischer Vulkanasche in nordostdeutschem See
74	Die maximale Erdbebenstärke in der nördlichen Türkei	79	Ozeanerwärmung führt zu stärkerer Meerwasserausdehnung als bisher angenommen
76	Seismologische Datenzentren in Zeiten von Big Data	79	Europäische Geothermieforschung nutzt Synergien
76	Grundsätze zum Umgang mit Forschungsdaten	80	Forschung zur saisonalen Wärmespeicherung im Untergrund



38

### Dynamische und hochauflösende Aktivitätsvorhersagen und Folgenabschätzung von Erdbeben

*Danijel Schorlemmer, Sebastian Hainzl, Arno Zang, Fabrice Cotton*

44

### Historische Seismologie

Schlüssel für verlässlichere Daten zur Abschätzung der Erdbebengefährdung

*Konrad Schellbach und Gottfried Grünthal*

50

### Von der Gesteinsprobe bis zur Plattengrenze: Skalenübergreifende Analyse von Bruchprozessen

*Marco Bohnhoff, Grzegorz Kwiatek, Georg Dresen*

56

### Vom Flüstern, Raunen und Grollen der Landschaft

Seismische Methoden in der Geomorphologie

*Jens M. Turowski, Michael Dietze, Anne Schöpa, Arnaud Burtin, Niels Hovius*

62

### Vulkanseismologie – ein Blick ins Innere der Vulkane

*Torsten Dahm, Eleonora Rivalta, Thomas R. Walter, Sebastian Heimann, Birger-Gottfried Lühr, Philippe Jousset*

68

### Trends in seismologischer Instrumentierung

*Christian Haberland, Rüdiger Giese, Jan Henningses, Karl-Heinz Jäckel, Philippe Jousset, Stefan Lüth, Thomas Reinsch, Trond Ryberg*

- 81 Zwanzig20-Forum Wärmewende: Öffentlicher Diskurs und Strategieentwicklung
- 81 Feldexperiment zur Sole-Injektion in geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher
- 82 Was haben Baustoffe und die Erforschung des Mars gemeinsam?
- 83 Kick-off Meeting für das EU-Projekt IMPREX
- 83 Drei neue EU-Trainingsnetzwerke

- 84 Kick-off-Meeting der chilenisch-deutschen Forschungsinitiative EarthShape

- 84 Internationale Zusammenarbeit

## 88 Ausgezeichnet

## 92 Bücher und Medien

# Die vielfältigen Anwendungsfelder der Seismologie

Frederik Tilmann

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Seismology is often associated with the investigation of earthquake processes and indeed this is a very important target of the science. However, seismology is also the primary means by which we can obtain images of the internal structure of the Earth on all scales, ranging from the deep interior, i.e. the Earth's core and lower mantle over the mantle lithosphere and crust, the scale at which plate tectonics 'happens' all the way to the unconsolidated material in the near-surface. Seismology uses earthquakes and artificial sources as signal generators but also the ambient background wavefield, previously considered to be merely noise. Methodological and instrumental innovations have allowed ever more detailed investigations of the earthquake process and the seismic structure, and opened up new targets such as as the monitoring of geomorphological events and investigations of the time-dependency of seismic structure. Finally seismology is not restricted to waveform analysis and the instrumental period but draws on historical data and, in the field of paleoseismology, geological markers to constrain seismic activity in the pre-instrumental past. Direct societal benefits from seismology accrue for example from improved seismic hazard estimates and early-warning technologies in the area of natural hazards, from improved recovery and usage of natural resources, including geothermal energy as a sustainable energy source and much more, e.g. the possibility to monitor and thus enforce compliance with the nuclear test ban treaty.*



Die Seismologie, also die Lehre von Erdbeben und der Ausbreitung elastischer Wellen, wurde im 19. Jahrhundert als quantitative Wissenschaft etabliert. Pionierarbeit hierzu leistete der irische Ingenieur Robert Mallet, der auch das Wort „Seismologie“ prägte. Nach der Entwicklung eines ersten Seismographen in 1875 zeigte die erste Aufnahme eines Fernbebens in 1889 die globalen Anwendungsmöglichkeiten der jungen Wissenschaft: der Astronom Ernst von Rebeur-Paschwitz (Abb. 1) hatte mit seinen Instrumenten in Wilhelmshaven und in Potsdam auf dem heutigen Gelände des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ ein Erdbeben aus Japan aufgenommen und ermittelte eine erste Abschätzung der Geschwindigkeit von Oberflächenwellen. Ausgehend von dieser Beobachtung propagierte Rebeur-Paschwitz die Idee eines weltweit operierenden Stationsnetzes, das seit Beginn des 20. Jahrhunderts quantitative Analysen von Großbeben ermöglichte. Ein weiterer wichtiger Schritt war der Aufbau des standardisierten Worldwide Seismic Networks in den 1960er Jahren, das grundlegende Beobachtungsdaten von global verteilten Erdbeben moderater Stärke lieferte und damit der Theorie der Plattentektonik den Weg bereitet hat. Die Digitalisierung in den 1980er Jahren ermöglichte die Prozessierung größerer Datenmengen. In den letzten zwei Jahrzehnten kam es zu einem explosionsartigen Anstieg der Zahl von permanent operierenden seismischen Sensoren. Das GEOFON-Netz des GFZ trägt mit 78 Stationen weltweit zu diesem globalen Instrument bei, das aus hunderten von Stationen besteht (Abb. 2); ergänzt durch die Daten der GFZ-Erdsystemobservatorien an Plattengrenzen (PBO) und temporäre Experimente kann so eine hohe Auflösung für fokussierte Studien erreicht werden (z. B. *Victor et al., 2011*).

Obwohl sich das Funktionsprinzip seismologischer Instrumente seit 100 Jahren nicht grundlegend geändert hat (*Haberland et al., 2016*), ergibt sich durch die Miniaturisierung der Instrumente die Möglichkeit, groß angelegte Feldexperimente mit Hilfe Hunderter mobiler Sensoren durchzuführen, oder sogar die Sensoren in Bohrlöcher einzubringen und damit näher an die Erdbebenquellen heranzukommen (*Bohnhoff et al., 2014*). Ziel der Untersuchungen kann entweder die Verteilung und Bruchprozesse der Erdbeben an sich sein, oder die Abbildung der Untergrundstruktur, wobei mit denselben Daten meist

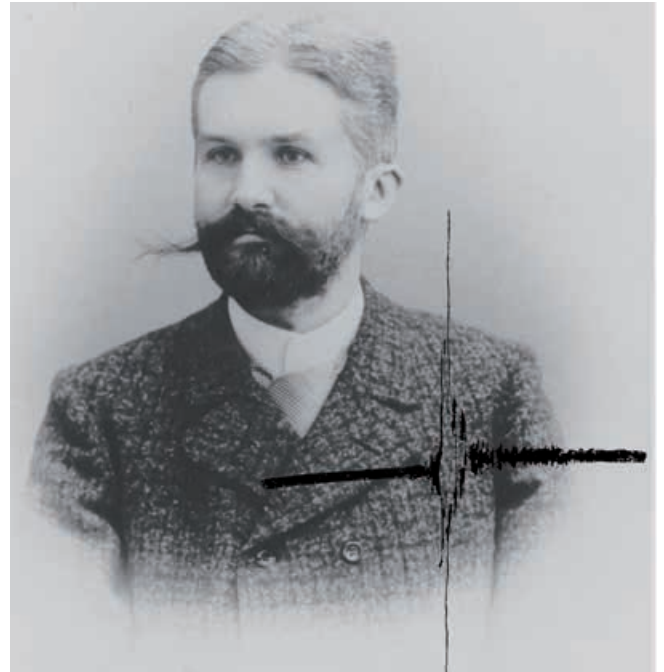


Abb. 1: Ernst von Rebeur-Paschwitz, dem 1889 in Potsdam die weltweit erste Fernaufzeichnung eines Erdbebens gelang

*Fig. 1: Ernst von Rebeur-Paschwitz, who successfully completed the world's first remote recording of an earthquake in 1889 in Potsdam*

beide Aspekte betrachtet werden. Bei Strukturuntersuchungen werden sowohl natürliche (kleinere Erdbeben oder Wellen von weltweit auftretenden Beben) als auch künstliche Quellen (z. B. kontrollierte Explosionen oder Hammerschläge) ausgewertet. Hierbei bedient man sich zweier Grundprinzipien: Zum einen kann man die Zeiten messen, zu denen verschiedene Wellentypen an den Stationen ankommen und daraus bei geeigneter Verteilung der Quellen und Stationen die Variationen der Geschwindigkeiten im Untergrund rekonstruieren. Diese seismische Tomographie (Abb. 3C) ähnelt dem Prinzip der Röntgentomographie in der Medizin. Zum anderen werden seismische Wellen reflektiert, oder von Kompressions- in Scherwellen (Transversalwellen) oder umgekehrt konvertiert, wenn sie im Untergrund auf eine Schichtgrenze stoßen, an der sich die elastischen Eigenschaften des Gesteins ändern. Aufzeichnungen der reflektierten oder konvertierten Wellen können benutzt werden, um ein Bild der Struktur des Untergrunds zu erzeugen (Abb. 3B), vergleichbar mit dem Einsatz von Ultraschall in der medizinischen Diagnostik. Meist werden beide Ansätze in Kombination verwendet.

In der Auflösung von Krusten- oder Sedimentstrukturen kommt meist Seismik, d. h. Seismologie mit künstlichen Quellen zum Einsatz (*Bauer et al., 2016*). Die aufgelösten Strukturen geben Aufschluss über die Lage von Verwerfungen oder die Stratigraphie, während die aus der Tomographie

Links: Installation einer seismischen Station des AlpArray-Experiments in einem Tunnel in Österreich (Foto: T. Zieke, GFZ)

Left: A station of the AlpArray experiment is installed in a tunnel in Austria



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

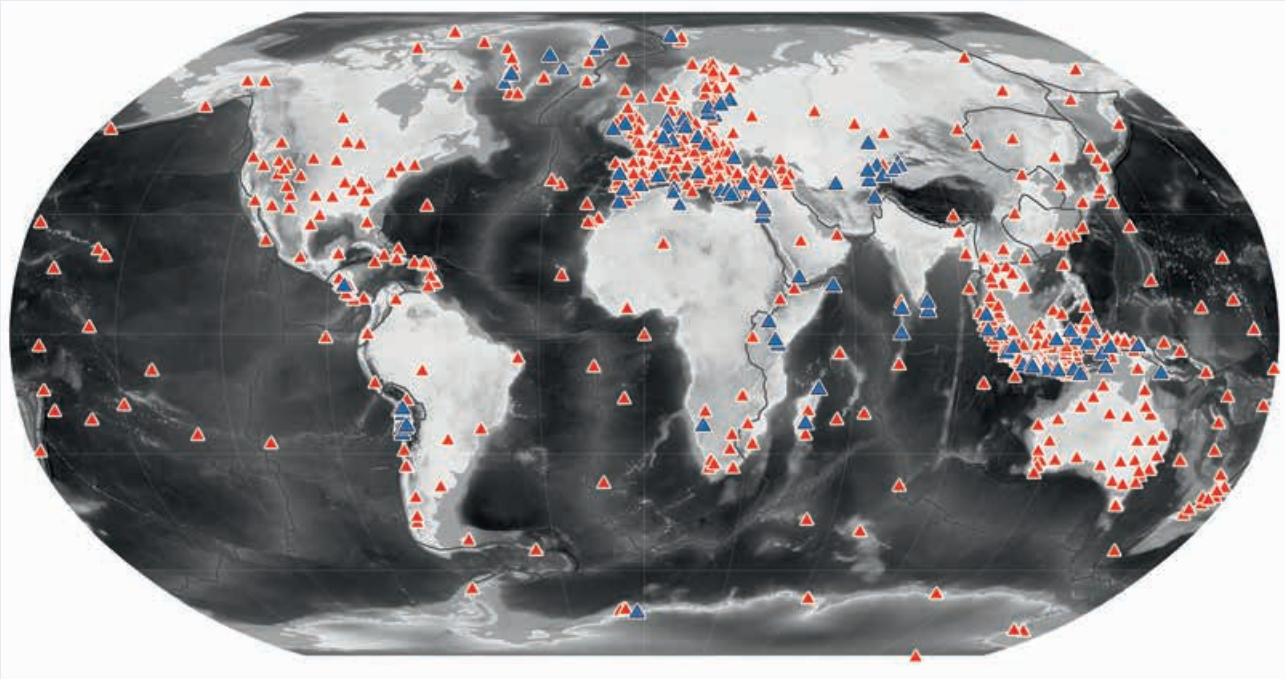


Abb. 2: Karte der Stationen, die zum GEOFON-Monitoring beitragen (blaue Dreiecke: Stationen, die das GFZ mit seinen Partnern betreibt (GEOFON-Stationen und PBO-Stationen; rote Dreiecke: Netze anderer Institutionen). Die Zahl der Stationen mit offen zugänglichen Daten ist noch erheblich größer als hier gezeigt.

Fig. 2: Distribution of stations contributing to GEOFON earthquake monitoring (blue triangles: GEOFON and GFZ PBO stations; red triangles: networks from other institutions). The total number of openly accessible stations is still much larger than shown here.

gewonnenen Geschwindigkeitsinformationen Rückschlüsse auf Gesteinstypen, Temperaturen oder das Vorhandensein von Fluiden zulassen. Diese Methoden sind auch essentiell für die Rohstoff-Exploration, wobei mit modernen Methoden das ganze Wellenfeld abgetastet wird und Modelle von solcher Auflösung erstellt werden, dass begrabene fossile Landschaften rekonstruiert und Lagerstätten identifiziert werden können. Wenn die Mantellithosphäre untersucht oder die Position der kontinentalen Mohorovičić-Diskontinuität flächig kartiert werden sollen, werden aufgrund ihrer höheren Energie und daher Eindringtiefe Erdbebenaufzeichnungen analysiert. Hiermit lassen sich z. B. die geodynamischen Vorgänge bei der kontinentalen Kollision von Indien und Eurasien rekonstruieren (Kind et al., 2012; Schurr et al., 2013). Dieser Prozess ist der letztendliche Auslöser für viele Erdbebenkatastrophen, wie das katastrophale Kaschmir-Beben von 2005 und das Nepal-Beben von 2015. Noch größere Beben in dieser diffusen Kollisionszone bedrohen die dicht besiedelten Regionen in der Ganges-Ebene. Die beschriebenen Abbildungsverfahren kommen darüber hinaus auch in der Vulkaneismologie zum Einsatz (Dahm et al., 2016).

Neben den künstlichen und natürlichen Quellen ist die Nutzung einer dritten Form seismischer Energie in den letzten zehn Jahren zum Arsenal der Seismologie hinzugekommen: das kontinuierliche seismische Hintergrundrauschen, das hauptsächlich durch Meereswellen, aber auch durch atmosphärische Prozesse und nicht zuletzt durch menschliche Quellen wie den Verkehr angeregt wird. Bei der Untersuchung von Erdbebendaten wird dieses Rauschen als Störfaktor wahrgenommen, aber es enthält Informationen über den Aufbau der Erde, die sich mit dem Prozessieren von kontinuierlichen Datenströmen extrahieren lassen. Oft werden bei Strukturuntersuchungen alle Signalquellentypen kombiniert, wobei das Hintergrundrauschen besonders wichtig zur Rekonstruktion der flachen Krustenstruktur ist, also z. B. der Mächtigkeit von Sedimentbecken. Sens-Schönfelder und Snieder (2016) zeigen, dass auch die Anwendung auf die tiefe Erde möglich ist. Dieselbe Methode kann zugleich auf viel kleineren Skalen verwendet werden, um z. B. das Altern von Zement in Bauwerken zu überwachen.

Während in der klassischen Seismologie die Geschwindigkeitsstruktur normalerweise als statisch angesehen wird, ist die Untersuchung des seismischen Hintergrundrauschens



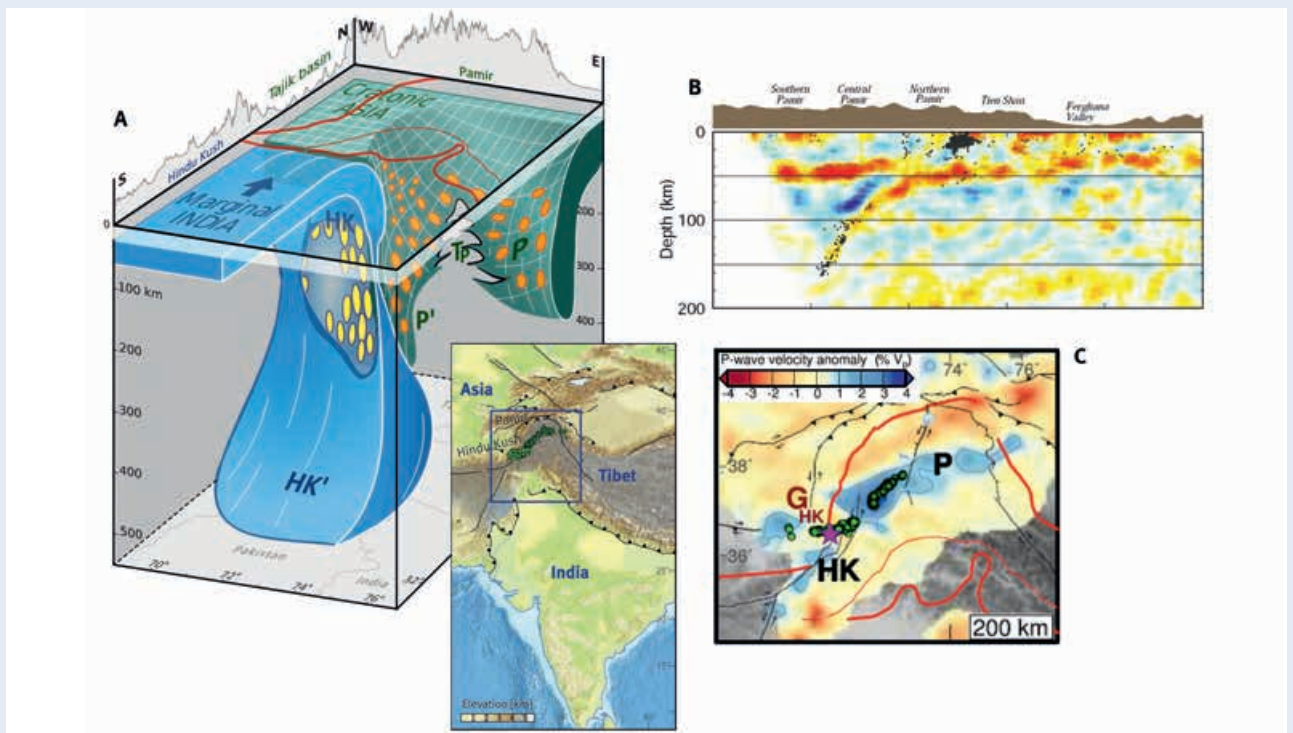


Abb. 3: Beispiel der Kombination verschiedener seismologischer Techniken zu Untersuchungen der Manteltektonik unterhalb der Gebirge des Pamir und Hindukush (HK). (A) Schematisches Bild der nordwärts gerichteten Subduktion von Indien als Ursache der Seismizität unterhalb des Hindukush (gelbe Ellipsen), und südwärts gerichtete Subduktion von Asien als Ursache der Seismizität unter dem Pamir (blaue Ellipsen; blaues Rechteck in kleiner Karte zeigt Untersuchungsgebiet). Die Situation im Hindukush stellt eine geologische Momentaufnahme der Platte während des Auseinanderreißen dar, ein Prozess, der oft postuliert wird, aber nur selten wie hier direkt beobachtet werden konnte. (B) Abbild der Struktur mit Hilfe von konvertierten Wellen. Farben geben die Stärke der konvertierten Wellen an und sind ein Maß für die Stärke des Kontrasts der elastischen Eigenschaften. Die geneigte Zone von Erdbeben (schwarze Punkte) in Tiefen von 100 bis 160 km und die geneigten parallelen blauen und roten Zonen (am deutlichsten in 50-100 km Tiefe) zeigen die Position der subduzierenden kontinentalen Unterkruste an (C) Schnitt durch tomographisches Modell in 200 km Tiefe. Blaue Regionen stellen Zonen höherer seismischer Geschwindigkeit dar und zeigen die Position der subduzierten Platten an, innerhalb derer die Temperatur niedriger ist. Grüne Punkte stellen Erdbeben dar. (Abb. A und C aus Kufner et al., 2016, Abb. B aus Schneider, 2013)

Fig. 3: Different seismological techniques are employed to examine the mantle tectonics below the Pamir and Hindukush (A) Cartoon of plate configuration. The Hindukush slab results from northward-directed subduction of India and the Pamir slab results from southward-directed subduction of Asia. (B) Structural image based on the stacking of converted waves. The dipping layer of earthquakes (black circles) and the dipping parallel blue and red zones indicate the position of the subducted lower crust. (C) Map view of tomographic model at 200 km depth.

nicht abhängig von natürlich auftretenden oder teuren künstlichen Quellen. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten in der Untersuchung der zeitabhängigen Veränderung der Geschwindigkeitsverteilungen. Mit Hilfe von Interferometrie konnten kleinste Veränderungen der Wellengeschwindigkeiten im Zehntel-Prozent-Bereich nachgewiesen werden, wobei sowohl saisonale Einflüsse als auch der Effekt von Erschütterungen durch größere und kleinere Erdbeben (z. B. *Sens-Schönfelder und Richter, 2013*) nachweisbar sind.

Untersuchungen der seismischen Quellen können verwendet werden, um Einsichten in den Erdbebenprozess zu gewinnen,

sowohl durch die detaillierte Analyse des Bruchprozesses großer Beben (*Tilmann et al., 2016*) als auch durch die Beobachtung von Erdbeben über viele Größenordnungen: von tektonischen Beben, die mit regionalen Netzwerken aufgezeichnet werden über kleinere Beben, die nur mit Bohrlochseismometern oder durch Installationen in tiefen Minen detektiert werden können, bis hin zu kontrollierten Experimenten an Gesteinsblöcken im Labor (*Bohnhoff et al., 2016*). Die Verteilung häufig auftretender kleinerer Beben kann zusammen mit den eben beschriebenen Strukturuntersuchungen Aufschluss über tektonische Vorgänge geben, z. B. indem es die Position von subduzierenden Platten anzeigt (Anwendung auf die Kollision

von Indien und Asien: *Schurr et al., 2013* und Abb. 3 A). Indirekt kann so auch auf die Temperatur geschlossen werden, da in Mantelgesteinen Erdbeben normalerweise nur bei Temperaturen unter 650 °C entstehen können. Bestimmte Erdbeben-typen sind zudem für bestimmte Spannungszustände charakteristisch. So führt Kompression zu Aufschiebungsbeben, bei der sich eine Seite der Verwerfung über die andere schiebt – die Situation z. B. an der Hauptverwerfung in Subduktions-zonen. Bei Zugspannung treten dagegen Abschiebungen auf, also das Absacken einer Seite der Verwerfung gegenüber der anderen; diese Situation tritt auch bei der Grabenbildung auf, beispielsweise am ostafrikanischen Rift oder auch am Rhein-graben. Man kann daher aus den Bruchmechanismen vieler Beben den Spannungszustand der Erde rekonstruieren. Dies wird genutzt, um zusammen mit anderen Daten in der World Stress Map (*Heidbach et al., 2009*) global den Spannungszu-stand an der Erdoberfläche zu beschreiben. Aus Vergleichen der Mechanismen kleinerer Beben vor und nach großen Beben lässt sich der Abbau an Scherspannung durch vorangegange- ne Großbeben quantifizieren (*Tilmann et al., 2016*).

Die langfristige Erdbebenaktivität wird in Katalogen zusam- mengefasst. Mit Hilfe dieser Kataloge wird die Wahrschein- lichkeit zukünftiger Beben abgeschätzt. Damit ist die Zuver- lässigkeit der Kataloge eine Grundvoraussetzung der seismi- schen Gefährdungsabschätzung. Diese wird mit empirischen oder Szenario basierten Abschätzungen kombiniert, welche Beschleunigungen Beben definierter Magnitude verursachen können, denn Bauingenieure als Endnutzer von seismischen Gefährdungsanalysen wollen wissen, gegen welche Bodenbe- schleunigungen sie Bauwerke absichern müssen. Als neuere Entwicklung ergänzt hier die zeitabhängige Gefährdungsab- schätzung die klassische Annahme einer statischen Gefähr- dungslage (*Schorlemmer et al., 2016*). Seismische Zyklen, also die Zeiträume, über die sich Spannung aufbaut und in größeren Erdbeben wieder abgebaut wird, sind häufig erheb- lich länger als die instrumentelle Beobachtungszeit, die nur etwas über hundert Jahre umfasst. Dies gilt insbesondere im kontinentalen Bereich, wo die Relativbewegung verschiedener Platten oft über hunderte oder tausend Kilometer weite diffuse Deformationszonen verteilt wird und daher jede einzelne Ver- werfung nur sehr selten aktiviert wird. Das Vorhandensein guter historischer Kataloge, also Informationen über präinstru- mentelle Erdbebenaufzeichnungen aus historischen Quellen, stellt daher eine Grundvoraussetzung für zuverlässige Gefähr- dungsabschätzungen dar (*Schellbach und Grünthal, 2016*). In der Paläoseismologie werden geologische Marker verwendet, um vergangene Erdbebengeschichte zu rekonstruieren.

Die Gefährdung durch natürliche Erdbeben lässt sich nicht be- einflussen, aber Mitigationsmaßnahmen können das Risiko, das von ihnen ausgeht, mindern. Neben den schon erwähnten Baumaßnahmen ist der Einsatz von Frühwarnsystemen eine Möglichkeit zur Verringerung von Erdbebenschäden. Hierbei geht es explizit nicht um Vorhersage, sondern man macht

sich die Tatsache zu Nutze, dass die Schäden verursachen- den Scher- und Oberflächenwellen erst mit einer gewissen Verzögerung gegenüber den schnelleren Kompressionswellen in gefährdeten Städten eintreffen, zumindest, wenn der Erd- bebenherd sich nicht in unmittelbarer Nähe befindet. Diese Verzögerung lässt sich nutzen, um eine Warnzeit von maxi- mal einigen Zehnersekunden zu gewinnen, was rudimentäre Schutzmaßnahmen wie das Anhalten von Zügen, Sperren von Brücken, Stoppen von gefährlichen industriellen Prozessen ermöglicht. *Parolai et al. (2016)* beschreibt die Entwicklung eines solchen Systems für Zentralasien.

Durch menschliche Aktivitäten ausgelöste Erdbeben, soge- nannte induzierte Seismizität, ist in den letzten Jahren in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Die Nutzung geother- mischer Energie und die unterirdische Verpressung der bei Fracking entstehenden großen Menge an Abwasser sind die wichtigsten Ursachen von fühlbarer induzierter Seismizität, während das eigentliche Fracking im Normalfall nur kleine Erdbeben weit unter der Wahrnehmungsschwelle erzeugt. Im Osten von Nordamerika lässt sich sogar das Gros der Seis- mizität in den letzten zehn Jahren auf menschliche Einflüsse zurückführen (*Ellsworth, 2013*). Die langjährigen Erfahrungen in der Analyse natürlicher Beben erlauben es, Prozeduren zu entwickeln, die eine Nutzung der Wärmeenergie der Erde ermöglichen und gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit eines in- duzierten Schadenbebens sehr gering halten. Zudem können die Methoden der Erdbebenanalyse angewendet werden, um Nukleartests zu detektieren und von natürlichen Erdbeben zu unterscheiden; tatsächlich kommt am GFZ für die Erdbeben- beobachtung entwickelte Software auch an anderen Instituten bei der Überwachung des Vertrags zum Nuklearwaffentest- stopp zum Einsatz.

Neben Erdbeben und Explosionen können auch ganz anders- artige seismische Signale untersucht werden Zum Beispiel werden Anwendungen im Bereich der Erosionsforschung seit kurzem eingesetzt. Der Ansatz hat ein hohes Potenzial zur räumlich/zeitlichen Eingrenzung von Erosionsereignissen wie Steinfällen, Landrutschen und Transport von Geröll in reißen- den Flüssen (*Turowski et al., 2016*).

Neue instrumentelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Seis- mologie sind der Einsatz von GPS-Stationen, um dynamische Signale auch für sehr starke Bodenunruhen aufzunehmen (*Tilmann et al., 2016*), die Verwendung von Glasfaserkabeln, die die Messung von dynamischen Bodenverformung prak- tisch kontinuierlich entlang der Messstrecke ermöglichen (*Haberland et al. 2016*) und lokale Messungen der Rotation, die insbesondere Informationen über die Struktur in der Nähe des Messgeräts liefern. Großangelegte, in internationalen Kooperationen durchgeführte Messkampagnen mit Hunderten und in Zukunft bald Tausenden von Instrumenten versprechen neuartige Erkenntnisse aufgrund der Möglichkeit, das ge- samte seismische Wellenfeld aufnehmen und modellieren zu

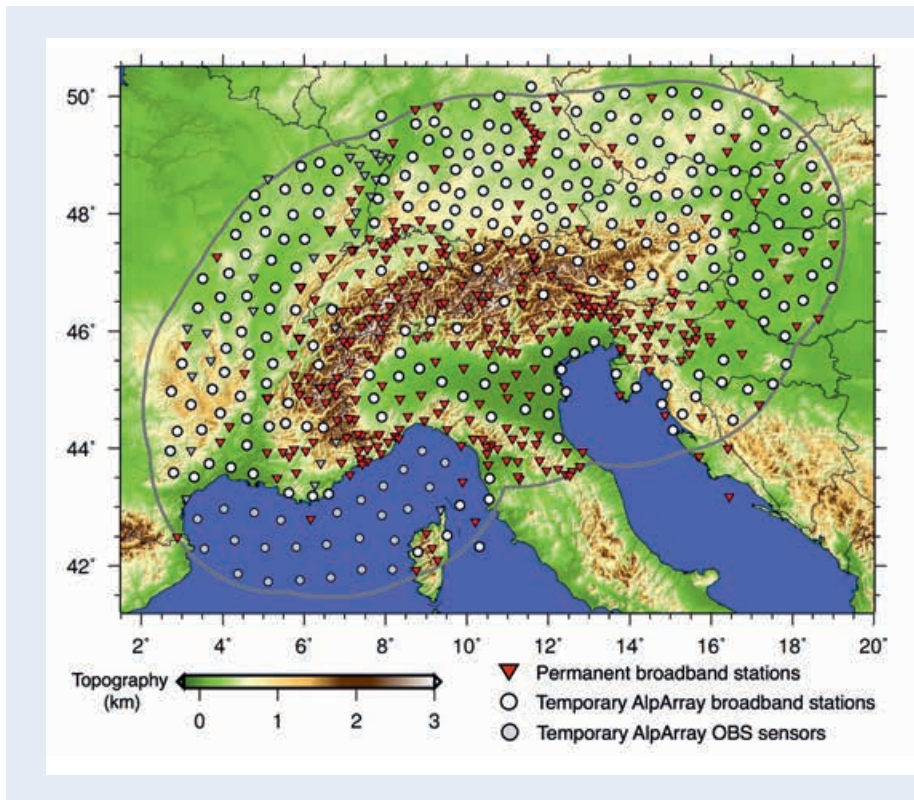


Abb. 4: Übersicht über Stationen des AlpArray-Experiments. Die dichte Abdeckung wird es erlauben, die komplizierte Konfiguration der verschiedenen Mikroplatten unter den Alpen aufzulösen und neue Erkenntnisse über seismische Gefährdung, petrologische und geomorphologische Prozesse zu erlangen. (Grafik: AlpArray Working Group, [www.alparray.ethz.ch](http://www.alparray.ethz.ch))

Fig. 4: Station distribution in the AlpArray experiment

können. Ein Beispiel ist die europäische Kooperation im AlpArray-Experiment, mit dem der Aufbau der Alpen im Untergrund mit Hilfe dichter Seismometerarrays genau analysiert wird (Abb. 4). Flankierende geodätische, geologische und geomorphologische Beobachtungen werden eine Rekonstruktion der geologischen Werdegänge sowie eine differenzierte Gefährdungsabschätzung für die dicht besiedelten Alpen und die Sedimentbecken des Alpenvorlands erlauben.

## Literatur

- Bohnhoff, M., Raub, C., Bulut, F., Prevedel, B., Dresen, G., Malin, P. E. (2014): Langzeitüberwachung von Erdbebenzonen durch den Einsatz von Bohrlochseismometern. - *System Erde*, 4, 1, pp. 14–21.
- Ellsworth, W. L. (2013): Injection-induced earthquakes. - *Science*, 341, 6142, 1225942.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B. (2009): The World Stress Map Based on the Database Release 2008, equatorial scale 1:46,000,000, Paris: Commission for the Geological Map of the World.
- Kufner, S.-K., Schurr, B., Sippl, C., Yuan, X., Ratschbacher, L., Akbar, A. s. M., Ischuk, A., Murodkulov, S., Schneider, F. M., Mechie, J., Tilmann, F. (2016): Deep India meets deep Asia: Lithospheric indentation, delamination and break-off under Pamir and Hindu Kush (Central Asia). - *Earth and Planetary Science Letters*, 435, pp. 171–184.
- Kind, R., Tilmann, F., Mechie, J., Pandey, S., Kumar, P. (2012): Tibet: die größte Kollision auf der Erde. - *System Erde*, 2, 2, pp. 24–31.
- Schurr, B., Mechie, J., Yuan, X., Schneider, F. M., Sippl, C. (2013): Können Kontinente untertauchen? Kontinentkollision und -subduktion – Tektonik, Tiefenstruktur und geodynamische Prozesse unter dem Pamir, Tien Shan und Hindukusch. - *System Erde*, 3, 2, pp. 6–11.
- Schneider, F. M. (2014): Imaging an intra-continental subduction in Central Asia with teleseismic receiver functions, PhD Thesis, (Scientific Technical Report; 14/06), Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 179 p.
- Sens-Schönfelder, C., Eulenfeld [Richter], T. (2013): Am Puls der Erde: natürliche Vibrationen und deren Analyse mit der seismischen Interferometrie. - *System Erde*, 3, 1, pp. 32–39.
- Victor, P., Schurr, B., Brändlein, D., Klotz, J., Ritter, O., Asch, G., Walter, T. R., Sobiesiak, M., Oncken, O. (2011): Beobachtung der letzten Phase eines seismischen Zyklus in Nordchile: IPOC – europäisch-südamerikanisches Netzwerk. - *System Erde*, 1, 1, pp. 24–29.

### Zitierte Beiträge in dieser Ausgabe des GFZ-Journals

#### „System Erde“ (2016), Heft 1:

- Bauer et al.: „Seismisches Abbilden von Krustenstrukturen“, S. 12–17
- Sens-Schönfelder und Snieder: „Die Streuung des globalen seismischen Wellenfelds“, S. 18–23
- Tilmann et al.: „Neue Einsichten in den Ablauf großer Erdbeben“ S. 24–31
- Parolai et al.: „Auf dem Weg zur Schadensabschätzung in Echtzeit“, S. 32–37
- Schorlemmer et al.: „Dynamische und hochauflösende Aktivitätsvorhersagen und Folgenabschätzung von Erdbeben“, S. 38–43
- Schellbach und Grünthal: „Historische Seismologie“, S. 44–49
- Bohnhoff et al.: „Von der Gesteinsprobe bis zur Plattengrenze: Skalenübergreifende Analyse von Bruchprozessen“, S. 50–55
- Turowski et al.: „Vom Flüstern, Raunen und Grollen der Landschaft“, S. 56–61
- Dahm et al.: „Vulkanseismologie – ein Blick ins Innere der Vulkane“, S. 62–67
- Haberland et al.: „Trends in seismologischer Instrumentierung“, S. 68–73

# Seismisches Abbilden von Krustenstrukturen

*Klaus Bauer, Trond Ryberg, Benjamin Braeuer, Christian Haberland, Michael Weber*  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Deep seismic sounding provides important information on the seismic structure of the crust. Seismic experiments make use of controlled sources (explosions, Vibroseis) or natural sources (earthquakes, ambient noise), or combinations of both types. Seismic velocities are derived from modelling or tomographic inversion of diving waves and refractions. Particularly the combined interpretation of compressional and shear velocities allows for insight into the lithological structure of the crust. Seismic reflectivity is derived from imaging of waves reflected at geological boundaries. Typical patterns of crustal reflectivity are observed for specific tectonic settings. Case studies are shown from two studies at plate boundary systems. (1) The old plate boundary at the Namibian margin was formed by Cretaceous continental rifting and its interplay with the activities of the Tristan da Cunha mantle plume. Traces of intensive magmatic overprinting of the crust at the landfall region of Walvis Ridge can be seen in the derived velocity model and also in the reflectivity image. (2) The Dead Sea transform marks the active boundary between the African and Arabian plates. The Dead Sea basin was formed by pull-apart in response to step-over of the fault system. Results from tomography reveal a deep asymmetric basin structure. An anomalous body was found under the basin, between 13 and 18 km depth, which is interpreted as pre-basin sediments. Our results are supported by the distribution of earthquakes. The results provide new constraints for the modeling of plate boundary processes.*



Die Krustenseismik liefert wesentliche Beiträge zum Verständnis des Aufbaus und der stofflichen Zusammensetzung der Erdkruste. Hierbei wird die aus Sedimentbecken sowie kristalliner Oberkruste und Unterkruste bestehende interne Struktur erkundet. Eine klare Unterscheidung von kontinentaler Kruste, ozeanischer Kruste und Übergangstypen ist mit Hilfe der Krustenseismik möglich und es können vulkanische Strukturen und Überprägungen der tieferen Kruste durch Magmatismus erkundet werden. Seismische Strukturen und deren Relation zur Verteilung von Bebenherden liefern wichtige Einblicke in Erdbebenprozesse und den tektonischen Zustand der Kruste. Schließlich sind krustenseismische Methoden ein wichtiges Werkzeug zur Erkennung und Kartierung der Grenze zwischen Kruste und oberem Erdmantel (Moho-Diskontinuität). Die Ergebnisse aus der Krustenseismik fließen in interdisziplinäre Forschungsarbeiten zu Helmholtz spezifischen, gesellschaftlich relevanten Themen ein. Ein Beispiel ist das Verständnis von Plattenrandsystemen und damit verbundenen Naturgefahren und Georesourcen.

Krustenseismische Experimente basieren auf der Untersuchung der Wellenausbreitung mit Hilfe spezifischer Verteilungen von seismischen Quellen sowie linienhaft oder flächenhaft angeordneten Empfängern. Die Wellenanregung erfolgt mit aktiven Quellen (Sprengungen, Vibroseismik) bei Kenntnis von Ort, Zeit und Charakteristik der abgestrahlten Signale (sogenannte kontrollierte Quellen). Alternativ können passive Experimente mit natürlichen Quellensignalen (Erdbeben, Umgebungsrauschen) durchgeführt werden. Die Datenauswertung richtet sich nach der Art der verwendeten Wellentypen. Von der Quelle direkt zum Empfänger laufende Tauchwellen und refraktierte seismische Phasen ermöglichen eine Modellierung bzw. tomographische Inversion der gesteinspezifischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten. Auf dem Ausbreitungsweg an geologischen Grenzen reflektierte Wellen werden zur Abbildung dieser reflektiven Grenzflächen in einem Untergrundmodell verwendet.

Seismische Geschwindigkeiten erlauben Rückschlüsse auf die stoffliche Zusammensetzung der Kruste (z. B. *Holbrook et al., 1992; Schoen, 1996*). Deutlich unterschiedliche Geschwindig-

keiten werden für Sedimente und verschiedene magmatische und metamorphe Gesteine in der kristallinen Oberkruste und Unterkruste beobachtet. Eine deutliche Zunahme der Geschwindigkeiten beim Übergang von der Unterkruste in den obersten Mantel bildet die Grundlage für die Detektion der Moho-Diskontinuität. Die lithologische Interpretation kann dabei weiter eingegrenzt werden, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeiten verschiedener Wellentypen (Kompressionswellengeschwindigkeit  $V_p$  und Scherwellengeschwindigkeit  $V_s$ ) herangezogen werden. Durch Betrachtung des  $V_p/V_s$ -Verhältnisses können beispielsweise quartzarme von quartzreichen Gesteinen gut unterschieden werden. Besonders markante Anomalien ergeben sich im  $V_p/V_s$ -Verhältnis bei Anwesenheit von Fluiden in der Kruste.

Die Reflexionsseismik liefert strukturelle Abbilder der Kruste. Seismische Reflexionsmuster unterscheiden sich für Sedimente, Oberkruste, Unterkruste und obersten Mantel (*Meissner und Brown, 1991*). In Sedimenten kann aus den reflexionsseismischen Mustern auf die Verhältnisse bei der Ablagerung geschlossen werden. In diesem Zusammenhang spricht man auch von Seismo-Stratigraphie. Im kristallinen Grundgebirge deuten bestimmte reflexionsseismische Strukturen auf kompressive Tektonik oder Dehnungstektonik hin. Auch die rheologische Strukturierung des Kristallins in spröde Oberkruste und duktile Unterkruste spiegelt sich im reflexionsseismischen Abbild wider. So ergibt sich eine Zunahme der Reflektivität in der unteren Kruste, die auf das duktile Verhalten sowie eine starke stoffliche Differenzierung zurückzuführen sind. Reflexionsseismik eignet sich darüber hinaus zur direkten oder indirekten Abbildung von kristallinen Störungszonen (z. B. *Bauer et al., 2013*).

Die Krustenforschung am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ arbeitet sowohl mit aktiver Seismik als auch mit passiven seismologischen Experimenten. Die Auswertung der Daten erfolgt mit Methoden, die möglichst verschiedene, sich ergänzende Informationen für eine integrative Interpretation zur Verfügung stellen, z. B. seismische Geschwindigkeiten, reflexionsseismische Abbilder oder die Verteilung von Bebenherden. Im Folgenden werden zwei Beispiele solcher Untersuchungen beschrieben. Beide Fallstudien beschäftigen sich mit Strukturen und Prozessen an Plattengrenzen, einem Schwerpunktthema des GFZ. Am Kontinentrand von Namibia wurde eine ehemalige, sich in der Kreidezeit öffnende Plattengrenze seismisch beleuchtet. Hierbei ging es um die Auswirkungen von Ozeanöffnung und Mantelplume-Aktivität auf die heutige Krustenstruktur. Das zweite Beispiel beschreibt tomographische Untersuchungen im Bereich des Toten Meeres, wo ein tiefes Sedimentbecken an einer momentan aktiven Plattengrenze entstanden ist.

Links: Vorbereitungsarbeiten für eine seismische Sprengung im Rahmen von krustenseismischen Untersuchungen im Kaokoland im nördlichen Namibia (Foto: K. Bauer, GFZ)

Left: Preparation of a seismic explosion as part of a crustal-scale seismic study in the Kaokoland, northern Namibia



Kontakt: K. Bauer  
(klaus.bauer@gfz-potsdam.de)

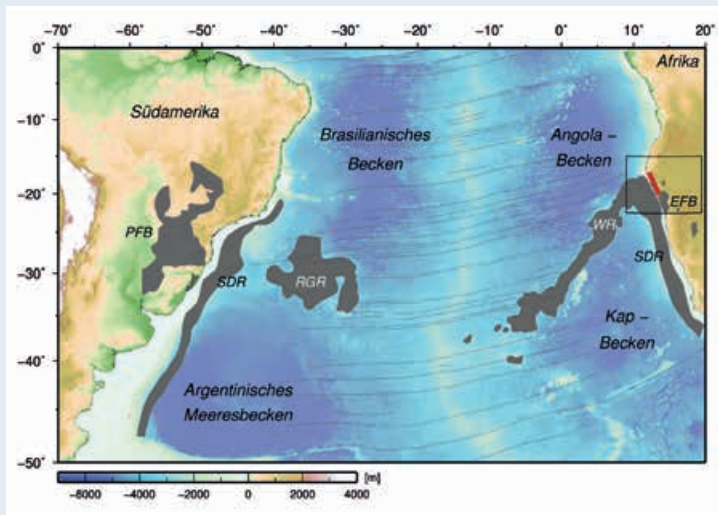


Abb. 1: Verteilung von magmatischen Komplexen der vulkanischen Großprovinz im Südatlantik (WR=Walfischrücken, RGR=Rio Grande-Schwelle, PFB=Paraná-Flutbasalte, EFB=Etendeka-Flutbasalte, SDR=seewärts geneigte submarine Vulkanitkomplexe). Die rote Linie zeigt den Verlauf der krustenseismischen Traverse in Nord-Namibia.

Fig. 1: Distribution of magmatic complexes forming the Large Igneous Province in the South Atlantic (WR=Walvis Ridge, RGR=Rio Grande Rise, PFB=Paraná Flood Basalts, EFB=Etendeka Flood Basalts, SDR=seaward dipping reflectors). Red line shows onshore deep seismic transect across the landfall of Walvis Ridge in northern Namibia.

## Eine seismische Traverse über die afrikanischen Ausläufer des Walfischrückens

Die Öffnung des Südatlantiks in der frühen Kreidezeit wurde von intensiven magmatischen Aktivitäten begleitet. In Folge dieser Prozesse entstand eine magmatische Großprovinz (Abb. 1). Diese besteht heute aus untermeerischen Vulkanketten (Rio Grande-Schwelle – Walfischrücken), kontinentalen Flutbasaltprovinzen (Paraná in Brasilien, Etendeka in Namibia) sowie südlich davon ausgebildeten vulkanischen Kontinenträndern vor Afrika und Südamerika. Als Ursache für die Entstehung der magmatischen Großprovinz geht man von einem Zusammenspiel von kontinentalen Riftprozessen und dem etwa zeitgleich an der Lithosphärenbasis ankommenden Tristan da Cunha-Mantelplume aus (z. B. O'Connor und Jokat, 2015). Die zeitliche Abfolge von anfänglicher Ozeanöffnung (140 Mio. Jahre) und Entstehung der Flutbasalte (132 Mio. Jahre) deutet darauf hin, dass der Mantelplume bei diesem Prozess nicht der auslösende Faktor war (Steinberger et al., 2014). Noch offene Fragen gibt es vor allem hinsichtlich der Lage des Plumezentrums im Verlauf der Öffnungsgeschichte. Um die sehr ungleiche Verteilung der Flutbasalte beidseitig des Südatlantiks mit deutlich größeren Vorkommen in Brasilien zu erklären, geht man von einer initialen Lage des Plumezentrums in Südamerika aus. Es gibt aber auch Hinweise darauf, dass sich das Zentrum der magmatischen Aktivität vor der Öffnung auf afrikanischer Seite befand (z. B. Fromm et al., 2015).

Das DFG-Schwerpunktprogramm SAMPLE (South Atlantic Margin Processes and Links with onshore evolution) förderte Forschungen für ein verbessertes Verständnis der Prozesse der Südatlantiköffnung und deren Wechselwirkungen mit den Aktivitäten des Mantelplumes. Schwerpunkte bildeten einerseits Feldkampagnen, um die Auswirkungen des Riftings und Magmatismus auf die heutige Krustenstruktur zu studieren, und andererseits numerische Simulationen der Prozesse von der Entstehung des Plumes bis hin zur Interaktion mit der Ozeanöffnung. Das GFZ war mit zahlreichen Projekten in Kooperation mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen beteiligt. Im Folgenden werden Ergebnisse der krustenseismischen

Untersuchungen im Bereich der Etendeka-Flutbasaltprovinz (Ryberg et al., 2015; rote Linie in Abb. 1) beschrieben.

Die seismische Struktur der Kruste im Bereich des Walfischrückens wurde in einem Verbund von GFZ, AWI, GEOMAR sowie Geologischem Dienst von Namibia (GSN) mittels mariner Seismik, amphibischen Messungen und seismischen Experimenten an Land studiert (Fromm et al.; 2015, Ryberg et al., 2015). Mit einem etwa 300 km langen Profil wurde der Walfischrücken erstmals an seiner landseitigen Begrenzung seismisch sondiert (Ryberg et al., 2015). Verschiedene Telexperimente wurden für tomographische und reflexionsseismische Untersuchungen konzipiert. Als Quellen für die Wellenanregung kamen an Land Sprengungen zum Einsatz. Auf der Empfängerseite wurden Instrumente des Gerätepools am GFZ (GIPP) verwendet.

Der obere Teil der Abb. 2 zeigt die Ergebnisse aus der seismischen Tomographie. Als wichtigstes Ergebnis erkennt man eine Zone deutlich erhöhter P-Wellengeschwindigkeiten ( $V_p$ ) im Bereich der mittleren und unteren Kruste unter den Ausläufern des Walfischrückens. Diese werden als Ausdruck der intensiven magmatischen Überprägung der Kruste interpretiert. Geschwindigkeiten größer als 7 km/s deuten auf eine mafische Zusammensetzung hin, die durch Intrusion von Gabbro in die kontinentale Kruste erklärt werden kann. Geschwindigkeiten größer als 7,5 km/s in der untersten Kruste entsprechen wahrscheinlich Anreicherungen von schwereren Mineralkomponenten der eingedrungenen, partiell kristallisierten Schmelzen. Das reflexionsseismische Abbild (Abb. 2 unten) weist mit relativ transparenter Oberkruste und ausgeprägten Lamellenstrukturen in der Unterkruste typische Merkmale einer zuletzt vorwiegend durch Dehnungstektonik beanspruchten Kruste auf. Diese stehen wahrscheinlich im Zusammenhang mit einer großräumigen Dehnung der Lithosphäre beim Zerfall des Gondwana-Superkontinents in der frühen Kreidezeit. Reflektive Strukturen in der Oberkruste (Profilentfernung 20 bis 100 km) werden als Abbild der tektonischen Prozesse während der älteren, panafrikanischen Gebirgsbildung im Kaoko-Gürtel interpretiert. Als wichtigstes Resultat weist die Unterkruste im Bereich der erhöhten Geschwindigkeiten unter dem Walfischrücken reflektive

Strukturen auf, die als Abbild der Intrusionsprozesse gedeutet werden. Ein markantes Reflexionsband (weißer Pfeil in Abb. 2 unten) könnte einen Hauptförderkanal für die aufgestiegenen Etendeka-Flutbasalte darstellen.

Die Ergebnisse liefern wichtige Randbedingungen für Modellierungen der Prozesse bei der Ozeanöffnung und den überlagerten Aktivitäten des Tristan da Cunha-Mantelplumes. Es werden aber auch neue Fragen aufgeworfen. Insbesondere scheint die relativ engräumige Begrenzung der intrudierten Kruste unter dem Walvisrücken eher dagegen zu sprechen, dass ein großer Plume-kopf während der Öffnung der kontinentalen Riftzone an der Lithosphärenbasis eintraf (Fromm et al., 2015; Ryberg et al., 2015). Zumindest ist davon auszugehen, dass der Aufstieg von Schmelzen und die Intrusion der Kruste vor allem durch vorgezeichnete, vererbte Strukturen relativ engräumig lokalisiert worden ist.

### Struktur eines tiefen Sedimentbeckens an einer Transformstörung

Die Tote Meer-Störung ist eine kontinentale Blattverschiebung an der Grenze zwischen Afrikanischer und Arabischer Platte (Abb. 3). Sie verläuft zwischen dem Roten Meer und der Maras-Dreibruchstruktur (triple junction), Süd-Türkei und weist eine Gesamtlänge von etwa 1000 km auf. Diese Transformstörung ist vor etwa 20 Mio. Jahren im Zusammenhang mit dem Aufbrechen des Arabisch-Afrikanischen Kontinents entstanden. Seitdem haben sich beide Platten um etwa 107 km gegeneinander verschoben. Als Teil dieser Prozesse hat sich am Toten Meer ein

tiefes Sedimentbecken gebildet. Heute hat es eine Ausdehnung von etwa 105 km in Nord-Süd Richtung und ist 15 bis 17 km breit. Erste Theorien zur Beckenbildung gingen von einer Absenkung in einem Teilabschnitt eines in Ost-West-Richtung gedehnten und sich öffnenden Kontinentalrifts aus. Moderne Konzepte favorisieren eher einen lateralen Versatz (step-over) an einer Segmentgrenze der Störungszone als primäre Ursache für die Beckengenese. Die Transformbewegung an der Plattengrenze hat sich dabei von einem östlicher verlaufenden Zweig im Süden auf einen westlicher verlaufenden Zweig im Norden verlagert. Die Kruste wird bei dieser Spannungsverlagerung *quasi* kontinuierlich auseinandergezogen (pull-apart) und somit ein allmählich wachsender Ablagerungsraum für Sedimente geschaffen.

Das Tote Meer-Becken gilt als eines der prominentesten Beispiele für die Entwicklung von Sedimentbecken an Transformstörungen (z.B. Garfunkel, 1981). Dadurch steht es immer wieder im Fokus internationaler Forschungsaktivitäten, die sich sowohl mit Grundlagenforschung zur geodynamischen Entwicklung als auch mit gesellschaftlich relevanten Themen wie seismischer Gefährdung, Erdstürzen durch Verkarstung und Hohlraumbildung sowie Wasser beschäftigen. Seit der Jahrtausendwende wurden mit GFZ-Beteiligung zahlreiche geophysikalische Untersuchungen zur Krustenstruktur der Region am Toten Meer durchgeführt. Diese umfassten unter anderem aktive und passive seismische Experimente, magnetotellurische Messungen, Gravimetrie und Elektromagnetik.

Für ein seismisches Abbilden von Krustenstrukturen sowie zur Analyse der lokalen Seismizität wurde zwischen 2006 und 2008

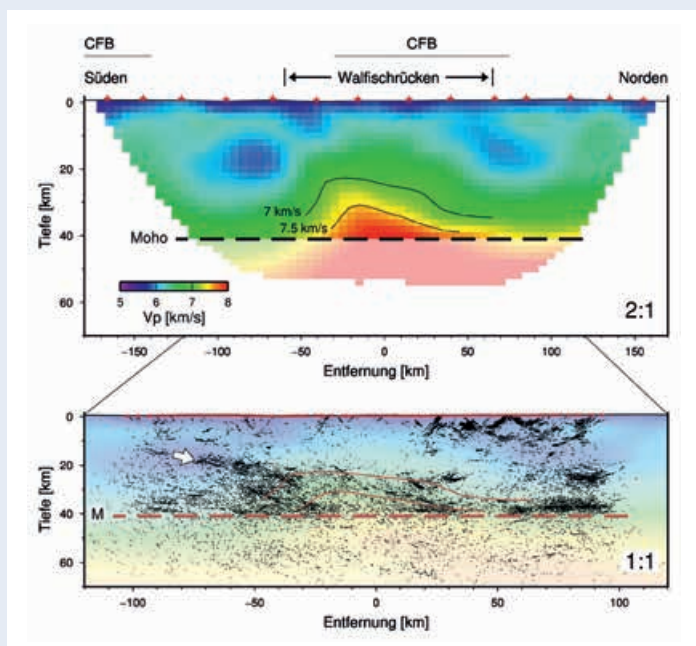


Abb. 2: Krustenseismisches Profil über die landseitigen Ausläufer des Walvisrücken in Namibia. Oben: Die seismische Tomographie ergab unter dem Walvisrücken eine Geschwindigkeitsanomalie mit sehr hohen Geschwindigkeiten (7 bis 7,8 km/s) in der mittleren und unteren Kruste. CFB= Kontinentale Flutbasalte. Unten: Ergebnisse der reflexionsseismischen Bearbeitung. (Abb.: neu veröffentlicht mit Zustimmung der Geological Society of America, aus Ryberg et al. (2015): Crustal structure of northwest Namibia: Evidence for plume-rift-continent interaction. - *Geology* 43, 8; Erlaubnis eingeholt über Copyright Clearance Center, Inc.)

Fig. 2: Deep seismic transect across the landfall of Walvis Ridge onshore Namibia. Above: Seismic tomography reveals high velocity anomaly (7-7.8 km/s) in the lower crust underneath the Walvis Ridge. CFB=Continental Flood Basalts. Below: Results of seismic reflection processing. The pattern of sub-horizontal lamellae in the lower crust appears distorted within the high velocity region below the Walvis Ridge. Arrow indicates possible pathway for ascending magma during break-up.

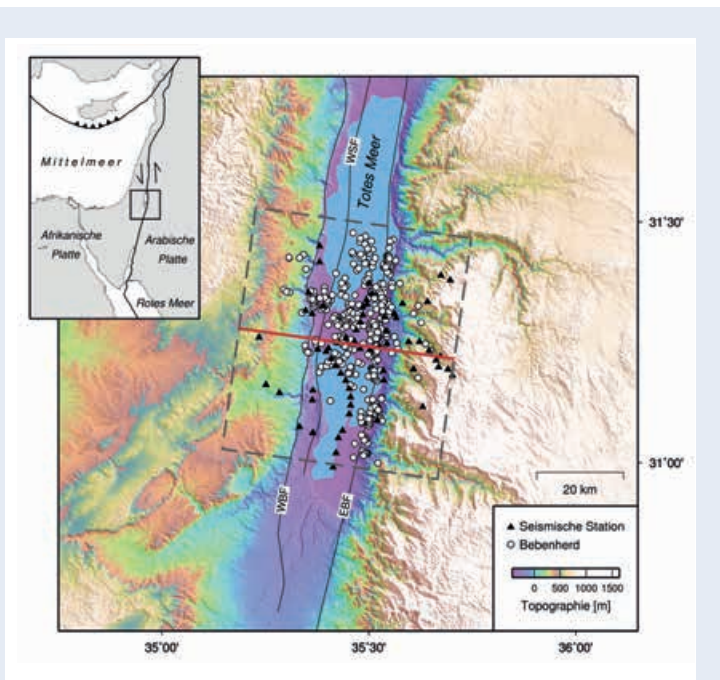


Abb. 3: Topographische Karte mit Lokation von seismischen Stationen und Bebenverteilung. Grau gestrichelte Box zeigt das Gebiet der tomographischen Inversion. Die rote Linie markiert die Lage des 2D Schnitts in Abb. 4. WBF = Westliche Randstörung; WSF = westliche Transversalverschiebung; EBF = Östliche Randstörung

Fig. 3: Topographic map shows seismic stations and distribution of earthquakes used in this study. Gray box indicates region of tomographic inversion. Red line marks seismic transect shown in Fig. 4. WBF = Western Boundary Fault; WSF = Western Strike-slip Fault; EBF = Eastern Boundary Fault

für 18 Monate ein dichtes Netzwerk mit 65 seismischen Stationen betrieben (Abb. 3). Zum Einsatz kamen wiederum Instrumente des Gerätepools am GFZ. Um eine gut überdeckte seismische Durchleuchtung im Zielgebiet zu gewährleisten, wurden die Stationen sowohl innerhalb des Beckens als auch im Bereich der Beckenschultern installiert. Nach sorgfältiger Analyse der Daten konnten 530 seismische Ereignisse identifiziert und für eine detaillierte Kartierung der Seismizität sowie Geschwindigkeitsbestimmung verwendet werden (Braeuer et al., 2012). Die Datenauswertung umfasste Laufzeitbestimmung, 1D-Modellierung sowie 2,5D- und 3D-tomographische Inversion zur Bestimmung der Geschwindigkeitsparameter  $V_p$ ,  $V_s$  und  $V_p/V_s$ . Darüber hinaus wurden hochpräzise Verfahren zur Bebenlokalisierung angewendet sowie Untersuchungen zu den Herdprozessen und zur Statistik der Bebenmagnituden durchgeführt.

Abbildung 4a zeigt entlang eines 2D-Schnitts quer zur Beckenachse die Verteilung von seismisch abgeleiteten Gesteinsklassen. Hierbei wurden die verschiedenen Ergebnisse aus der Tomographie (Geschwindigkeitsparameter  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ )

mit Hilfe von Methoden aus der Neuro-Informatik gemeinsam analysiert und interpretiert (Braeuer und Bauer, 2015). Die Gesteinsklassen basieren auf jeweils spezifischen seismischen Eigenschaften, die mit Hilfe von Kreuzdiagrammen visualisiert werden können (Abb. 4b und 4c). Durch Vergleich mit petrophysikalischen Daten aus globalen Untersuchungen kann die Interpretation zusätzlich gestützt werden. Aus den Analysen der tomographischen Modelle ergaben sich drei Hauptgesteinsklassen, die als Beckensedimente, Pre-Beckensedimente und kristallines Grundgebirge interpretiert werden. Das Sedimentbecken weist dabei eine stark asymmetrische Form mit Mächtigkeitsvariationen von 5 km im Westen bis zu 13 km im Osten auf. Als wichtigstes Resultat wurde unter dem östlichen Teil des asymmetrischen Beckens ein anomaler Störkörper in Tiefen zwischen 13 und 18 km identifiziert. Das rötlich markierte Material weist ähnliche Geschwindigkeiten und  $V_p/V_s$  Werte auf wie die flach gelagerten alten Sedimentschichten außerhalb des Beckens (ebenfalls rötlich gefärbt). Deshalb wurde die anomale Zone unter dem Becken als ursprünglich an der Erdoberfläche gelagertes Sedimentpaket interpretiert, welches während der Beckenentwicklung immer tiefer abgesenkt worden ist. Frühere Arbeiten haben ebenfalls eine anomale Zone mit geringen  $V_p$ -Geschwindigkeiten unter den Beckensedimenten identifiziert, diese aber mit Anwesenheit von Fluiden und duktilen Scherprozessen in einer kristallinen Mittelkruste erklärt. Die zusätzliche Einbeziehung von  $V_p/V_s$  in dieser Studie spricht eher für die Interpretation als Pre-Beckensedimente. Allerdings ist auch diese Interpretation nicht völlig schlüssig, da ein entsprechender Körper stärker ausgedünnt sein müsste.

Die mit diesen Daten lokalisierten Beben treten verstärkt dort auf, wo verschiedene seismische Gesteinsklassen aneinander grenzen (Abb. 4a). Besonders deutlich ist dies an der östlichen Begrenzung der Beckensedimente sowie der darunter lagernden Pre-Beckensedimente zu erkennen. Auch die obere westliche Begrenzung der Pre-Beckensedimente ist durch verstärkte Seismizität gekennzeichnet. Die Daten lassen die Interpretation zu, dass Deformationen sowie Akkumulation und Freigabe von Spannungen an lithologischen Grenzen besonders stark sind und somit zu einer verstärkten Bebenaktivität führen. Die Häufung der Beben in Grenzbereichen spricht auch gegen die Hypothese einer duktilen Scherzone im kristallinen Grundgebirge direkt unterhalb der Beckenfüllung (Braeuer und Bauer, 2015).

## Ausblick

Die Krustenseismik wird sich in der Zukunft noch stärker hin zu einem Baustein in der interdisziplinären Forschung zum System Erde entwickeln. Schon seit längerem werden zunehmend aktive und passive seismische und seismologische Methoden miteinander verknüpft. Ein besonderer Fokus liegt momentan bei der Ausnutzung von Umgebungsrauschen für die bildgebende Strukturerkundung. Aktive seismische Verfahren können aber auf Grund ihres höheren Auflösungsvermögens nicht durch



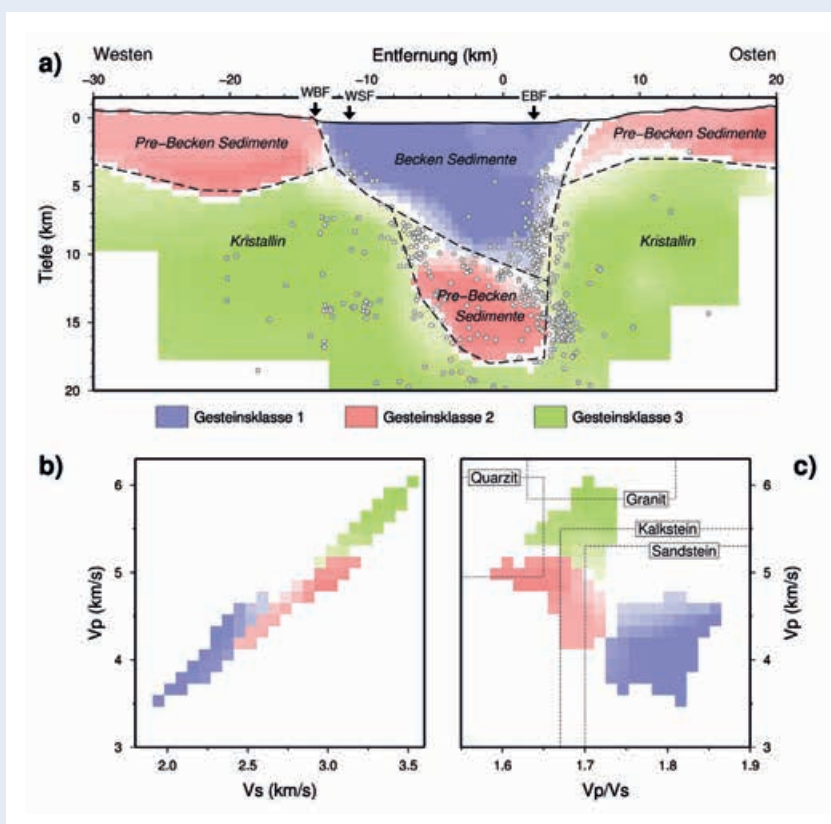


Abb. 4: (a) Der Schnitt entlang eines Profils über das Sedimentbecken unter dem Toten Meer zeigt die Verteilung seismisch abgeleiteter Gesteinsklassen sowie die bei der Tomographie verwendeten Bebenherde. WBF = Westliche Randstörung; WSF = Westliche Transversalverschiebung; EBF = Östliche Randstörung. (b) und (c) Seismische Eigenschaften der Gesteinsklassen. Petrophysikalische Daten nach Holbrook et al. (1992) und Schoen (1996) (Abb.: nach Braeuer und Bauer, 2015; Wiederverwendung der Abbildung mit freundlicher Genehmigung des Verlags John Wiley and Sons)

Fig. 4: (a) Distribution of rock types as classified by clustering of seismic velocities from seismic tomography. Earthquake distribution from joint inversion for seismic velocities and source localization. WBF = Western Boundary Fault; WSF = Western Strike-Slip Fault; EBF = Eastern Boundary Fault. (b) and (c) Seismic signature of rock types (classes) shown in crossplots of Vp vs. Vs and Vp vs. Vp/Vs. Petrophysical data after Holbrook et al. (1992) and Schoen (1996)

passive Experimente ersetzt werden. Neue Perspektiven zum seismischen Abbilden werden sich durch Verwendung einer deutlich größeren Anzahl an seismischen Empfängersystemen bei Experimenten ergeben. Für solche Entwicklungen ist das GFZ mit dem Gerätepool (GIPP) sowie nationalen und internationalen Vernetzungen sehr gut aufgestellt.

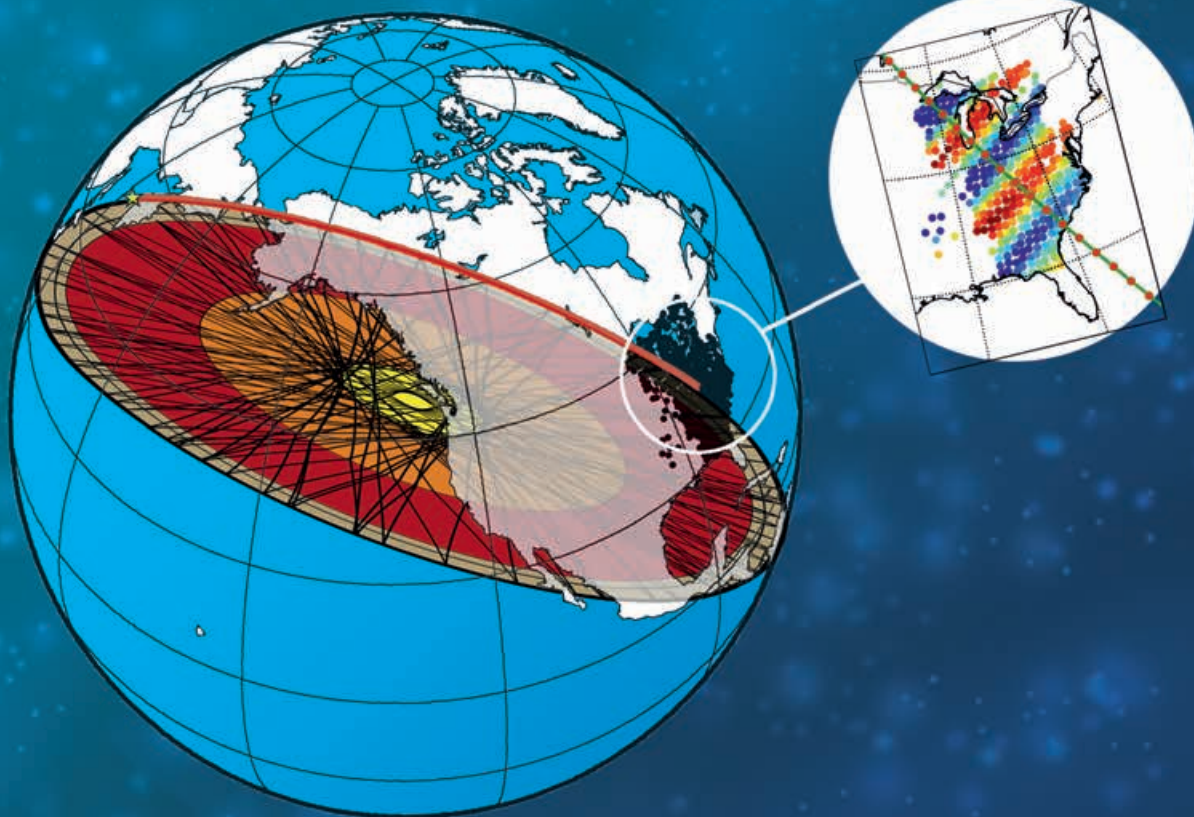
## Literatur

- Bauer, K., Ryberg, T., Fuis, G. S., Lüth, S. (2013): Seismic Imaging of the Waltham Canyon Fault, California: Comparison of Ray Theoretical and Fresnel Volume Prestack Depth Migration. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 1, pp. 340–352.
- Braeuer, B., Asch, G., Hofstetter, R., Haberland, C., Jaser, D., El-Kelani, R., Weber, M. (2012): High-resolution local earthquake tomography of the southern Dead Sea area. - *Geophysical Journal International*, 191, 3, pp. 881–897.
- Braeuer, B., Bauer, K. (2015): A new interpretation of seismic tomography in the southern Dead Sea basin using neural network clustering techniques. - *Geophysical Research Letters*, 42, 22, pp. 9772–9780.
- Fromm, T., Planert, L., Jokat, W., Ryberg, T., Behrmann, J. H., Weber, M., Haberland, C. (2015): South Atlantic opening: A plume-induced breakup? - *Geology*, 43, 10, pp. 931–934.
- Garfunkel, Z. (1981): Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics. - *Tectonophysics*, 80, 1-4, pp. 81–108.
- Holbrook, W. S., Mooney, W. D., Christensen, N. I. (1992): The seismic velocity structure of the deep continental crust. - In: Fountain, D. M., Arculus, R. J., Kay, R. W. (Eds.), *Continental Lower Crust*, (Developments in Geotectonics; 23), Amsterdam [u. a.]: Elsevier, pp. 1–43.
- Meissner, R., Brown, L. (1991): Seismic reflections from the Earth's crust: Comparative studies of tectonic patterns. - *Geophysical Journal International*, 105, 1, pp. 1–2.
- O'Connor, J. M., Jokat, W. (2015): Age distribution of Ocean Drill sites across the Central Walvis Ridge indicates plate boundary control of plume volcanism in the South Atlantic. - *Earth and Planetary Science Letters*, 424, pp. 179–190.
- Ryberg, T., Haberland, C., Haberlau, T., Weber, M., Bauer, K., Behrmann, J. H., Jokat, W. (2015): Crustal structure of northwest Namibia: Evidence for plume-rift-continent interaction. - *Geology*, 43, 8, pp. 739–742.
- Schön, J. H. (1996): Physical Properties of Rocks: fundamentals and principles of petrophysics, (Handbook of geophysical exploration; Sect. 1, Vol. 18), London [u. a.]: Geophysical Press, 583 p.
- Steinberger, B., Gassmüller, R., Trumbull, R., Sobolev, S. V., Weber, M. (2014): Manteldynamik und das Aufbrechen von Gondwana. - *System Erde*, 4, 2, pp. 14–19.

# Die Streuung des globalen seismischen Wellenfelds

Christoph Sens-Schönfelder und Roel Snieder  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Seismic interferometry is a methodology to recover the signals of waves propagating between seismic stations from records of random wavefields such as the ambient seismic noise or the coda of an earthquake. Teleseismic body waves excited by a very deep earthquake close to Kamchatka are investigated to unveil the composition of the teleseismic wavefield at long propagation times which is key to understand how teleseismic waves can be reconstructed by seismic interferometry. Waves at high frequencies around 1s period are shown to be scattered strongly in the Earth crust where they are quickly attenuated. At low periods, seismic waves circle the Earth for many hours as surface waves with clear arrivals of the different orders. At intermediate periods around 40s waves still propagate for several hours but individual arrivals cannot be identified in the data any more – indicating a randomization process. It is shown here that to a large extent this randomization is due to the interaction with the Earth's 1D structure that does not alter the azimuthal distribution of the wavefield. Even after 8 h the seismic energy propagates dominantly along the great circle and the mean free time of the azimuthal randomization is estimated to 10 h. This means that the recovery of the teleseismic wavefield by seismic interferometry is strongly dependent on the distribution of ambient sources. For a successful application of seismic interferometry sources need to be present at suitable distances on the great circle connecting the stations.*



Einen Großteil unseres Wissens über den Aufbau der Erde verdanken wir geophysikalischen Methoden, die die Eigenschaften im tiefen Inneren der Erde durch ihre Wechselwirkung mit physikalischen Feldern an der Erdoberfläche sichtbar machen. Eines dieser Felder ist das seismische Wellenfeld, das – angeregt von größeren Erdbeben – die gesamte Erde durchläuft und spektakuläre Entdeckungen ermöglicht hat. Allen voran steht die Entdeckung des flüssigen äußeren und festen inneren Erdkerns durch die Seismologen Benno Gutenberg und Inge Lehmann im frühen 20. Jahrhundert.

Teleseismische Wellen – also solche, die tief in den Erdkörper eindringen – sind eine wichtige Informationsquelle für die seismologische Forschung am Deutschen GeoForschungs-Zentrum GFZ. Sie dienen als Signal für die Untersuchung des oberen Erdmantels und der Erdkruste mithilfe konvertierter Wellen (Yuan et al., 2006) sowie zur Untersuchung der detaillierten Struktur von Grenzschichten wie der Kern-Mantel-Grenze (Gassner et al., 2015).

Eine Einschränkung der Nutzung von Erdbeben als natürliche Signalquellen bei solchen Untersuchungen ergibt sich aus der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Beben. Durch die Notwendigkeit, einen bestimmten Bereich der Erde „auszuleuchten“, d. h. Wellen aufzuzeichnen, die durch den zu untersuchenden Teil des Planeten gelaufen sind, definieren sich Anforderungen an die Position der Signalquellen. Erdbeben treten jedoch nur in den tektonisch aktiven Bereichen unserer Erde auf. Auch die zeitliche Konzentration in aktiven Phasen stellt bei seismologischen Experimenten, die üblicherweise temporär installierte Seismometer mit Aufzeichnungsdauern von einigen Monaten bis zu wenigen Jahren nutzen, eine Herausforderung dar.

Links: Lage des im Artikel vorgestellten Bebens im Ochotskischen Meer (gelber Stern) und des USArrays, das für die Analyse der teleseismischen Wellenfelds verwendet wurde (schwarze Punkte). Die Strahlwege im Erdinnern stellen mögliche Laufwege durch die tiefe Erde mit Laufzeiten von rund fünf Stunden dar. (Grafik: C. Sens-Schönfelder und G. Schwalbe, GFZ)

Left: Location of the earthquake in the Sea of Okhotsk (yellow star) and the USArray that was used for the analysis of the teleseismic wavefield (black dots). Raypaths with travel times of about five hours are shown inside the Earth.

## Seismische Interferometrie

Bei der Untersuchung von Oberflächenwellen hat sich in den vergangenen Jahren die seismische Interferometrie als Methode etabliert, die Messungen unabhängig von den unregelmäßig auftretenden Erdbeben ermöglicht. Die Interferometrie erlaubt es, seismische Quellen zu imitieren, indem ein randomisiertes, also zufällig zusammengesetztes Wellenfeld sowohl an der Position der Quelle als auch an der des Empfängers aufgezeichnet wird (Snieder und Sens-Schönfelder, 2015). Aus dieser gemeinsamen Aufzeichnung lässt sich mathematisch das Signal an einem Seismometer gewinnen, das ein Erdbeben an der Position eines zweiten Seismometers ausgelöst hätte. Üblicherweise werden für diesen Prozess Aufzeichnungen des seismischen Umgebungsrauschens verwendet, das durch menschliche Aktivität, Wind oder Meeresbrandung angeregt wird. Die Qualität der interferometrischen Rekonstruktion hängt davon ab, wie gut das Wellenfeld randomisiert ist.

Der Grund für den Erfolg der Interferometrie mit Oberflächenwellen liegt darin, dass der Oberflächenanteil des seismischen Umgebungsrauschens für diese Methode sehr gut geeignet ist. Dies hat zu einer Weiterentwicklung der Oberflächenwellentomografie und deutlich höherer Auflösung bei der Abbildung von Untergrundstrukturen geführt. Darüber hinaus ermöglicht die Interferometrie die Überwachung zeitlicher Veränderungen im Untergrund (Sens-Schönfelder und Richter, 2013).

Wenn es gelänge, teleseismische Wellen mit ähnlicher Qualität wie Oberflächenwellen aus dem Rauschen passiv zu extrahieren, würde dies zu einer Flut von Möglichkeiten für die Untersuchung der tiefen Erde und globaler Prozesse führen. Um diesem Ziel ein Stück näher zu kommen, wurden die Voraussetzungen für die Anwendung der Interferometrie auf teleseismische Wellen untersucht.

## Das Tiefbeben im Ochotskischen Meer bei Kamtschatka

Als Signal für diese Untersuchung dienen die Aufzeichnungen eines Erdbebens im Ochotskischen Meer vor Kamtschatka vom 24. Mai 2013 (siehe Abb. links). Mit einer Herdtiefe von 605 km und einer Magnitude von  $M_w=8,3$  war dieses eines der stärksten Tiefbeben, das je instrumentell registriert wurde. Durch seine große Tiefe im oberen Mantel regte das Beben Raumwellen an, die auf unterschiedlichen Wegen durch die Erde liefen und noch



Kontakt: C. Sens-Schönfelder  
(sens-schoenfelder@gfz-potsdam.de)

nach vielen Stunden weltweit detektierbar waren. In Abb.1B ist dargestellt, wie stark die seismische Energie nach dem Beben in verschiedenen Frequenzbändern angeregt ist. In den tiefen Frequenzen mit Schwingungsdauern um die 200 s treten Oberflächenwellen auf, die die Erde mehrfach umlaufen und auch nach zehn Stunden noch deutlich erkennbar sind (R1...6). Bei hohen Frequenzen mit Schwingungsdauern um die 2 s herrschen Raumwellen vor, die mehrfach durch die Erde hindurch laufen (P<sup>1</sup>...4), aber schon nach weniger als 5000 s unter das Niveau des Umgebungsrauschens absinken. Dazwischen gibt es einen Bereich, in dem die Energie des Bebens viele Stunden zu beobachten ist, ohne dass sich klare Raumwellen- oder Oberflächenwellenphasen erkennen lassen.

Obwohl dieses Beben eine außergewöhnliche seismische Quelle darstellt, folgt die Ausbreitung der von kleineren Quellen angeregten Wellen denselben Mechanismen – mit dem Unterschied,

dass die Signale schwächer sind und kleine Quellen sehr viel häufiger auftreten. Dies führt dazu, dass sich die Signale kleiner Quellen stets überlagern und in größeren Entfernungen nicht einzeln detektierbar sind. Sie regen damit das seismische Umgebungsrauschen an, dessen Quellen im Einzelnen nicht bekannt sind. Die Untersuchung des Tiefbebens im Ochotskischen Meer erlaubt es demnach, Struktur in die Komplexität des Raumwellenanteils im Umgebungsrauschen zu bringen.

Die Signale dieses Bebens wurden mit zwei getrennten Methoden untersucht, die auf unterschiedliche Anteile des Wellenfelds fokussieren. Im ersten Teil wird die direkte Welle untersucht und im zweiten Teil die späte Koda – der langanhaltende seismische Nachhall im Erdinneren.

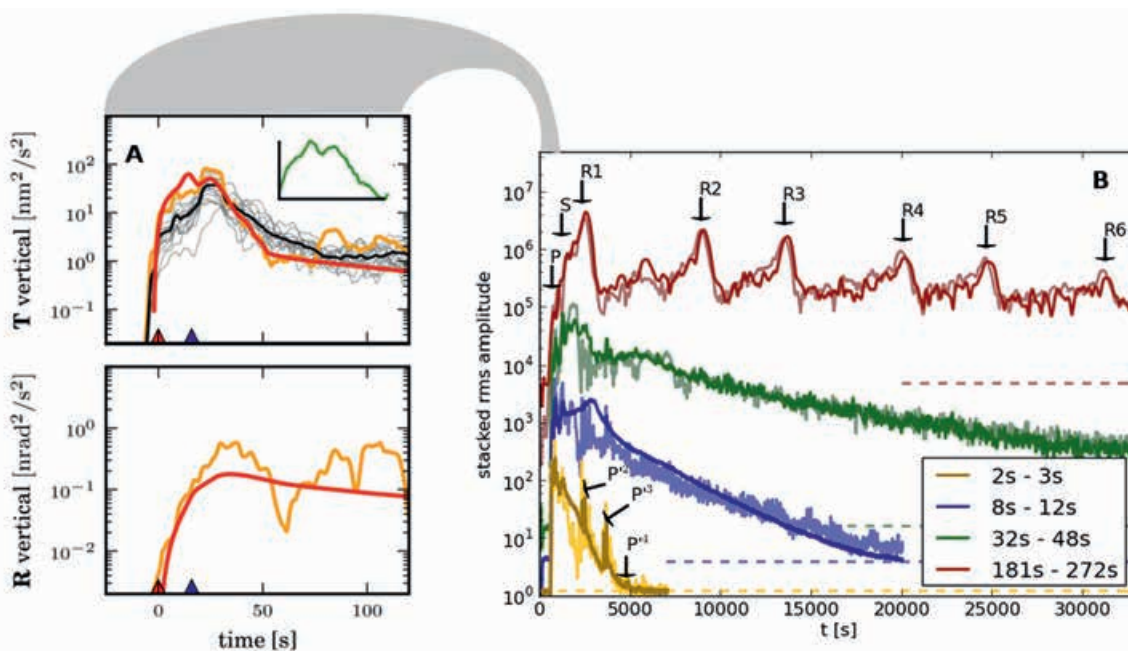


Abb. 1: Seismogrammeinhüllende als Ausdruck der Energieverteilung. A: Direkte Welle mit der frühen Koda als Translationsbewegungen (oben) und Rotationsbewegungen (unten). Daten der Station Wettzell in Orange und Modellvorhersage in Rot. Grau: weitere deutsche Aufzeichnungen. Grün: Quell-Zeit-Funktion des Bebens (Nachdruck aus Gaebler et al., 2015, S. 367, mit freundlicher Genehmigung von Oxford University Press). B: Späte seismische Koda mit verschiedenen Schwingungsdauern. In blassen Farben sind synthetische Berechnungen in einem geschichteten Erdmodell dargestellt. Das Niveau des Umgebungsrauschens in den verschiedenen Periodenbändern ist mit gestrichelten Linien dargestellt (Nachdruck aus Sens-Schönfelder et al., 2015, S. 7484, mit freundlicher Genehmigung von John Wiley and Sons).

Fig. 1: Seismogram envelopes as an expression of the seismic energy distribution. A: Direct wave together with early coda of translational motion (top) and rotational motion (bottom). Data from station Wettzell in orange and model predictions in red. Gray: additional records of german stations. Green: source time function of the event. B: late seismic coda in different period bands. Synthetic calculations in a layered Earth model are shown in pale colors. The noise level is indicated with dashed lines.

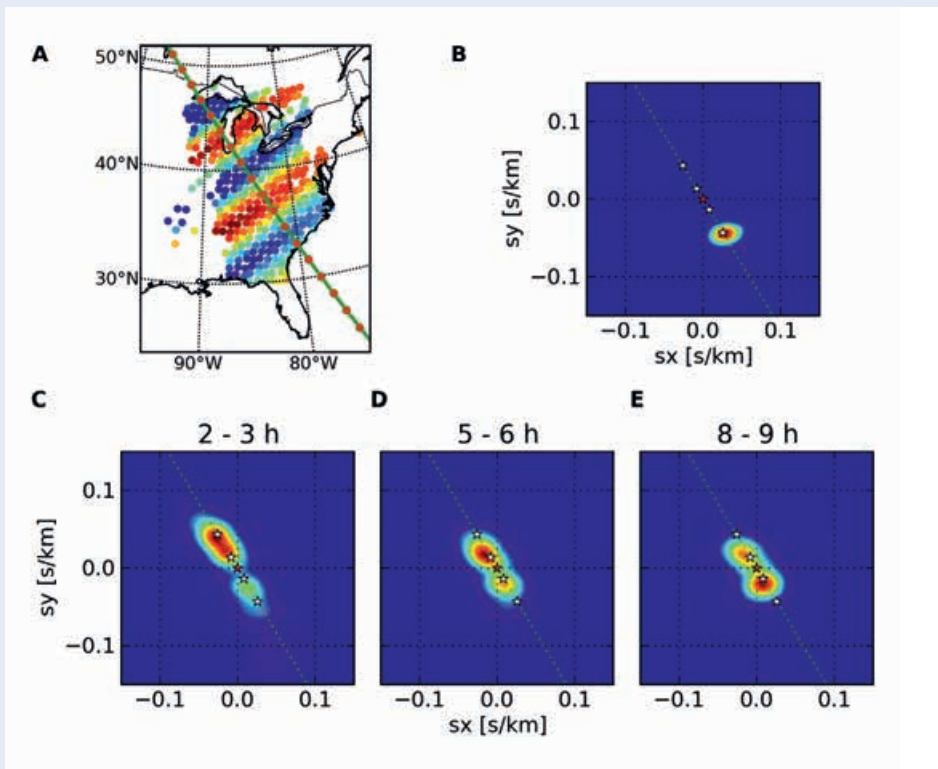


Abb. 2: Wellenfeld des Bebens aus dem Ochotskischen Meer an den Stationen des USArray. A: Verteilung der Seismometerstationen im Osten der USA. Farblich kodiert sind die Amplituden des Wellenfelds zum Zeitpunkt der P-Wellenankunft. Die Richtung zu dem Beben ist mit einer grünen Linie markiert. B: P-Wellenankunft in der Langsamkeitsebene. C, D und E: Energieverteilung in der Langsamkeitsebene gestapelt über verschiedene Zeiträume in der Koda des Bebens (Nachdruck aus Sens-Schönfelder et al., 2015, S. 7485, mit freundlicher Genehmigung von John Wiley and Sons).

Fig. 2: Wavefield of the Sea of Okhotsk earthquake at the stations of the USArray. A) Distribution of seismometer stations in the east of the USA. Color codes are the amplitudes of the wakefield at the time of the P-wave arrival. The direction towards the source of the waves is indicated with a green line. B: Wavefield representation of the P-wave arrival in the slowness plane. C, D, and E: Energie distribution in the slowness plane stacked over different time intervals in the coda of the event.

## Krustale Streuung der direkten teleseismischen Phasen

Aus Untersuchungen regionaler Beben in geringer Entfernung zur Station ist bekannt, dass die Erdkruste im Vergleich zu tieferen Bereichen der Erde sehr heterogen ist und durch diese zahlreichen kleinskaligen Kontraste das Wellenfeld streut (Sens-Schönfelder et al., 2009). Streuung heisst hier, dass die seismischen Wellen ihre Richtung ändern, auf Umwegen durch den Untergrund laufen und auch zu späteren Zeiten noch Schwingungen am Seismometer verursachen – vergleichbar einem Echo von Schallwellen.

Durch eine Modellierung der direkten Wellen des Ochotsk-Bebens bei Perioden von 1s wurde untersucht, inwieweit gän-

gige Modelle zur Beschreibung der Heterogenität der Küste in der Lage sind, die Aufzeichnungen von teleseismischen Wellen zu erklären, die weit durch die tiefe Erde gelaufen sind (Gaebler et al., 2015). Die Modellierung beschreibt den zeitlichen Verlauf der seismischen Energie, also die Einhüllende des Seismogramms. Als neue Beobachtungsgröße mit besonderer Empfindlichkeit für gestreute Wellen wurden dabei die Aufzeichnungen des Ringlasers der geodätischen Fundamentalstation in Wettzell verwendet. Der ursprünglich zur Vermessung der Erdrotation gebaute Ringlaser registriert minimale Drehbewegungen des Untergrunds, die zusätzliche Informationen zu den linearen, mit einem Seismometer gemessenen Bewegungen darstellen. Da Rotationsbewegungen nur von Scherwellen ausgelöst werden können, belegt deren Beobachtung nach dem Eintreffen einer Kompressionswelle die Konversion

zwischen diesen Wellentypen durch Streuung im heterogenen Untergrund. In Abb. 1A sind die Seismogrammeinhüllenden der direkten P-Welle des Ochotsk-Bebens in Wettzell zusammen mit den Vorhersagen des Modells dargestellt. Sowohl die Seismometeraufzeichnungen als auch die Registrierungen des Ringlasers können durch Streuung in der Kruste erklärt werden. Die teleseismischen Wellen dieses Tiefbebens laufen demnach weitgehend ungestört durch das Erdinnere und werden erst in der Kruste unterhalb der Station gestreut.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie sich die auf die Kruste beschränkte Streuung nach längerer Zeit auswirkt, wenn die seismischen Wellen mehrfach durch die Erde gelaufen sind.

### Teleseismische Koda

Daher wurden in der zweiten Analyse die Richtungen untersucht, in der sich die Wellen zu späten Zeiten in der Erde ausbreiten (*Sens-Schönfelder et al., 2015*). Dazu wurden Wellen mit Perioden von 10 bzw. 40 s verwendet. Als Antenne für die Untersuchung diente das USArray – ein aus etwa 400 Stationen bestehendes Seismometernetzwerk in den USA (Abb. 2A). Diese dichte Konfiguration von Stationen erlaubt es, wie mit einer Peilantenne die Richtung zu identifizieren, aus der seismische Wellen im Netzwerk eintreffen. In Abb. 2A ist das Wellenfeld zu dem Zeitpunkt farblich illustriert, in dem die direkte P-Welle im Netzwerk eintrifft. Deutlich zu erkennen ist die Orientierung der

Wellenfront senkrecht zum Azimuth der Ausbreitungsrichtung. Mit Kenntnis von Frequenz und Wellenlänge lässt sich aus dieser Darstellung auch der Auftauchwinkel der Welle ablesen. Die so genannte Langsamkeitsebene ist besser geeignet, um die Verteilung der seismischen Energie in den verschiedenen Raumrichtungen darzustellen, wie dies in Abb. 2B für den zu Abb. 2A korrespondierenden Zeitpunkt und Perioden um 40 s gezeigt ist. Wellen, die direkt von unten auf das Netzwerk einfallen, führen in der Langsamkeitsebene zu einem Maximum direkt im Zentrum. Je flacher die Wellen einfallen, umso weiter entfernt sich deren Signatur vom Zentrum der Darstellung. Die Orientierung des Maximums gibt dabei die Richtung an, in der die Wellen laufen. Die direkten P-Wellen stellen demnach eine ebene Welle dar, die aus einer klar definierten Richtung in das Array einfällt (Abb. 2B).

Zu späteren Zeiten wie in Abb. 2C-E dargestellt, lassen sich in den Seismogrammeinhüllenden in Abb. 1B keine definierten Phasen mehr erkennen und das Wellenfeld scheint von Streuprozessen geprägt zu sein. Dadurch weichen die definierten Phasen einer glatten Energieverteilung, die exponentiell abklingt. Auch regionale Beben, die in einer Entfernung von wenigen hundert Kilometern beobachtet werden, zeigen solche exponentiell abklingenden Seismogramme, wenn das Wellenfeld durch Streuung jedwede Ordnung verloren hat und Bestandteile enthält, die in alle möglichen Richtungen laufen. Die Arrayanalyse der teleseismischen Kodawellen in der Langsamkeitsebene zeigt hingegen eine eindeutige Vorzugsrichtung. Die Wellen laufen auch nach acht

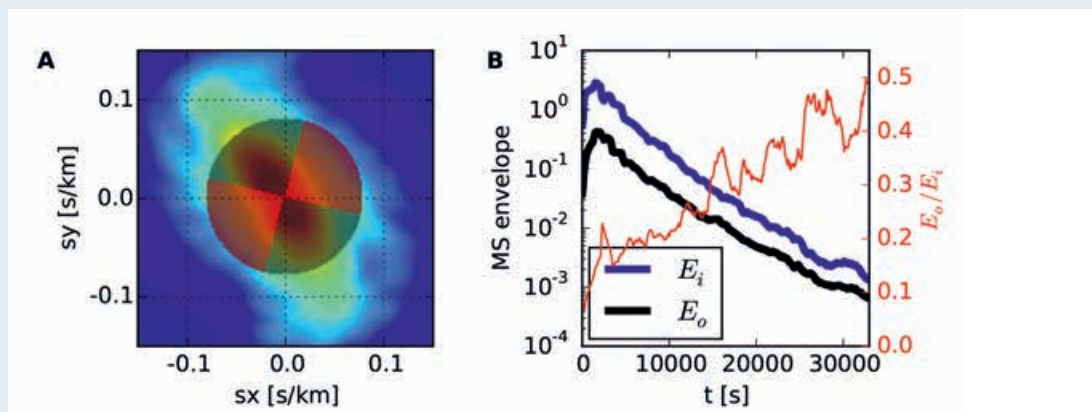


Abb. 3: Vergleich der Energieverteilung in Richtung des Großkreises ( $E_i$ ) und senkrecht dazu ( $E_o$ ). A: Bereiche der Langsamkeitsebene, die zur Bestimmung der Energien herangezogen wurden. B: Zeitlicher Verlauf von  $E_i$  und  $E_o$  sowie deren Verhältnis. Zu erkennen ist der in etwa exponentielle Abfall der Energie in beiden Richtungen sowie die die langsame Annäherung beider Kurven durch den streuungsbedingten Energieaustausch zwischen den  $E_i$  und  $E_o$  (A: Nachdruck aus Sens-Schönfelder et al., 2015, S. 7487, mit freundlicher Genehmigung von John Wiley and Sons; B: ebd., leicht verändert).

Fig. 3: Comparison of the energy distribution in the direction of the great circle ( $E_i$ ) and perpendicular to it ( $E_o$ ). A: Segments of the slowness plane used for the estimation of the energies. B: Temporal evolution of  $E_i$  and  $E_o$  and their ratio. One can recognize the approximately exponential decrease of the energy in both directions and the slow convergence of both curves related to the exchange of energy between  $E_i$  and  $E_o$  by scattering.

Stunden entlang des Großkreises, der Station und Empfänger verbindet. Die langanhaltende Koda teleseismischer Beben stellt also kein zufälliges, diffuses Wellenfeld dar, obwohl die Energieverteilung in der Zeit keine getrennten Phasen erkennen lässt. Um die Ursache für diesen Unterschied zu untersuchen, wurden Wellenfeldsimulationen berechnet, die vorhersagen, wie die Signale des Bebens im Ochotskischen Meer an den USArray-Stationen aussehen würden, wenn die Erde aus lateral homogenen Schalen bestünde. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in Abb. 1B in blassen Farbtönen eingezeichnet. In tiefen Frequenzen werden die Beobachtungen erwartungsgemäß sehr gut von dem Schalenmodell vorhergesagt. Dies ist selbst bei Perioden um 10 s noch der Fall. Da es in dem theoretischen Schalenmodell zu keiner Streuung kommt, entsteht die zeitlich glatte Energieverteilung durch den internen Nachhall innerhalb der Schalenstruktur, die ausschließlich kugelförmige Schichtgrenzen hat und damit die persistente Vorzugsrichtung der Wellenausbreitung ermöglicht. Da die Laufzeiten der teleseismischen Koda ein Vielfaches der Zeit betragen, in der die Wellen die Erde durchlaufen, wirkt der Erdkörper bei diesen langen Laufzeiten als geschlossenes System.

Dennoch interagieren auch die Wellen in der späten Koda mit der Erdkruste, die wie oben erklärt, zu Streuung führt. Zu sehr langen Zeiten wird sich also die Energie in alle Richtungen verteilen und die Vorzugsrichtung entlang des Großkreises verlieren. Dieser graduelle Übergang zu einer isotropen Energieverteilung wurde mit einem einfachen Vergleich der Energie untersucht, die auf dem Großkreis und senkrecht dazu läuft. In Abb. 3A sind die Bereiche der Langsamkeitsebene dargestellt, die für den Vergleich herangezogen wurden. Der zeitliche Verlauf der Energien in diesen Bereichen in Abb. 3B zeigt eine etwa exponentielle Abnahme über mehrere Größenordnungen. Deutlich zu erkennen ist aber auch, dass die Energien nicht in einem konstanten Verhältnis zueinander stehen, sondern sich mit zunehmender Zeit annähern. Aus dem Anstieg des Verhältnisses lässt sich die Zeitkonstante für die Streuprozesse berechnen, die aus der Großkreisrichtung herausführen. Diese liegt bei rund zehn Stunden.

## Fazit

Da die seismische Interferometrie auf diffuse Wellenfelder angewiesen ist, ist für deren Anwendung auf Raumwellen in teleseismischen Distanzen die Kenntnis der Eigenschaften des Wellenfelds von großer Bedeutung. In der ersten Untersuchung konnte unter anderem mit Hilfe des Ringlasers in Wettzell gezeigt werden, dass auch bei teleseismischen Wellen die Streuung in der Kruste unterhalb des Sensors für die Signalform maßgeblich ist. Dies gilt für Perioden um 1 s. Bei diesen Perioden klingt das Wellenfeld aufgrund der Streuung relativ schnell ab und ist im Falle des Ochotsk-Bebens nach 1,5 h im Bereich des Umgebungsrauschens. Bei längeren Perioden ist das Wellenfeld über viele Stunden oberhalb des Rauschens zu detektieren. In der zweiten Untersuchung wurde gezeigt, dass dieser

Teil des Wellenfelds hauptsächlich mit der 1D-Schalenstruktur der Erde interagiert und nur sehr schwach an 3D-Strukturen gestreut wird. Es dauert etwa zehn Stunden, um die Vorzugsrichtung entlang des Großkreises zu verwischen. Die teleseismische Koda größerer Beben ist also nur in bestimmten Fällen für die interferometrische Rekonstruktion seismischer Phasen geeignet. Dazu müssen die Stationen auf einem gemeinsamen Großkreis mit der Quelle und in einem geeigneten Abstand voneinander liegen. Die gleichen Einschränkungen gelten für die schwachen Quellen des Umgebungsrauschens.

Um teleseismische Wellen zwischen zwei Stationen rekonstruieren zu können, müssen also Quellen entlang des Großkreises aktiv sein, der die beiden Stationen verbindet. Ein wichtiger Spezialfall sind Stationen, die im Vergleich zur Wellenlänge eng beieinander stehen. Bei diesen Stationen tragen alle Richtungen zur Rekonstruktion von Reflexionen aus der tiefen Erde bei. Da dies für tiefe Frequenzen bei vielen seismologischen Feldexperimenten des GFZ der Fall ist, bilden diese Ergebnisse eine Grundlage, um neue Signalquellen für die Untersuchung der tiefen Erde zu erschließen.

## Literatur

- Gaebler, P. J., Sens-Schönfelder, C., Korn, M. (2015): The influence of crustal scattering on translational and rotational motions in regional and teleseismic coda waves. - *Geophysical Journal International*, 201, pp. 355–371.
- Gassner, A., Thomas, C., Krüger, F., Weber, M. (2015): Probing the core–mantle boundary beneath Europe and Western Eurasia: A detailed study using PcP. - *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 246, pp. 9–24.
- Snieder, R., Sens-Schönfelder, C. (2015): Seismic interferometry and stationary phase at caustics. - *Journal of Geophysical Research*, 120, 6, pp. 4333–4343.
- Sens-Schönfelder, C., Margerin, I., Campillo, M. (2009): Laterally heterogeneous scattering explains Lg blockage in the Pyrenees. - *Journal of Geophysical Research*, 114, B07309.
- Sens-Schönfelder, C., Eulenfeld [Richter], T. (2013): Am Puls der Erde - Natürliche Vibrationen und deren Analyse mit der seismischen Interferometrie. - *System Erde*, 3, 1, pp. 32–39.
- Sens-Schönfelder, C., Snieder, R., Stähler, S. C. (2015): The lack of equipartitioning in global body wave coda. - *Geophysical Research Letters*, 42, 18, pp. 7483–7489.
- Yuan, X., Kind, R., Li, X., Wang, R. (2006): The S receiver functions: synthetics and data example. - *Geophysical Journal International*, 165, 2, pp. 555–564.

# Neue Einsichten in den Ablauf großer Erdbeben

**Kombination innovativer Analyseverfahren erlaubt Rekonstruktion von Bruchverläufen**

Frederik Tilmann<sup>1</sup>, Bernd Schurr<sup>1</sup>, Simone Cesca<sup>1</sup>, Torsten Dahm<sup>1</sup>, Joachim Saul<sup>1</sup>, Mauro Palo<sup>1</sup>, Marcos Moreno<sup>1</sup>, Jonathan Bedford<sup>2</sup>, Onno Oncken<sup>1</sup>, Rongjiang Wang<sup>1</sup>, Yong Zhang<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Peking University, Beijing, China

*In news reports we are accustomed to see earthquakes symbolised with a dot or star on a map and associated with a magnitude, the bigger the scarier. For at least moderately sized earthquakes seismologists additionally have been routinely determining the type of rupture just from observing the pattern of radiated seismic energy. In reality earthquakes do not occur as a point but rupture a fault plane. For small earthquakes this distinction can be neglected but for the largest earthquakes the rupture plane can extend for hundreds of kilometres, and the actual rupture propagation begins to have a strong influence on the hazard that the earthquake presents – whether the rupture proceeds to the north or the south and how deep and shallow it reaches determines which cities will be hit the hardest, whether shaking is moderate or intense, and whether a sizeable tsunami is triggered. The explosion of the availability of ground-, ocean- and space-based observation technologies in the last decade has allowed seismologists to map the rupture process in unprecedented detail even for challenging subduction zone earthquakes. The same technology can be used to observe potential precursory processes and the postseismic relaxation by which the earth regains its equilibrium following the disturbance that a great earthquake represents. Focussing on the Mw 8.1 Iquique earthquake in northern Chile on April 1, 2014, we will discuss the state-of-the-art in monitoring great earthquakes and their aftermath.*





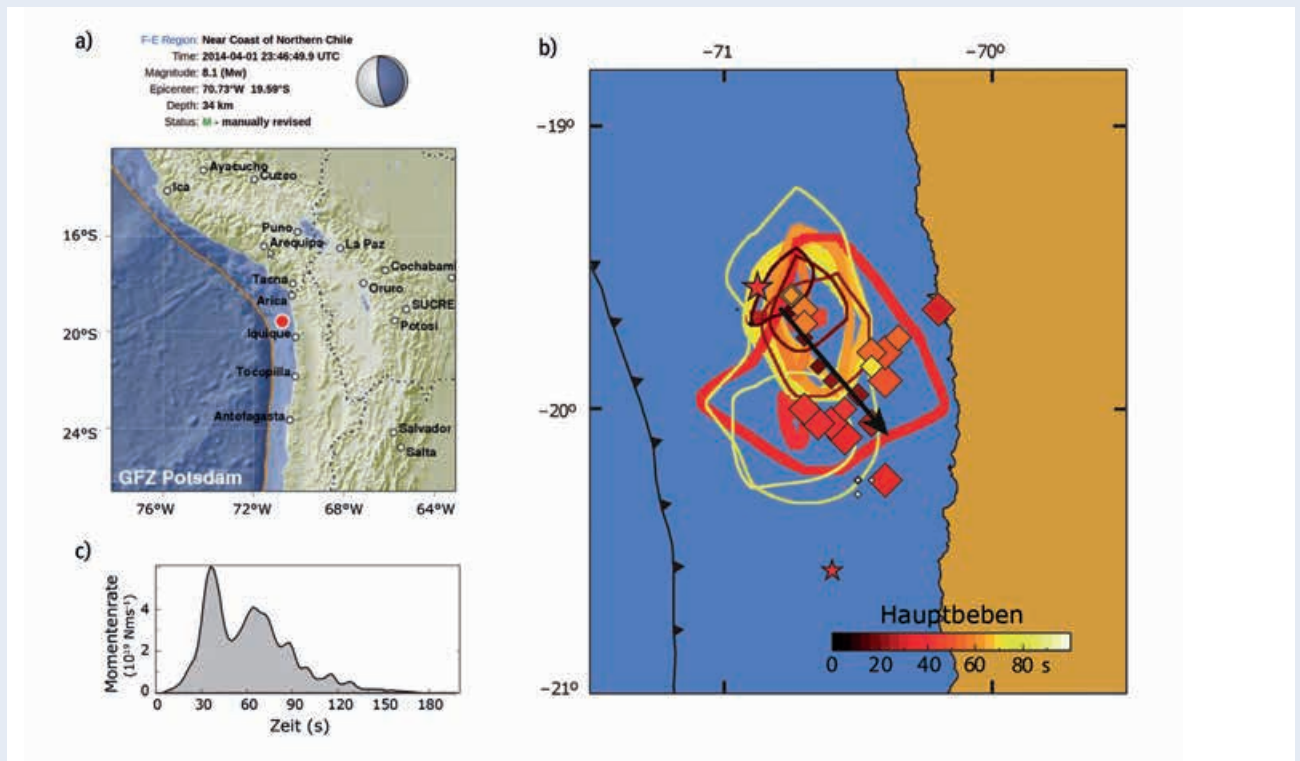


Abb. 1: Von GEOFON-Lösung zu detaillierter Bruchausbreitung. (a) Ergebnis der Routine-Auswertung für größere Beben (Magnitude >5): Epizentrum und Magnitude sind bereits nach wenigen Minuten mit einer automatisierten Analyse grob bestimmt; der Momententensor (dargestellt als „beach ball“) wird mit Hilfe von Wellenformmodellierung bestimmt (innerhalb 1 h) und zeigt an, um welche Art Bruch es sich handelt. (b) Ergebnis der detaillierten Modellierung der Daten von verschiedenen Sensortypen (GPS, Seismometer, Beschleunigungsmesser). Die Konturen geben an, welcher Teil der Bruchfläche sich zu einem bestimmten Zeitpunkt bewegt (s. Farbskala), während die Rauten anzeigen, welcher Teil des Bruchs die meiste hochfrequente seismische Energie abstrahlt und damit auch lokal die stärksten Erschütterungen verursacht. (c) Der zeitliche Verlauf zeigt an, dass das Beben nach rund 30 s seinen Höhepunkt erreicht hat (größte Verschiebungsraten) und signifikante seismische Energie für mindestens 90 s freigesetzt wurde (b und c modifiziert aus Schurr et al., 2014).

Fig. 1: From GEOFON alert to detailed rupture imaging. (a) Result of routine analysis for larger earthquakes with epicentre and magnitude available after a few minutes; a moment tensor is determined with some additional delay. (b) Detailed modelling results. Contours show at which time which part of the rupture plane moved (colour scale). Diamonds indicate, which part of the rupture plane was emitting high frequency seismic energy. (c) The source time function of the earthquake indicates that it reached its peak about 30 s after nucleation, but continued to radiates seismic energy for at least 90 s (modified after Schurr et al., 2014).

Die Bewohner der nordchilenischen Küstenstadt Iquique waren beunruhigt. Im März 2014 kam es häufiger zu spürbaren Erdbeben; auch im Januar sowie im vorherigen Sommer gab es bereits Erdbebenschwärme, die aber weniger heftig ausfielen (Schurr et al., 2014; Cesca et al., 2016). Der nordchilenische Kontinentalrand ist als besonders erdbebengefährdet bekannt, da dort 1877 ein gigantisches Beben mit einer Magnitude von etwa 8,8 und

der vom Beben ausgelöste Tsunami weiträumig Zerstörungen verursachten. Zudem ist der typische Zeitraum zwischen großen Beben auf der Plattengrenzfläche zwischen der Nazca-Platte und der südamerikanischen Platte in dieser Region etwa 100 bis 150 Jahre, so dass jederzeit mit einem großen Beben gerechnet werden muss. Man spricht von einer seismischen Lücke, da seit 1877 kein Beben mit einer Magnitude größer als 8 in dieser Region aufgetreten ist. In den Abendstunden des 1. April 2014 kam es dann tatsächlich zu einem sehr starken Beben der Magnitude 8,1. Schon nach wenigen Minuten wurde das Beben am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ und auch vom chilenischen Erdbebedienst lokalisiert und seine Magnitude bestimmt (Abb. 1a). Ein Tsunami-Alarm wurde ausgelöst und die Küstenstreifen evakuiert. Der Tsunami war mit etwas über 2 m Höhe noch recht moderat und verursachte nur lokal Schäden. Trotz zahlreicher beschädigter Gebäude kam es zu nur sechs Todesfällen.

Links: GPS-Station in Zentralchile (Foto: M. Moreno, GFZ)

Left: GPS station in central Chile



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



Abb. 2: Wartung einer seismischen Station in Nordchile  
(Foto: F. Tilmann, GFZ)

Fig. 2: Maintenance of a seismological station in North Chile

Für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am GFZ sind Erdbeben in Nordchile von besonderem Interesse, da sie dort über die letzten Jahre hinweg zusammen mit Partnerorganisationen ein großräumiges, verteiltes Plattengrenzen-Observatorium (IPOC – Integrated Plate Observatory of Chile, [www.ipoc-network.org](http://www.ipoc-network.org), Victor et al., 2011) aufgebaut haben, bei dem mit Seismometern, GPS-Stationen, Beschleunigungsmessern und anderen Geräten über eine Länge von rund 600 km die Erde kontinuierlich „belauscht“ und vermessen wird (Abb. 2). Ziel ist es, Einblick in Prozesse zu gewinnen, die das Entstehen und den Ablauf von Erdbeben beeinflussen.

Eine erste wissenschaftliche Analyse des Iquique-Bebens befasst sich mit der Frage, welcher Teil der Plattengrenze tatsächlich gebrochen ist und wie der Bruch verlaufen ist. Denn der Punkt, der z. B. auf Karten in den Nachrichten das Erdbeben repräsentiert, markiert nur das Hypozentrum, der Punkt im Untergrund, an dem der Bruchprozess startet (das Epizentrum ist der Punkt an der Erdoberfläche direkt über dem Hypozentrum). Doch wie der Bruch sich ausbreitet – ob nach Norden oder Süden, über welche Entfernungen und mit welcher Geschwindigkeit – bestimmt, welche Gemeinden am stärksten betroffen sind, ob ein großer Tsunami ausgelöst wird und ob die Erschütterungen stark sind

oder nur moderat. Zudem liefern detaillierte Informationen zur Bruchausbreitung von Starkbeben Hinweise zur Erdbebenphysik und helfen, die Eigenschaften der aufgrund ihrer Tiefe nicht direkt beobachtbaren Plattengrenze und ihren Einfluss auf den Bruchverlauf zu bestimmen.

### Kartieren der Oberflächendeformation: InSAR, GNSS und Tsunami-Bojen

Da die meisten Aufschiebungsbeben an der Plattengrenzfläche nicht bis zur Oberfläche brechen und ein Oberflächenbruch ohnehin vor der Küste unter Wasser läge, hinterlassen diese Beben keinen klar definierten Oberflächenriss in der Landschaft, anhand dessen sich die Dimensionen des Bruchs kartieren ließen. Allerdings verursacht die gegenseitige Verschiebung der beiden Seiten des Bruchs im Untergrund bei großen Beben weiträumige Oberflächendeformationen, aus denen sich grundlegende Eigenschaften wie die Länge des Bruchs und der Versatz entlang der Bruchfläche bestimmen lassen. Für Beben an der Plattengrenzfläche in Subduktionszonen zeigen die horizontalen Bewegungen in Küstennähe seewärts und in Richtung des größten Versatzes im Untergrund, aber werden mit zunehmender Entfernung zum Bruch geringer (Abb. 3a). Auch vertikale Bewegungen können an der Küste gemessen werden. Diese sind meist relativ klein, aber dennoch aufschlussreich. Direkt oberhalb des Bruchs kommt es zur Hebung, wobei dieser Bereich meist unter Wasser ist, während es landwärts im Bereich des unteren Bruchendes zur Absenkung der Erdoberfläche kommt. Der Übergang von Hebung zu Senkung findet sich häufig in Küstennähe und hilft insbesondere die Position des tieferen, landseitigen Bruchendes zu bestimmen.

Welche Möglichkeiten gibt es, Oberflächendeformationen zu erfassen? Empfangsstationen für die Signale von Navigationssatelliten (z. B. GPS, siehe auch Foto S. 24) erlauben eine direkte Messung der Bewegung der Erdoberfläche. In vielen Subduktionszonen (z. B. Japan und Chile) gibt es neben den traditionellen Wiederholungsmessungen mit mobilen Geräten an speziell eingerichteten Messpunkten bereits Netze von kontinuierlich operierenden GPS-Stationen. Eine andere satellitengestützte Technologie ist die Radar-Interferometrie (InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar), bei der Satellitenradarbilder vor und nach dem Beben verglichen werden. Damit kann man zwar nur die Verschiebung in Blickrichtung des Satelliten rekonstruieren, dies aber mit einer räumlichen Auflösung von wenigen Kilometern und einer Genauigkeit im Zentimeter-Bereich. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass sie in vegetationsreichen Regionen nicht oder nur sehr eingeschränkt angewendet werden kann, da die Vergleichbarkeit der Bilder vor und nach dem Erdbeben nicht mehr gegeben ist. Sowohl InSAR als auch GPS-Messungen sind landgebunden, was im Falle des Iquique-Bebens und anderer Subduktionszonenbeben eine erhebliche Einschränkung darstellt, da die Bruchfläche meist unterseeisch ist. Dadurch ist der Versatz insbesondere im flachen Teil des Bruchs in der Nähe des Tiefseegrabens, der einen dominanten Einfluss auf die Größe des ausgelösten Tsunami

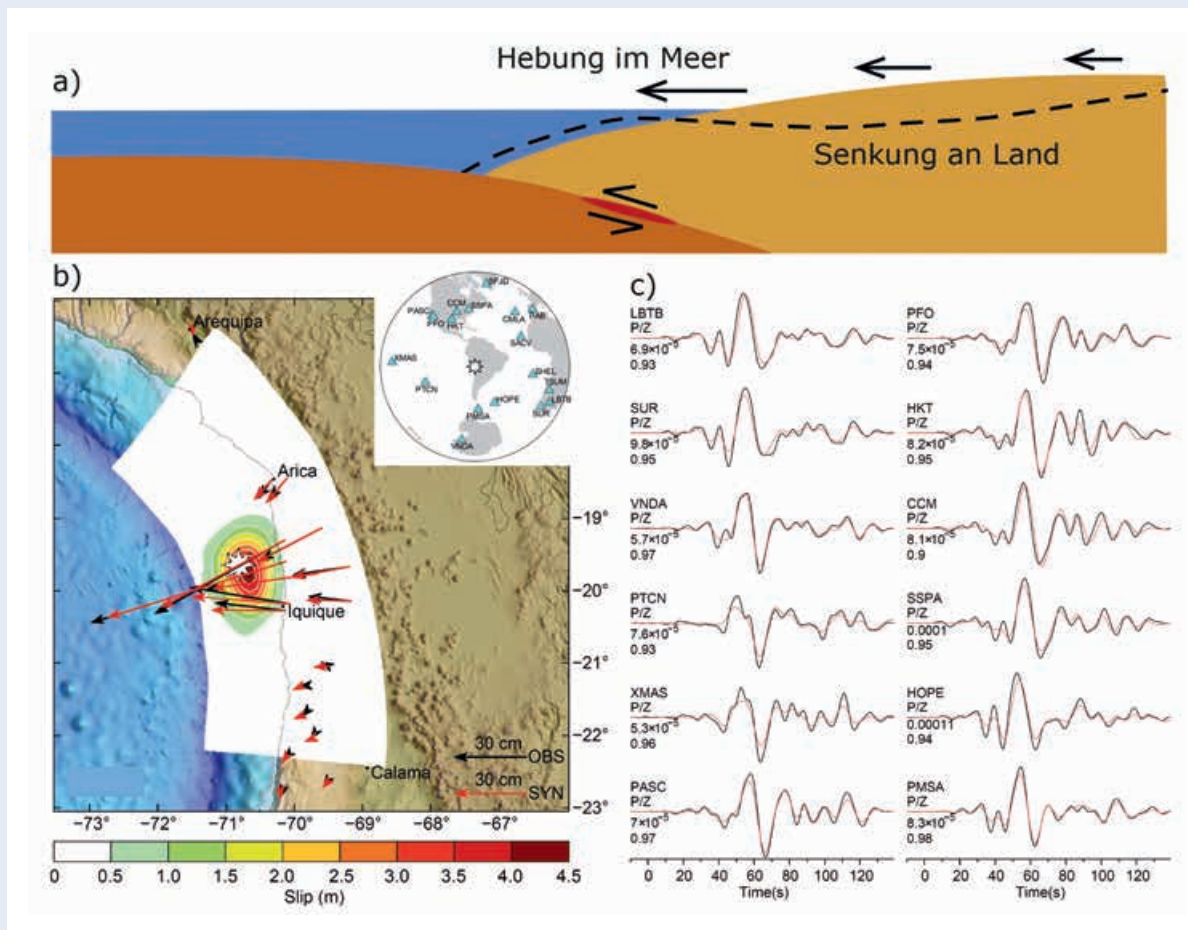


Abb. 3: (a) Schematisches Profil durch eine Subduktionszone. Pfeile stellen die horizontale Bewegung der Oberfläche in Folge des Bebens dar. Die gestrichelte Linie veranschaulicht stark übertriebene vertikale Bewegung der Oberfläche in Folge des Bebens. Hebung tritt direkt oberhalb des Bruchs ein, während es landseitig des Bruchs zu Senkung kommt. (b) Modell der Gesamtverschiebung entlang der Subduktionszonenplattengrenze während des Iquique-Erdbebens. Der maximale Versatz betrug rund 4,5 m. Die schwarzen Pfeile zeigen die kumulative horizontale Deformation der Erdoberfläche, also der Unterschied in den Positionen vor und nach dem Beben, gemessen mit GPS-Stationen. Die roten Pfeile zeigen an, welche Oberflächen deformation sich aus dem Verschiebungsmodell ergibt. Kleine Unterschiede treten auf, weil ein vereinfachtes Strukturmodell des Untergrunds angenommen wird und das Verschiebungsmodell nicht nur die Deformationsdaten anpasst, sondern auch eine Reihe anderer Datensätze. (c) Die schwarzen Wellenformen zeigen eine Auswahl der weltweit aufgenommenen P-Wellen (Primärwellen, Kompressionswellen) dieses Bebens, während die roten Wellenformen die vom Modell vorhergesagten Daten zeigen, wobei jeweils die Bodengeschwindigkeiten in vertikaler Richtung gezeigt werden. Die Seismogramme wurden zusätzlich gefiltert, um schwierig zu modellierende, höherfrequente Ausschläge zu entfernen und den am einfachsten zu interpretierenden Anteil des Signals zu isolieren. Die Vertikalskala ist für jede Station verschieden, aber Maximalausschläge reichen von rund 0,1 mm/s für die nächste gezeigte Station HOPE.

Fig. 3: (a) Schematic profile through a subduction zone, with arrows representing the cumulative horizontal displacement during the earthquake, and the dashed line representing vertical movements. (b) Model of the total displacement along the plate boundary during the Iquique earthquake. The maximum displacement was 4.5 m. Here, the observations are shown in black and the results of the synthetic model in red. (c) Comparison of observed (in black) and predicted (in red) teleseismic P arrivals. The vertical scale is different for each trace; the peak amplitude at HOPE, the closest station shown, is 0.1 mm/s.

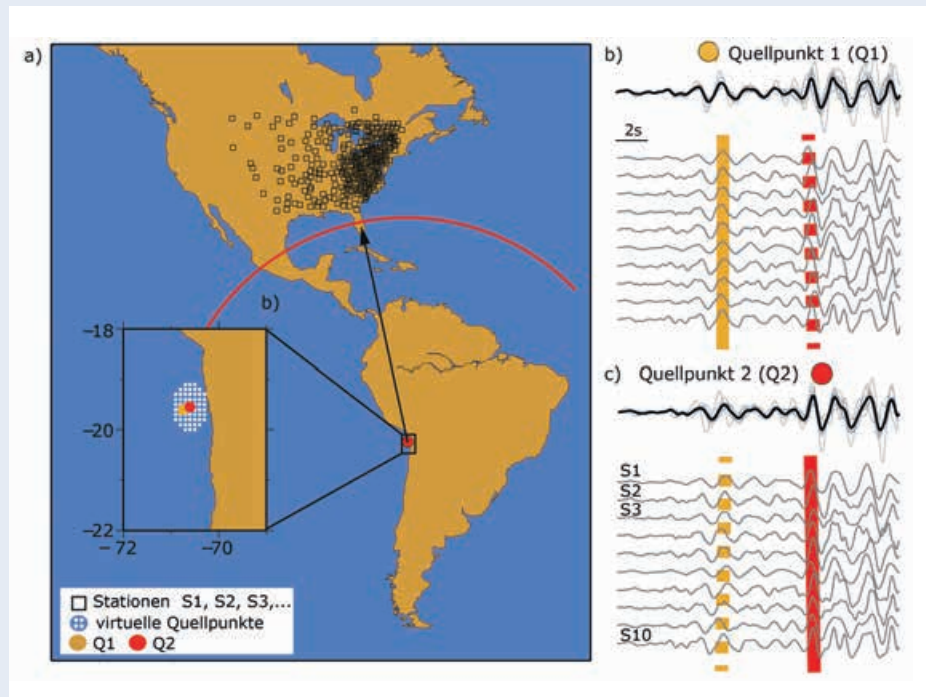


Abb. 4: Funktionsweise der Backprojection-Methode. Relativ dichte, aber großskalige Stationsnetze (a) lassen sich als Richtantennen für Erdbeben nutzen. Neben dem gezeigten USArray gibt es dichte Netze mit öffentlich zugänglichen Daten auch in Europa, Japan und Australien. Wenn die Seismometerdaten, auf denen eine seismische Welle aufgenommen wird, zeitlich verschoben werden, um die Laufzeit der Welle auszugleichen, und dann alle aufsummiert werden, ergibt sich aufgrund konstruktiver Interferenz ein starkes Signal. Anders als eine analoge Fernsehantenne, die man physikalisch in Richtung des Senders ausrichten muss, um das beste Signal zu bekommen, lässt sich die seismische Antenne im Computer ausrichten, indem man die erwarteten Laufzeiten für verschiedene mögliche Quellpunkte berechnet. Die optimale konstruktive Interferenz zu jedem Zeitpunkt wird beim tat-

sächlichen Quellpunkt erzielt. Im Detailkartenausschnitt wird das Gebiet des Iquique-Bebens mit zwei potenziellen Quellpunkten gezeigt. In (b) sind die Einzelspuren (unten) entsprechend des orangenen Quellpunkts ausgerichtet, womit die Wellenformen zum Beginn des Bebens konstruktiv interferieren und sich die maximale Amplitude in der Stapelung ergibt. Aber schon einige Sekunden später (c) ist die Ausrichtung nicht mehr perfekt, da der Bruch etwa 15 km in Richtung Land gewandert ist. Jetzt muss die Position des roten Punkts für die Ausrichtung verwendet werden, damit die später sichtbaren Wellen optimal stapeln. Für die Abbildung wird nur ein kleiner Bruchteil der insgesamt 310 Stationen gezeigt, die in der Studie herangezogen wurden. Die Ergebnisse der Backprojection Analyse werden in Abb. 1 mit Rauten gezeigt.

Fig. 4: Illustration of the backprojection method. (a) The signals originating from the earthquake zone in northern Chile are recorded with USArray stations and other stations in North America. In the backprojection method, the seismic traces are time-shifted according to a systematic search of trial points in the source area and then stacked. The maximum coherency of the stack is achieved if the trial emission point is close to the actual peak of high frequency seismic emissions. For example, at the beginning of the rupture, the alignment according to the orange source point results in the highest coherency. A few seconds later the rupture has propagated downdip and now alignment according to the red emission point maximises the coherency.

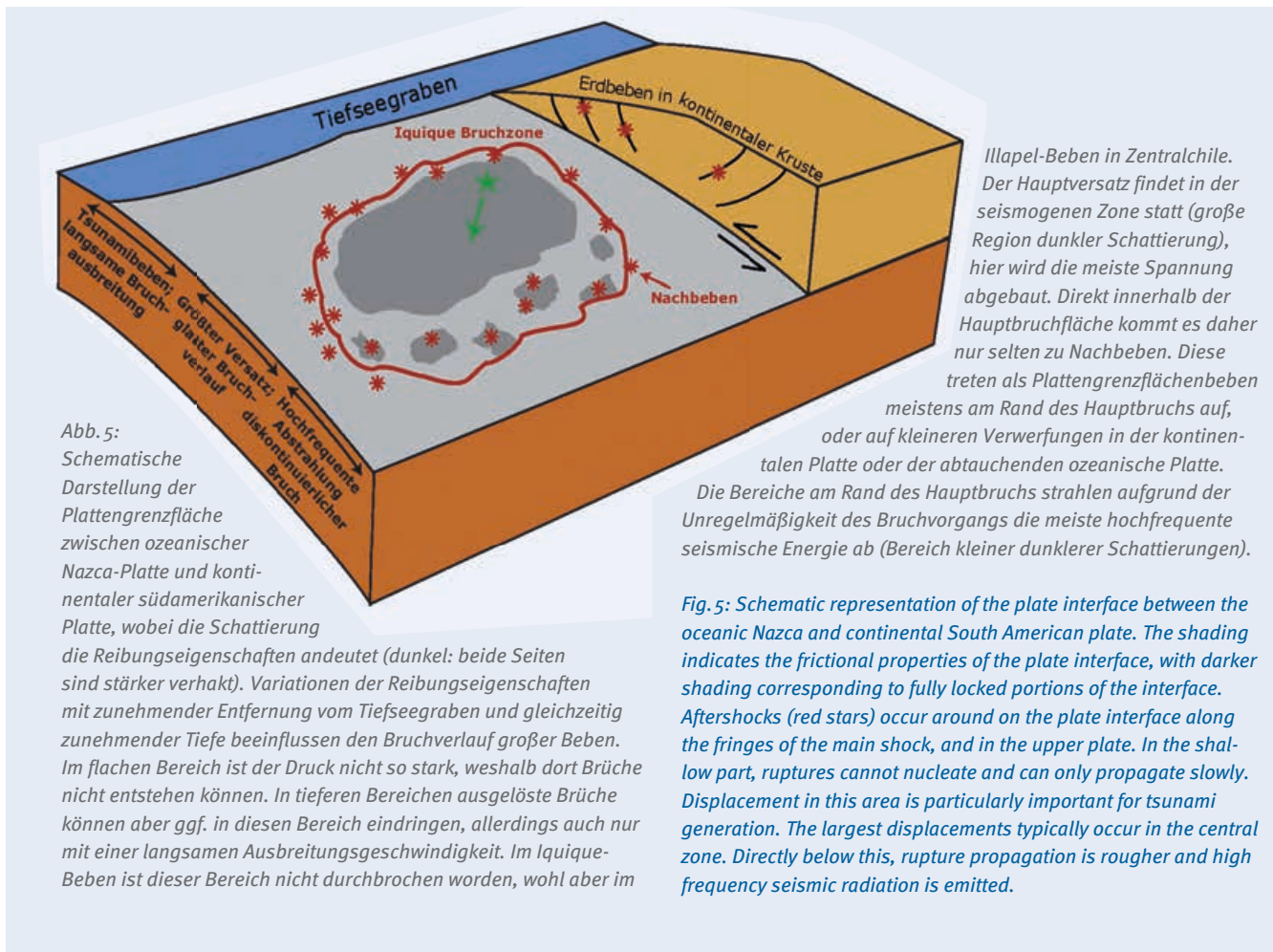
hat, sehr schwierig einzugrenzen. Allerdings liegt im Zusammenhang mit der Tsunami-Größe auch eine Chance. Auf hoher See haben Tsunami nur eine Höhe von wenigen Zentimetern. Auch diese kleinen Wellen verursachen messbare Druckänderungen am Meeresboden, die von Drucksensoren aufgezeichnet werden. Vergleiche mit Modellrechnungen erlauben dann im Zusammenspiel mit den bereits beschriebenen Deformationsmessungen eine Rekonstruktion des Bruchs in der Nähe des Tiefseegrabens. Vereinfacht lässt sich sagen, dass je größer der vertikale Versatz des Meeresbodens ist und in je tieferem Wasser der Versatz stattfindet, desto größer fällt der Tsunami aus. Nur der Gesamtversatz des Bebens ist relevant, nicht der zeitliche Bruchablauf, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Tsunami erheblich unterhalb der Bruchgeschwindigkeit liegt.

Das Iquique-Beben hat den flachen Bereich der Plattengrenzfläche nicht durchbrochen und die Dimension des Bruchs ist rund 120 x 80 km<sup>2</sup>, erheblich weniger als der Bereich der seismischen Lücke, so dass das Potenzial für ein Rieseneben weiterhin vor-

handen ist. Allerdings hat das Iquique-Beben die Lücke quasi in zwei Hälften geteilt. Es gibt daher Anlass zur Hoffnung, dass die Lücke in diesem Zyklus in zwei weiteren Beben im Magnitudenbereich bis 8,5 brechen wird, anstatt mit einem einzigen Mega-Beben der Magnitude 8,7 bis 8,9.

### Der dynamische Bruchprozess: Wellenformmodellierung

Um den tatsächlichen Bruchverlauf rekonstruieren zu können, wird auf seismische Signale zurückgegriffen. Hierbei sind zwei Ansätze zu unterscheiden: bei der Wellenformmodellierung werden mit Hilfe eines Geschwindigkeitsmodells synthetische Seismogramme für Punktquellen entlang der Bruchfläche erzeugt. Aus der Summierung dieser Einzelmodellierungen können synthetische Seismogramme für verschiedene Bruchszenarien berechnet werden, wobei dann das wahrscheinlichste Bruchmodell die Unterschiede zwischen synthetischen und tatsächlichen Wellen-



formen minimiert. Die Wellenformen können von weltweit operierenden Seismometernetzen stammen (Abb. 3b, c), aber auch von Beschleunigungsmessern vor Ort aufgezeichnet werden. Eine neuere Entwicklung verwendet dynamische GPS-Daten, d. h. es wird nicht nur der Gesamtversatz berücksichtigt, sondern die Bewegung des Sensors während des Bebens wird rekonstruiert. Der GPS-Empfänger wird damit letztendlich als Seismometer mit geringer Empfindlichkeit, aber ohne Obergrenzen für die maximal aufzeichnenbaren Bodenerschütterungen eingesetzt. Die Wellenformmodellierung funktioniert besonders gut für tiefe Frequenzen, da die Untergrundmodelle für diese Wellen relativ gut stimmen und die Rechenzeiten überschaubar sind.

Der zweite Ansatz, die sogenannte Backprojection, kombiniert viele Stationen auf einem Kontinent, mit denen quasi als seismologische Peilantenne die Punkte geortet werden, von denen kohärente seismische Wellen ausgehen (Abb. 4). Beide Methoden sind komplementär und ergeben eine unterschiedliche Sicht auf den Bruchprozess: während die Wellenformmodellierung eine niedrig aufgelöste Sicht auf den gesamten Bruchprozess ergibt, wird hochfrequente seismische Energie, die mit der Backprojection-Methode kartiert wird, dann abgestrahlt, wenn der Bruch unregelmäßig voranschreitet, also z. B. an Knickpunkten, oder wenn die Plattengrenzfläche „rauh“ ist, d. h. kleinräumige Änderungen der Reibungseigenschaften aufweist.

Auch für die Untersuchung des Iquique-Bebens wurden beide Ansätze genutzt (Abb. 1b). Während der ersten 30 bis 40 s breitet sich der Bruch nach Südosten aus, also in den tieferen Bereich der Bruchfläche, danach parallel zur Küstenlinie nach Norden, und zum Ende ist eine Reaktivierung der Bereiche um das Hypozentrum zu beobachten. Dieser Verlauf lässt sich mit beiden Ansätzen beobachten, allerdings sind die Emissionspunkte in der Backprojection-Methode küstennäher und damit tiefer als die Bereiche des größten Versatzes, ein Muster das auch für weitere Subduktionszonen beobachtet wurde, z. B. für das Mw 8,8 Maule-Beben in 2010 in Zentralchile (Palo et al., 2014). Bei manchen Beben gibt es aber auch erheblichere Unterschiede. Beispiel Illapel-Beben, Zentralchile, vom 16. September 2015 (M8,2, vergleichbar dem Iquique-Beben): Hier berechnet die Wellenformmodellierung in der Mittelphase dieses Erdbebens die Fortpflanzung des Bruchs in flachere, küstennähere Bereiche, während die Backprojection-Methode eine Ausbreitung nach unten in Richtung auf die Küste abbildet (Tilman et al., 2016). Diese Ergebnisse widersprechen sich nicht, sondern deuten auf eine breiträumige Aktivierung der Bruchfläche hin, bei denen der Bruch im oberen Teil glatt verläuft, während im unteren Teil viele kleine Unregelmäßigkeiten in der Bruchfläche die Abstrahlung von hochfrequenter seismischer Energie befördern (Abb. 5).

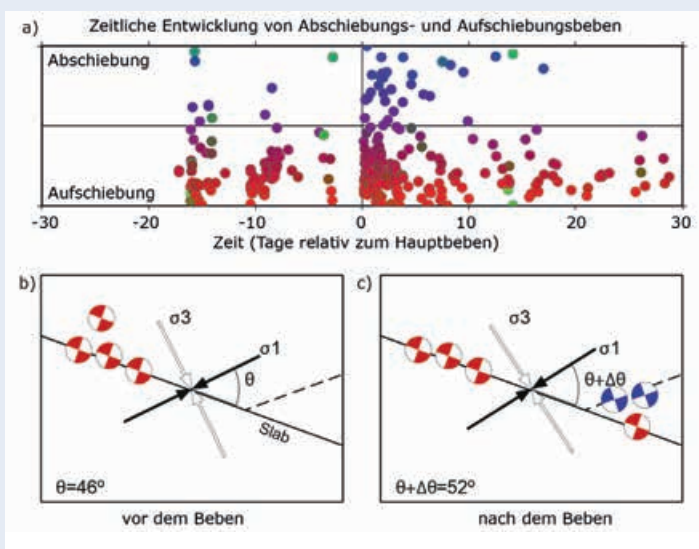


Abb. 6: (a) Zeitliche Änderungen der Herdflächenorientierungen in der Iquique-Bebensequenz (nach Cesca et al., 2016). Die y-Achse stellt den Abschiebungs- (positiv) bzw. Aufschiebungsanteil dar (negativ). Während der Vorbebensequenz treten nur vereinzelt Abschiebungsbeben (blau) auf; nach dem Hauptbeben beginnt plötzlich eine rege Aktivität. Im Gegensatz dazu sind Abschiebungsbeben (rot) sowohl in der Vor- als auch in der Nachbebensequenz aktiv. In Abbildung (b) wird die Ausrichtung der Spannungsachsen vor dem Beben gezeigt, wobei  $\sigma_1$  die Achse größter kompressiver Spannung darstellt und  $\sigma_3$  die Achse geringster kompressiver Spannung. Diese Orientierung der Spannungsachsen erzeugt keine Scherspannung auf westwärts gerichteten Verwerfungen in der Oberplatte, so dass die einzig möglichen Beben Aufschiebungen sind. (c) Aufgrund des Bruchversatzes im Hauptbeben kommt es zu einer Rotation der Spannungsachsen um  $6^\circ$ . Jetzt werden Abschiebungsbeben auf den Verwerfungen in der Kruste der Oberplatte ermöglicht.

Fig. 6: (a) Temporal change of focal mechanism distribution in the Iquique earthquake sequence (after Cesca et al. 2016). The y-axis represents the normal (positive) and thrust (negative) components. Normal faulting activity starts immediately after the main shock, whereas thrust earthquakes occur both before and after the main shock. (b) show the orientation of principal stress axes, with  $\sigma_1$  representing the largest compressive stress. This orientation of stress axes suppresses normal faulting activity in the upper plate. (c) As a result of the stress changes in the main quake, the stress axes rotate by  $6^\circ$ , such that now normal faulting events are possible.

## Das Nachspiel: Nachbeben und Spannungsabbau

Durch ein großes Beben wird insbesondere auf der Bruchfläche Scherspannung abgebaut. Allerdings kommt es lokal auch zu erheblichem Spannungsanstieg, insbesondere an den Rändern des Bruchs. Die schrittweise Entspannung dieses Zustands geschieht hauptsächlich über Kriechprozesse an der Plattengrenzfläche und viskose Deformation (Fließen) des Mantels, die bei sehr großen Beben über Monate bzw. Jahre und Jahrzehnte andauern. Dies führt zu weiteren Deformationen an der Oberfläche, die mit GPS-Stationen leicht sichtbar gemacht und äquivalent zu den Deformationen während des Erdbebens interpretiert werden können (Bedford et al., 2013). Daneben führen diese Prozesse zu einer großen Zahl von Nachbeben (das größte Nachbeben des Iquique-Bebens hatte die Magnitude 7,6 und trat am zweiten

Tag nach dem Hauptbeben auf). Der Vergleich von Mechanismen der Hintergrundseismizität mit denen der Nachbeben kann auch direkt genutzt werden, um Spannungsänderungen nachzuweisen. Je nach Ausrichtung der Hauptspannungsachsen, also der Achsen, die maximale und minimale Kompression anzeigen, können bestimmte Bruchflächen aktiviert oder deaktiviert werden, da Brüche nur möglich sind, wenn eine hinreichend große Scherspannung auf die potenzielle Bruchfläche wirkt. Das Iquique-Beben eignet sich aufgrund seiner großen Anzahl von Vorbeben besonders gut für eine derartige Untersuchung (Cesca et al., 2016), wobei sich eine Rotation der Spannungsrichtungen um  $6^\circ$  nachweisen lässt (Abb. 6), aber innerhalb weniger Wochen der Originalzustand wiederhergestellt wird. Diese Änderung des Spannungsfelds macht eine andere Art von Erdbeben möglich, nämlich Abschiebungsbeben (in Abb. 6 blau markiert), die zu einer Ausdehnung in horizontaler Richtung führen und ansonsten in einem insgesamt kompressiven Umfeld unterdrückt sind und daher vor dem Iquique-Beben nur äußerst sporadisch auftraten. Bei dem erheblich größeren Tohoku-Beben vor der Küste Japans (Magnitude 9,0) kam es sogar zu einer Drehung der Hauptspannungsachsen um rund  $30^\circ$ , so dass Abschiebungsbeben unter den Tohoku-Nachbeben in der Oberplatte dominierten.

Die beschriebenen Techniken können teilweise auch auf die sogenannte interseismische Zeitphase angewendet werden, also die Periode zwischen großen Beben, in der sich die kritische Spannung langsam aufbaut. In diesem Fall kann aus den Deformationsmessungen grob rekonstruiert werden, welche Teile der Plattengrenze fest verhakt sind und welche Bereiche mit dem langfristigen Mittel der relativen Geschwindigkeit zwischen beiden Platten kriechen. Nur dort, wo beide Platten fest verhakt sind, können sich effektiv Scherspannungen aufbauen.

## Fazit und Ausblick

Mit Hilfe der Analyse der größten Erdbeben der letzten Jahre mit den oben beschriebenen Methoden in Zusammenhang mit stetigen Beobachtungen der interseismischen Phase an vielen Plattenrändern ergibt sich ein konzeptionelles Modell der Plattengrenze in Subduktionszonen, das vereinfacht in Abb. 5 dargestellt wird. Ein weiter Bereich in mittleren Tiefen von typischerweise 20 bis 40 km ist in der interseismischen Phase vollständig blockiert, reißt aber bei großen Beben in einem Stück. Auch in diesem Tiefenbereich gibt es entlang des Streichens Teile der Plattengrenzfläche, die keine Spannungen aufbauen können und die sogar als Barriere für weitere Bruchausbreitung wirken können. Im tieferen Bereich sorgen dagegen kleinräumige Unterschiede in den Eigenschaften der Plattengrenzfläche dafür, dass der Bruch dort unregelmäßig verläuft und trotz relativ geringen Versatzes ein großer Anteil der hochfrequenten seismischen Energie abgestrahlt wird. Aufgrund dieser Tatsache und der Position landseitig oder in der Nähe der Küste ist dieser Bereich besonders relevant für die Gefährdung durch Bodenerschütterungen. Hier finden auch viele Nachbeben statt,

vermutlich weil der unregelmäßige Bruchverlauf ein heterogenes Spannungsfeld hinterlässt. Im flachen Bereich verlangsamt sich dagegen der Bruchverlauf und seismische Energie wird nur langperiodisch abgestrahlt. Allerdings regt vertikaler Versatz des Meeresbodens in diesem Bereich aufgrund der hohen Wassertiefe besonders effektiv Tsunami an, weswegen er für die Tsunami-Gefährdung hochrelevant ist. Wie die meisten Beben ist das Iquique-Beben nicht bis in diesen flachen Bereich gebrochen. Dagegen kam es im bereits erwähnten Illapel-Beben zu signifikantem Versatz auf der flachen Bruchfläche und damit zu einem größeren Tsunami von bis zu 5 bis 6 m Höhe. Besonders dramatische Folgen hatte der Bruch der flachen Grenzfläche im Tohoku-Beben, wo der Tsunami mit einer Höhe von 20 bis 30 m die Schutzmauern überflutete und viele Todesopfer forderte.

Dieser flache Bereich ist aufgrund der großen Entfernung zur Küste nur schwer mit seismologischen und geodätischen Mitteln zu beobachten; insbesondere das Kriechverhalten während der interseismischen Phase lässt sich nicht rekonstruieren. Während autonome Ozeanbodenseismometer schon seit vielen Jahren eingesetzt werden, sind diese in der Standzeit eingeschränkt und werden deshalb hauptsächlich in temporären Experimenten eingesetzt. Nur in Japan und im Nordwesten von Nordamerika existieren verkabelte, langfristige Installationen. Eine Hoffnung auf ein dichteres Netzwerk zu überschaubaren Kosten stellt die Idee dar, zusätzliche Sensoren in die Infrastruktur kommerzieller Telekommunikationskabel einzubauen. Obwohl die Technologie dafür bereits existiert, erfordert die Realisierung eine internationale Kooperation im großen Maßstab. Eine weitere vielversprechende technologische Entwicklung wird bereits von der Ölindustrie eingesetzt und besteht aus Netzwerken von autonomen Transponder-Stationen auf dem Meeresboden, die regelmäßig akustische Signale austauschen. Aus Messungen der Laufzeiten lassen sich Abstandsänderungen der einzelnen Transponder berechnen, die wiederum Aufschluss über Deformationen im Erdinneren geben können. Ein solches System wird vom GEOMAR, Kiel, vor der Küste Chiles betrieben.

Eine weitere offene Frage ist, inwieweit eine universelle präseismische Phase existiert, also vorbereitende, messbare Prozesse, die zukünftige Beben bereits abzeichnen. Dem Iquique-Beben gingen, wie oben beschrieben, spürbare Erdbeben voraus. Allerdings ist dies nicht immer der Fall, und es ist auch unklar, was solche Vorbeben von Erdbebenschwärmen unterscheidet, denen kein Hauptbeben folgt. Weiterer Fortschritt hierzu hängt vermutlich davon ab, auch kleinste Erdbeben und andere seismische Signale, die mehr einem an- und abschwelenden Murmeln der Erde entsprechen (nichtvulkanische Tremore) genau beobachten zu können, d. h., der Frequenzbereich, in dem zuverlässige Messungen möglich sind, muss auf höhere Frequenzen hin erweitert werden. Möglich wäre dies durch den Einsatz von Bohrlochensoren und Gruppen von kleinskaligen

Subnetzwerken (Mini-Arrays). Jedes Riesenerdbeben gibt der Erdbebenphysik neue Impulse und trägt zur Methodenentwicklung bei. Dabei stellt die Bruchverfolgung bei großen Erdbeben auch weiterhin ein wichtiges Forschungsgebiet dar. So sind die Wechselwirkungen der Struktur der oberen und unteren Platte und der Geometrie der Plattengrenzfläche mit deren Verhalten in der interseismischen Phase und während großer Beben noch weitgehend unverstanden, wenn man von der groben, oben beschriebenen Tiefenaufteilung absieht.

Fortschritte in der genauen Abbildung von Bruchprozessen führen zu einer präziseren Gefährdungsabschätzung und ermöglichen damit den effizienteren Einsatz von Ressourcen zur Risikominimierung. Varianten der oben beschriebenen Methoden, die auf Schnelligkeit optimiert sind, können helfen, rasch die Lage des betroffenen Gebiets und die am intensivsten betroffenen Regionen zu identifizieren, insbesondere wenn sie mit empirischen Methoden zur Abschätzung von Erschütterungen kombiniert werden (Schorlemmer *et al.*, 2016).

#### Danksagung

Die Bearbeitung der Grafiken erfolgte durch Regina Milkereit, GFZ.

#### Literatur

- Bedford, J., Moreno, M., Baez, J. C., Lange, D., Tilmann, F., Rosenau, M., Heidbach, O., Oncken, O., Bartsch, M., Rietbrock, A., Tassara, A., Bevis, M., Vigny, C. (2013): A high-resolution, time-variable afterslip model for the 2010 Maule Mw = 8.8, Chile megathrust earthquake. - *Earth and Planetary Science Letters*, 383, pp. 26–36.
- Cesca, S., Grigoli, F., Heimann, S., Dahm, T., Kriegerowski, M., Sobiesiak, M., Tassara, C., Olcay, M. (2016): The Mw 8.1 2014 Iquique, Chile, seismic sequence: a tale of foreshocks and aftershocks. - *Geophysical Journal International*, 204, 3, pp. 1766–1780.
- Palo, M., Tilmann, F., Krüger, F., Ehlert, L., Lange, D. (2014): High-frequency seismic radiation from Maule earthquake (Mw 8.8, 2010 February 27) inferred from high-resolution backprojection analysis. - *Geophysical Journal International*, 199, 2, pp. 1058–1077.
- Schorlemmer, D., Hainzl, S., Zang, A., Cotton, F. (2016): Dynamische und hochauflösende Aktivitätsvorhersagen und Folgenabschätzung von Erdbeben. - *System Erde*, 6, 1, pp. 38–43.
- Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoehner, A., Palo, M., Wang, R., Moreno, M., Bartsch, M., Zhang, Y., Oncken, O., Tilmann, F., Dahm, T., Victor, P., Barrientos, S., Vilotte, J.-P. (2014): Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. - *Nature*, 512, pp. 299–302.
- Tilmann, F., Zhang, Y., Moreno, M., Saul, J., Eckelmann, F., Palo, M., Deng, Z., Babeyko, A. Y., Chen, K., Baez, J. C., Schurr, B., Wang, R., Dahm, T. (2016): The 2015 Illapel earthquake, central Chile, a type case for a characteristic earthquake? - *Geophysical Research Letters*, 43, 2, pp. 574–583.
- Victor, P., Schurr, B., Brändlein, D., Klotz, J., Ritter, O., Asch, G., Walter, T. R., Sobiesiak, M., Oncken, O. (2011): Beobachtung der letzten Phase eines seismischen Zyklus in Nordchile: IPOC – europäisch-südamerikanisches Netzwerk. - *System Erde*, 1, 1, pp. 24–29.

# Auf dem Weg zur Schadensabschätzung in Echtzeit

## Dezentralisierte regionale und Vor-Ort-Frühwarnung in ACROSS

Stefano Parolai<sup>1</sup>, Tobias Boxberger<sup>1</sup>, Marco Pilz<sup>2</sup>, Dino Bindi<sup>1</sup>, Massimiliano Pittore<sup>1</sup>, Marc Wieland<sup>1</sup>, Kevin Fleming<sup>1</sup>, Michael Haas<sup>1</sup>, Adrien Oth<sup>3</sup>, Claus Milkereit<sup>1</sup>, Torsten Dahm<sup>1</sup>, Jörn Lauterjung<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Schweizerischer Erdbebendienst (SED), ETH Zürich, Schweiz

<sup>3</sup> European Center for Geodynamics and Seismology, Luxembourg

*The possibility of seismic risk mitigation in high hazard region like Central Asia requires the availability of strong motion recordings. When available also in real time, they can be precious for enabling early warning systems and efficient rapid response procedure. The ACROSS project is implementing the installation of the first real time strong motion network for Central Asia. It offers the opportunity for developing, testing and implementing new methodologies for strong motion data analysis in real time, improving the transfer of knowledge from research to application.*





Trotz technologischer Fortschritte sind der Mensch und insbesondere die Infrastrukturen der technischen Zivilisation auch in heutiger Zeit durch Naturgefahren äußerst verwundbar. Zu den größten Naturgefahren für den Menschen zählen Erdbeben. So war etwa das Erdbeben in Haïti in 2010 mit 222 570 Todesopfern die größte Naturkatastrophe der letzten 35 Jahre (Munich Re, 2015). Erdbeben können nicht vorhergesagt werden, daher stellen Maßnahmen wie erdbebensicheres Bauen und die Installation von Frühwarnsystemen die derzeit einzigen Möglichkeiten dar, das Risiko von Verlusten zu verringern (Wenzel und Zschau, 2014).

Erdbebenfrühwarnsysteme sind momentan nur in Japan, Taiwan und Mexiko operationell. Weitere werden aktuell in Italien, USA (Kalifornien), Rumänien, Israel und Spanien installiert oder vorbereitet. Einen Überblick über existierende Systeme und Frühwarnaktivitäten in Europa gibt Clinton et al. (in press). Der Ansatz der sogenannten Vor-Ort-Frühwarnung zielt darauf ab, mit Hilfe lokal installierter Systeme innerhalb der ersten Sekunden nach einem Beben die nicht schadenbringenden, frühen Primär-(P-)Wellen zu detektieren, bevor die langsameren, schadenbringenden Sekundär-(S-)Wellen eintreffen. Die Entscheidung für eine Alarmierung basierte bis vor kurzem darauf, rasch die Erdbebenquelle und Größe abzuschätzen (Nakamura, 1984) oder die noch zu erwartenden Bodenbewegungen direkt aus den Maximalwerten von bereits in der Vergangenheit gemessenen Bodenverschiebungen abzuschätzen. Innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte wurde zudem ein End-to-End-Ansatz vorgeschlagen, bei dem ein Frühwarnsystem alle erforderlichen Schritte von der Gefahrendetektion bis hin zum Bevölkerungsschutz abdeckt. Frühwarnung basiert

heute nicht nur auf der Abschätzung der Bodenbewegungen, sondern auch auf der zu erwartenden Reaktion der Gebäude auf die Bodenbewegung (z. B. Cornell und Krawinkler, 2000; Iervolino, 2011). Diesem Ansatz folgend, werden heute Frühwarnung, Gebäudestrukturanalysen sowie Schadens- und Verlustanalysen mit dem Ziel kombiniert, durch schnelle Warnung der Bevölkerung oder durch Abschaltung kritischer Systeme, z. B. Gasleitungen, Schäden zu minimieren (z. B. Cheng et al., 2014). Dank der Rechenleistung moderner Sensoreinheiten kann dieses Konzept nicht nur systemisch, sondern auf jedem einzelnen Sensor implementiert werden, was die Entwicklung eines dezentralisierten performanzbasierten Frühwarnsystems ermöglicht (Fleming et al., 2009; Picozzi et al., 2010a; Bindi et al., 2015; Parolai et al., 2015).

## ACROSS – Echtzeit-Messnetz für Zentralasien

Im Jahr 2013 initiierte das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ im Rahmen der Helmholtz-Investition „ACROSS, Advanced Remote Sensing – Ground Truth Demo and Test Facilities“ die Installation des ersten regionalen Echtzeit-Messnetzes in Zentralasien. In der tektonisch sehr aktiven Region ereigneten sich in der Vergangenheit starke Erdbeben (z. B. Verny 1887, Mw=7,3; Kemin 1911, Mw=8,0). Dass bei diesen Erdbeben trotz der großen Magnituden nur verhältnismäßig geringe Verluste von einigen hundert Todesopfern auftraten, war vor allem auf die geringe Bevölkerungsdichte zurückzuführen. Selbst die größte Stadt der Region (Almaty, früher Verny, Kasachstan) hatte zu dieser Zeit nur rund 30 000 Einwohner. Eine Wiederholung solcher Beben hätte heute aufgrund der Bevölkerungskonzentration in den Ballungsräumen (z. B. Bischkek, Kirgisistan, mit rund einer Million und Almaty mit fast zwei Millionen Einwohnern) katastrophale Folgen.

Die Installation eines Echtzeit-Messnetzes in dieser seismisch hoch gefährdeten Region (Abb. 1) kann existierende Lücken in der seismischen Überwachung schließen und schafft die Grundlage für ein erstes regionales Erdbebenfrühwarnsystem in Zentralasien.

Die Netzwerkkonfiguration wurde mit Blick auf Verlustminimierung optimiert, wobei die Detektionszeit von Erdbeben minimiert (Stankiewicz et al., 2013; 2015) und die Möglichkeiten bereits installierter Vor-Ort-Frühwarnsysteme (Bischkek) berücksichtigt wurden (Boxberger et al., 2013; Bindi et al., 2015). Die Standorte der Instrumente wurden unter Beachtung der Infrastrukturbedingungen in enger Zusammenarbeit mit lokalen Partnern wie dem ZAIAG (Zentralasiatisches Institut für angewandte Geowissenschaften in Bischkek) sowie den als Partner neugewonnenen Ministerien für Notfallsituationen

*Links: Jede Sekunde zählt – Zentralasien hat eine bewegte Vergangenheit, nicht nur tektonisch, auch politisch und ökonomisch. Dies wird deutlich, wenn man auf den äußerst heterogenen Gebäudebestand blickt, wie hier in Bischkek. Um dem hohen seismischen Risiko entgegenzutreten, werden Strukturen für ein Erdbeben-Frühwarnsystem in der Region aufgebaut, das im Ernstfall wertvolle Sekunden vor Eintreffen der schadenbringenden Erdbebenwellen warnt. (Foto: D. Bindi, GFZ)*

*Every second counts – Central Asia has a strained past, not just tectonically but also politically and economically. This can easily be seen also from the very heterogeneous building stock as here in Bishkek. To mitigate the high seismic risk scientists are continuously working on creating the infrastructure for an Earthquake Early Warning System that can yield precious seconds of warning ahead of the arrival of damaging seismic waves.*



**Kontakt:** S. Parolai  
(parolai@gfz-potsdam.de)

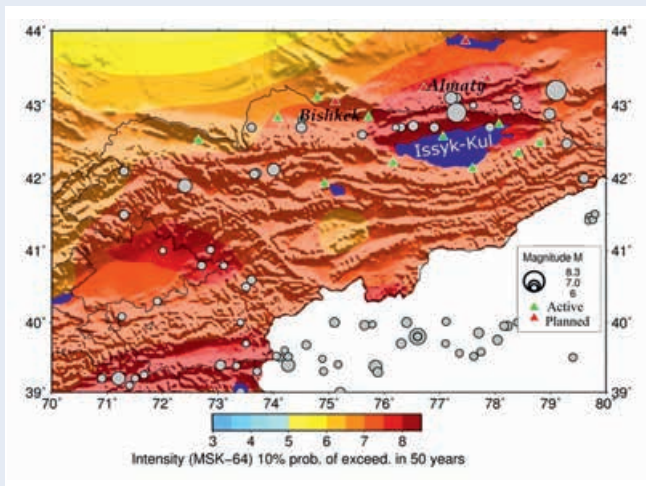


Abb. 1: Probabilistische seismische Gefährdung Kirgisistans und angrenzender Länder. Installierte (grüne Dreiecke) und geplante (rote Dreiecke) Stationen des ACROSS-Netzwerks. Grau gefüllte Kreise markieren Erdbeben mit einer Magnitude größer 6.

Fig. 1: Probabilistic seismic hazard in Kyrgyzstan and neighboring countries, already installed (green triangles) and planned (red triangles) for ACROSS network. Grey circles indicate the position of earthquakes with magnitude larger than 6.

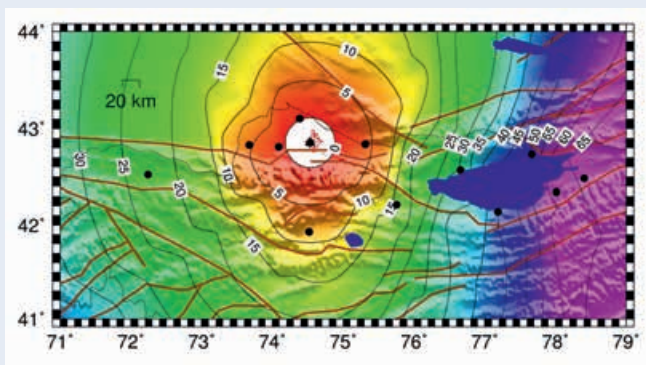


Abb. 2: Theoretische Alarmzeit (schwarze Linien, in Sekunden) durch Kombination des regionalen ACROSS-Netzwerks und des DOSEW-Systems (schwarze Punkte) für Bischkek, Kirgisistan. Ereignisse, die innerhalb des weißen Arealis geschehen, sind zu nahe, um einen Alarm vor dem Eintreffen der S-Wellen auszulösen.

Fig. 2: Theoretical alarm time (black lines) for a location in Bishkek, Kyrgyzstan, while considering the joint information coming from the regional ACROSS network and the DOSEW system (black dots). Events occurring in the white area would be too close to the site to trigger an alarm before the arrival of S-waves.

in Kirgisistan und Kasachstan ausgewählt. Beispielhaft für Bischkek zeigt Abb. 2 die aus der Datenanalyse des ACROSS-Netzwerks und einem existierenden Vor-Ort-Frühwarnsystem resultierende theoretische Alarmzeit. Die theoretische Alarmzeit ist die Zeit zwischen dem Alarm, der durch die P-Wellen eines Erdbebens (auf den in Abb. 2 gezeigten Isochronen) ausgelöst wurde, und dem Zeitpunkt des Eintreffens der S-Wellen. Für Erdbeben, z. B. am Issyk-Kul (See südlich von Almaty, vgl. Abb. 1) ermöglicht das System Alarmzeiten von 25 bis 60 Sekunden für Bischkek. Seismische Ereignisse innerhalb des weißen Gebiets auf Abb. 2 (alarmfreie Zone) wären zu nahe am Zielort, um einen Alarm auszulösen, bevor die S-Wellen eintreffen. *Parolai et al. (2015)* zeigen aber, dass diese Zone sich im Falle eines dezentralisierten Frühwarnsystems (DOSEW) erheblich verkleinert, wenn statt der Ankunftszeit der S-Wellen die Zeit bis zum Eintritt von ersten Gebäudeschäden berücksichtigt wird.

Die Messdaten aus dem ACROSS-Netzwerk werden am GFZ und am ZAIAG in Echtzeit automatisch visualisiert und analysiert; die wichtigsten Parameter werden daraus extrahiert und alle Daten werden in einer offen zugänglichen Datenbank abgelegt.

## Technische Neuerungen und Methodenentwicklung für ACROSS

Ergebnisse von GFZ-Projekten im Rahmen des EU-FP6 SAFER (Seismic eArly warning For EuRope) und des deutschen EDIM (Earthquake Disaster Information system for Marmara Region, Türkei) führten in Zusammenarbeit mit der Fakultät für Informatik der Humboldt-Universität Berlin zur Entwicklung der drahtlosen Sensoreinheit SOSEWIN (Self Organising Seismic Early Warning Information Network, *Fleming et al., 2009*). SOSEWIN-Einheiten bestehen aus Standardkomponenten und ermöglichen ein dezentralisiertes, selbst organisierendes, kabelloses Netzwerk, in dem jede Einheit unabhängig Messdaten analysiert. Diese Einheiten und deren Nachfolgemodell MPwise (Abb. 3) werden in verschiedenen Projekten eingesetzt. Zum Beispiel wurde das SOSEWIN-System im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen REAKT-Projekts an mehreren Teststandorten, so beispielsweise in einem Krankenhaus in Thessaloniki, Griechenland, in einem Wohnhaus in Istanbul, Türkei, sowie in mehreren Gebäuden in Bischkek installiert.

Die nun in ACROSS durchgeführte Erweiterung der SOSEWIN-Einheiten für Multiparameterregistrierungen ermöglicht eine Erdrutschfrühwarnung und -überwachung, seismische Arraymessungen, Erfassung von Gebäudedaten und Ereignissen nach einem Erdbeben. Die drahtlos kommunizierenden Multi-



Abb. 3: MPwise-Einheit mit einer Demonstration der DOSEW-Software (Parolai et al., 2015)

Fig. 3: MPwise unit with a demonstration of the DOSEW software (Parolai et al., 2015)

parametersensoreinheiten MPwise werden dabei im Vergleich zum Vorgängermodell SOSEWIN durch folgende Funktionen ergänzt:

- Datenerfassung mit unterschiedlichen Sensoren für starke Bodenbewegung, Geschwindigkeit der Bodenbewegung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sowie mit Mikrosystemen (MEMS), Kameras und preiswerten GNSS-Receivern,
- Datenübermittlung über LAN- und UMTS-Kommunikationsprotokolle sowie
- Auslösung von Alarmen (z. B. Sirenen) durch eine dezentralisierte, am GFZ entwickelte Software (Parolai et al., 2015).

Das GFZ hat gemeinsam mit der Firma Gempa, einer Ausgründung des GFZ, ein neues Verfahren und eine Software für dezentralisierte Erdbebenfrühwarnung entwickelt, die in Echtzeit auf den bereits installierten SOSEWIN- und MPwise-Einheiten (Parolai et al., 2015; Bindi et al., 2015) sowie auf den ACROSS-Sensoren läuft. Dieses Verfahren erhöht die Zuverlässigkeit des Systems, da das Auslösen des Alarms nicht primär auf der Detektion von Ereignissen, sondern auf der daraus vorhergesagten Bodenbewegung von S-Wellen beruht. Da gebäudetyabhängige Relationen zwischen Bodenbewegung und Gebäudeschäden auf jedem Sensorknoten verfügbar sind und somit für die dezentralisierte Echtzeitanalyse verwendet werden können, liefert die Software direkt auf dem Knoten eine auf den laufenden P-Wellenaufzeichnungen basierende erste Abschätzung des zu erwartenden Schadens (Bindi et al., 2015).

Abbildung 4 veranschaulicht beispielhaft die Ergebnisse einer Anwendung der Software auf Aufzeichnungen eines Bebens der Magnitude 7,2, das sich in 14,5 km Entfernung von der aufzeichnenden Station in Japan ereignet hat. Die Station würde auch im Falle von so geringen Entfernungen zum Epi-

zentrum (hier etwa 12,1 km) einen Alarm über eine Sekunde vor der schadenswirksamen Erschütterung auslösen. Trotz der Kürze reicht diese Zeit aus, um automatische Maßnahmen zu ergreifen (z. B. Sicherung von Pipelines) und die Zahl der verletzten Personen in einer speziell für diesen Katastrophenfall geschulten Bevölkerung zu reduzieren.

## Neue Generation von Frühwarnsystemen

Die schnelle Verfügbarkeit von Erdbebeninformationen und die Aufzeichnung der resultierenden Bodenbewegung in Echtzeit ermöglichen es, die Abschätzung der Folgen und eventueller Verluste mit einem Frühwarnsystem zu verbinden. Ein Alarm wird dann aufgrund des berechneten Ausmaßes der Bodenbewegung an einem Ort ausgelöst. Darüber hinaus schätzen moderne Systeme auch die mögliche räumliche Verteilung der Verluste ab.

Das am GFZ entwickelte Software-System CARAVAN, das sich aktuell in der Testphase befindet, ermöglicht eine Abschätzung der zu erwartenden Intensität der Bodenbewegung und deren Folgen in Form menschlicher Verluste, und zwar unmittelbar, nachdem globale seismische Messnetze (z. B. GEOFON des GFZ) erste Herdparameter eines Bebens berechnet haben. Derzeit stellt das System erst nach Ankunft der Erdbebenwellen am Standort die für das Katastrophenmanagement wichtige Verlustabschätzung bereit. Weitere Entwicklungsarbeiten sollen es ermöglichen, die Echtzeitdaten des ACROSS-Messnetzes in CARAVAN zu integrieren und so ein verlustbasiertes Frühwarnsystem für stark gefährdete Regionen zur Verfügung zu stellen.

Zusätzlich zur Fast-Echtzeit-Abschätzung menschlicher Verluste kann CARAVAN über ein webbasiertes, multilinguales Interface auf eine Nutzeranfrage hin Verlustrechnungen für historische oder hypothetische Ereignisse durchführen.

## Ausblick

Mit dem Einsatz dezentralisierter Frühwarnsysteme können die Alarmzeiten vergrößert werden. Zudem können durch verbesserte Berechnungsmethoden und durch die Berücksichtigung von Gebäudeparametern Fehlalarme reduziert werden. Des Weiteren ermöglichen es Systeme wie CARAVAN, bereits kurze Zeit nach einem Ereignis eventuelle Schäden abzuschätzen. Der Schritt hin zu verlustbasierten Frühwarnsystemen stellt trotz der hier beschriebenen Fortschritte eine große Herausforderung dar und es sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu dezentralisierten Frühwarnsystemen nötig. Zudem sollen die Frühwarnsysteme für multiple Gefahrenquellen weiterentwickelt werden; hierzu wird im Rahmen von CARAVAN derzeit die Integration von Verlustabschätzungen für erdbebeninduzierte Hangrutschungen getestet.

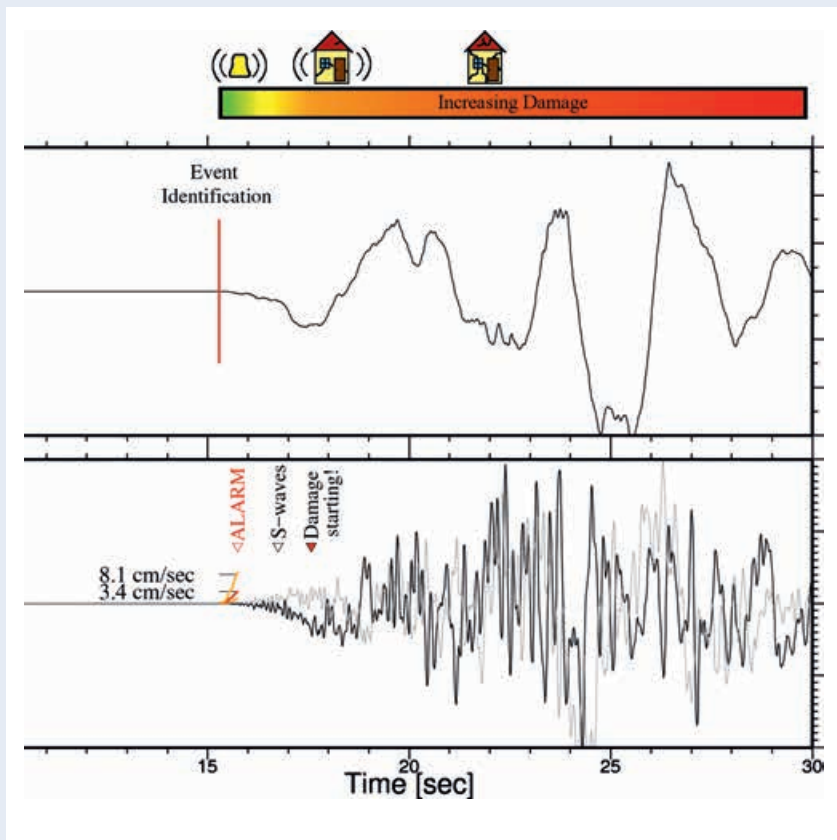


Abb. 4: Oben: Aus der Aufzeichnung starker Bodenbewegung und Identifikation der P-Wellenankunft (rote Linie) bestimmter Bodenversatz. Unten: Horizontale Komponenten (Nord-Süd und Ost-West) der aufgezeichneten Geschwindigkeit (schwarze und graue Linie) und die aus dem kurz nach Identifikation der P-Wellenankunft aufgezeichneten Bodenversatz geschätzten Geschwindigkeiten (gelb und orange). Die berechneten Werte überschreiten die für eine Alarmierung festgelegten Schwellwerte (Zahlen über Aufzeichnung bzw. kurze graue Linien) weniger als eine Sekunde nach der P-Wellenankunft, kurz vor Ankunft der S-Wellen und vor Eintreten der ersten Schäden am Gebäude.

Fig. 4: Top: Ground displacement estimated from the strong motion recording and identification of P-wave arrival (red line). Bottom: Horizontal components (North-South and East-West) of the recorded velocity (black and gray line), and the forecasted estimation of their velocities (yellow and orange) using the displacement values just after the P-wave arrival identification. The estimated values are overstepping pre-fixed thresholds (numbers above the recording/ short grey lines) less than one second after the P-wave arrival identification, just before the S-wave arrival and before the structure experiences damage.

Realisierung, Unterhalt und effiziente Nutzung von Infrastrukturen wie ACROSS lassen sich nur in enger Kooperation mit den lokalen Partnern aus Wissenschaft und Behörden umsetzen. Während die Kooperation mit ZAIAG eine erfolgreiche technische Umsetzung ermöglicht, garantiert die enge Zusammenarbeit mit dem kirgisischen Ministerium für Notfallsituationen (vgl. Rubrik „Netzwerk“, Internationale Zusammenarbeit des GFZ, S.85) die nachhaltige Nutzung der Infrastruktur.

Im Rahmen der über viele Jahre gebildeten lokalen Netzwerke soll in Zukunft die in Zentralasien aufgebaute Infrastruktur als Entwicklungs- und Testumgebung für zukunftsweisende Multi-Hazard-Echtzeitanwendungen genutzt werden und mit den lokalen Partnern daran gearbeitet werden, Erkenntnisse aus der Forschung in die Praxis zu übertragen und technologisch sowie methodisch weiterzuentwickeln. Zudem ist es das Ziel, die Entscheidungsträger dabei zu unterstützen, mit Hilfe der Technologien das Risikobewusstsein in der Bevölkerung zu verbessern und so zu einer effizienten Risikominimierung beizutragen.

## Literatur

- Bindi, D., Boxberger, T., Orunbaev, S., Pilz, M., Stankiewicz, J., Pittore, M., Iervolino, I., Ellguth, E., Parolai, S. (2015): On-site early-warning system for Bishkek (Kyrgyzstan). - *Annals of Geophysics*, 58, 1, So112.
- Boxberger, T., Pilz, M., Orunbaev, S., Pittore, M., Fleming, K., Milkereit, C., Parolai, S., Bindi, D. (2013): Noch Sekunden bis zu Erschütterung: ein Erdbebenfrühwarnsystem für Bishkek. - *System Erde*, 3, 2, pp. 18–23.
- Cheng, M. H., Wu, S., Heaton, T. H., Beck, J. L. (2014): Earthquake early warning application to buildings. - *Engineering Structures*, 60, pp. 155–164.
- Clinton, J., Zollo, A., Marmureanu, A., Zulfikar, C., Parolai, S. (in press): State-of-art and future of EEW applications in Europe. - *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Cornell, C. A., Krawinkler, H. (2000): Progress and challenges in seismic performance assessment. - *Peer Center Newsletter*, 3, 2, pp. 1–4.
- Fleming, K., Picozzi, M., Milkereit, C., Kühnlenz, F., Lichtblau, B., Fischer, J., Zulfikar, C., Özel, O., SAFER and EDIM working groups (2009): The Self-organizing Seismic Early Warning Information Network (SOSEWIN). - *Seismological Research Letters*, 80, 5, pp. 755–771.
- Iervolino, I. (2011): Performance-based earthquake early warning. - *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 2, pp. 209–222.

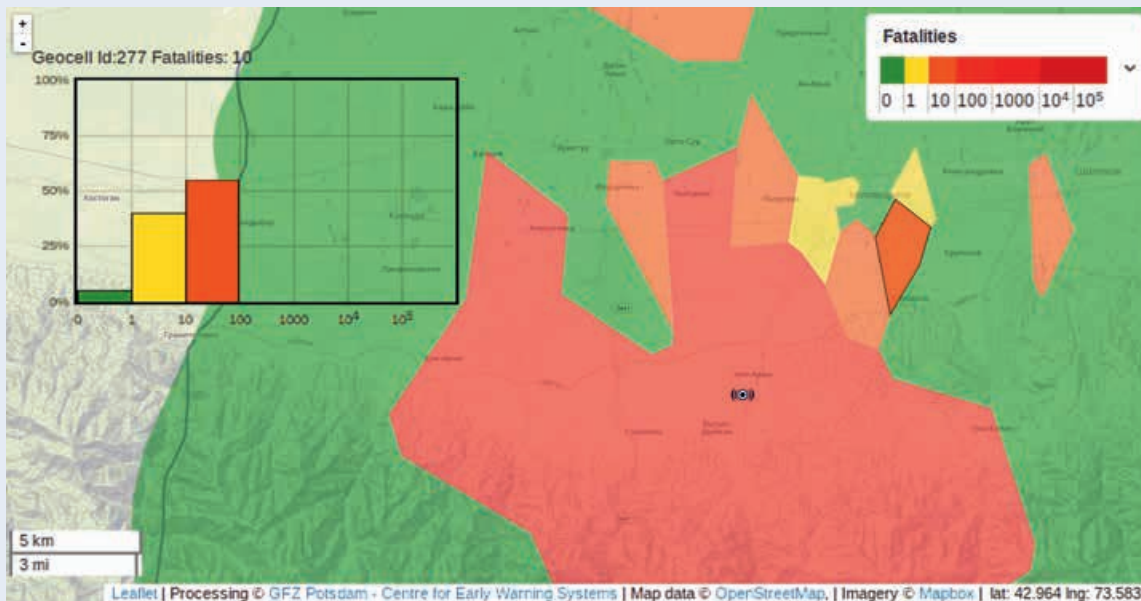


Abb. 5: Beispiel einer mit CARAVAN abgeschätzten Verteilung von Todesfällen für eine Wiederholung des Belovodosk-Kirgizstan-Bebens von 1885 (schwarzer „vibrierender“ Marker) mit  $M_w=6,8$ . Die Farben der mit der Bevölkerungsdichte skalierten Geozellen repräsentieren den wahrscheinlichsten Wert für die Größenordnung (Zehnerpotenzen) der zu erwartenden Todesfälle pro Zelle. Oben links beispielhaft die Verteilung für eine orange (10 bis 100) eingefärbte Zelle (schwarze Umrahmung)

Fig. 5: Example of a loss assessment distribution for a repetition of the  $M_w=6.8$  Belovodosk, Kyrgyzstan event (black “vibrating” marker) estimated by CARAVAN. Losses are in terms of fatalities, where the colors of the geocells, whose size depend on population density, indicate the most probable magnitude (powers of 10) of expected fatalities for each geocell. The distribution for an orange (10 to 100) cell (black contoured) is shown in the upper left corner.

- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research, NatCat-SERVICE (2015): Loss events worldwide 1980-2014: 10 deadliest events, verfügbar unter [https://www.munichre.com/site/touch-naturalhazards/get/documents\\_E-1260878433/mr/assetpool.shared/Documents/5\\_Touch/\\_NatCatService/Significant-Natural-Catastrophes/2014/10-deadliest-events-worldwide.pdf](https://www.munichre.com/site/touch-naturalhazards/get/documents_E-1260878433/mr/assetpool.shared/Documents/5_Touch/_NatCatService/Significant-Natural-Catastrophes/2014/10-deadliest-events-worldwide.pdf)
- Nakamura, Y. (1984): Development of earthquake early-warning system for the Shinkansen, some recent earthquake engineering research and practical in Japan. – In: The Japanese National Committee of the International Association for Earthquake Engineering, pp. 224–238.
- Parolai, S., Bindi, D., Boxberger, T., Milkereit, C., Fleming, K., Pittore, M. (2015): On Site Early Warning and Rapid Damage Forecasting Using Single Stations: Outcomes from the REAKT Project. - Seismological Research Letters, 86, 5, pp. 1393–1404.
- Picozzi, M., Milkereit, C., Parolai, S., Jaeckel, K.-H., Veit, I., Fischer, J., Zschau, J. (2010): GFZ Wireless Seismic Array (GFZ-WISE), a Wireless Mesh Network of Seismic Sensors: New Perspectives for Seismic Noise Array Investigations and Site Monitoring. - Sensors, 10, 4, pp. 3280–3304.
- Stankiewicz, J., Bindi, D., Oth, A., Parolai, S. (2013): Designing efficient earthquake early warning systems: case study of Almaty, Kazakhstan. - Journal of Seismology, 17, 4, pp. 1125–1137.
- Stankiewicz, J., Bindi, D., Oth, A., Parolai, S. (2015): Toward a cross-border early-warning system for Central Asia. - Annals of Geophysics, 58, 1, S0111.
- Wenzel, F., Zschau, J. (Eds.) (2014): Early Warning for Geological Disasters: Scientific Methods and Current Practice, (Advanced Technologies in Earth Sciences), Berlin [u. a.]: Springer, 379 p.

# Dynamische und hochauflösende Aktivitätsvorhersagen und Folgenabschätzung von Erdbeben

Danijel Schorlemmer, Sebastian Hainzl, Arno Zang, Fabrice Cotton  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The nucleation of earthquakes and their seismic waves cannot be predicted in a deterministic sense. However probabilistic hazard and risk estimations can be conducted which help to increase the preparedness and reduce the vulnerability of societies. Those estimations are based on the rapidly growing number of empirical earthquake data recorded by seismic networks or known from historical or geological studies, which show that earthquakes are not randomly occurring. They typically occur clustered in space and time with specific characteristics such as the Gutenberg-Richter law for the frequency-magnitude distribution. Seismicity models have to account for earthquake interactions to avoid erroneous estimations of the activity level and spatial distribution of future activity. Additionally, the vulnerability of societies is changing with time, because of the dynamic reconstruction and growth of cities in earthquake-prone regions. Thus new sophisticated models, strategies, and methods have to be developed and tested for all components of the earthquake risk chain to improve our probabilistic hazard and risk estimations.*



Die zerstörerische Kraft von Erdbeben stellt eine große Bedrohung für die Menschheit dar. Das verheerende Beben von San Francisco im Jahre 1906 war eine dieser großen Erdbebenkategorien, wurde aber zugleich zu einem wichtigen Meilenstein in der Seismologie, da das Gebiet um San Francisco kurz vor dem Beben vermessen wurde und diese Messung danach wiederholt und damit erstmals das genaue Ausmaß der Verschiebungen ermittelt werden konnte. Aus diesen Beobachtungen formulierte Harry Fielding Reid 1910 die Theorie der elastischen Entspannung, die als erste eine wissenschaftliche Beschreibung der Erdbeben lieferte. Basierend auf dieser Theorie, versuchten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, große Erdbeben vorherzusagen. In der Regel beschränkte sich die Suche auf Vorläufersignale, also messbare Anomalien, die mit einem Erdbeben ursächlich verbunden sind. Der scheinbare anfängliche Erfolg der Evakuierung der chinesischen Stadt Haicheng 1975 vor einem großen Beben wurde bereits 1976 erschüttert, als das völlig überraschende Erdbeben von Tangshan die gesamte Stadt zerstörte und mehreren hunderttausend Menschen das Leben kostete. Zudem traten mit der Zeit Zweifel auf, ob die Erdbebenvorhersage von Haisheng wirklich eine Vorhersage oder nur eine Reaktion auf bereits erhöhte Erdbebenaktivität war. Das gescheiterte Erdbebenvorhersageexperiment des United States Geological Survey im zentralkalifornischen Parkfield führte zu dem Schluss, die Versuche zur Erdbebenvorhersage aufzugeben und den wissenschaftlichen Fokus auf die statistische Berechnung der Erdbebengefährdung zu setzen als einzige Möglichkeit der nachhaltigen Verminderung der Auswirkungen von Erdbeben. Derartige Langzeit-Erdbebengefährdungsanalysen liefern die ingenieurseismologischen Grundlagendaten für Erdbebenbaunormen und damit für das erdbebengerechte Design von gebauter Infrastruktur. Die Methodik statistischer Langzeitabschätzungen der Erdbebengefährdung wurde im GFZ-Journal „System Erde“ bereits detailliert dargestellt (Grünthal et al., 2013).

In den letzten Jahren sind große Datenquellen entstanden und zugänglich gemacht geworden, die neue Verarbeitungsmethoden erfordern, neue Möglichkeiten in der Informationsgewin-

nung eröffnen und zu neuen, detaillierteren Ergebnissen führen werden. Dieser Artikel stellt diesbezügliche Arbeiten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ exemplarisch vor.

### Von der Erdbebenbeobachtung zur hochauflösenden Aktivitätsprognose

Der Ausgangspunkt aller Erdbebengefährdungsberechnungen sind die direkten Beobachtungen. Diese sind im Wesentlichen frühere Erdbeben, große zerstörerische und die kleinen, nicht spürbaren Beben, sowie Lage, Ausdehnung und Aktivität von geologischen Verwerfungen. Von Erdbeben verursachte Wellen breiten sich im Erdkörper aus und werden von seismologischen Messgeräten erfasst. Aus deren Aufzeichnungen werden die Magnitude, das Hypozentrum und die Herdzeit des Erdbebens berechnet. Die Detektionsfähigkeit variiert räumlich und hängt insbesondere von der Dichte des Stationsnetzes und der Stärke der Erdbeben ab. Kleinere Erdbeben treten viel häufiger als große Erdbeben auf. Aus ihren Raten werden in Gebieten, in denen geologische Verwerfungen nicht bekannt oder kartiert sind, die Raten und die räumliche Verteilung der größeren Erdbeben abgeschätzt. Dazu muss allerdings die Magnitude bekannt sein, ab welcher der Katalog als vollständig angenommen werden kann. Zu diesem Zweck wurde eine probabilistische Methode entwickelt, um die raumzeitliche Verteilung der kleinsten vollständig aufgezeichneten Erdbeben sowie die Detektionswahrscheinlichkeit für jeden Ort, jeden Zeitpunkt und jede Magnitude zu berechnen (Schorlemmer und Woessner, 2008). Bei diesem Verfahren werden von allen Beben die Signalerfassungen an allen Stationen verarbeitet, um die Detektionsfähigkeit des Netzwerks als eine Funktion von Raum und Zeit bestimmen zu können. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel aus Italien (Schorlemmer et al., 2010). Neben Italien wurde auch in Neuseeland, Kalifornien und Japan die Entwicklung der Detektionsfähigkeit der jeweiligen Netzwerke berechnet und dokumentiert. Aktuell wird diese Methode derart erweitert, dass für moderne Netzwerke die gesamten Aufzeichnungen aller Stationen verarbeitet und die Detektionswahrscheinlichkeiten mithilfe der Signal-Rausch-Verhältnisse berechnet werden. Dies wird es ermöglichen, Detektionswahrscheinlichkeiten in Nahe-Echtzeit zu berechnen und die Analysen noch detaillierter durchzuführen.

Vollständige Erdbebenkataloge bilden die Grundlage für die Untersuchung ihrer statistischen Eigenschaften, die letztendlich zu einer Vorhersage der Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Erdbeben in einer bestimmten Zeit und in einem bestimmten Gebiet benutzt werden. Klassische Vorhersagemodelle beruhen auf dem Poissonmodell, also darauf, dass Erdbeben voneinander unabhängig mit konstanter Rate auftreten. Dies ist weltweiter Standard für die langfristigen Gefährdungsaus-

Links: Zerstörte Häuser nach Erdbeben und Tsunami in Japan am 11. März 2011 (Foto: Daniel Pierce, aufgenommen 2. Mai 2011, CC BY 2.0, <https://www.flickr.com/photos/daniel-pierce/5709200331/>)

Left: Destroyed homes after earthquake and Tsunami in Japan of 11 March 2011



Kontakt: D. Schorlemmer  
(ds@gfz-potsdam.de)

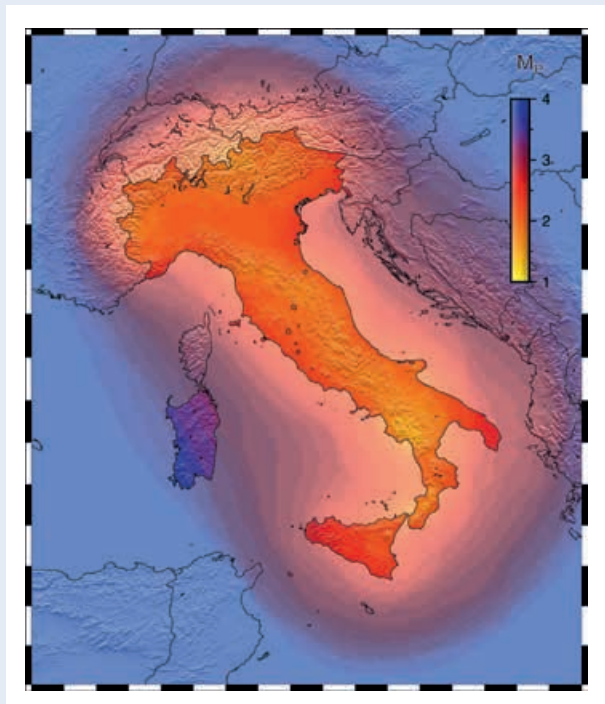


Abb. 1: Aufzeichnungsqualität des italienischen seismologischen Netzwerks des Istituto Nazionale di Geofisika e Vulcanologia. Farblich kodiert ist die kleinste Magnitude, die vollständig erfasst wird.

Fig. 1: Detection ability of the Italian seismic network of the Istituto Nazionale di Geofisika e Vulcanologia. Color-coded is the smallest magnitude which is completely recorded.

sagen (mehrere Jahrzehnte), die als seismische Lastannahmen das Rückgrat von Baunormen zum erdbebengerechten Konstruktionsentwurf bilden (Grünthal et al., 2013). Für Aktivitätsprognosen kürzerer Zeiträume ist aber zu berücksichtigen, dass zeitlich benachbarte Erdbeben innerhalb von Serien von Vor- und Nachbeben in vielfältiger Weise miteinander interagieren und somit nicht als unabhängige Ereignisse behandelt werden können. Jedes Erdbeben erzeugt in seiner Umgebung Spannungsänderungen, die das Auftreten von nachfolgenden Erdbeben beschleunigen oder verzögern. Dieses Zusammenspiel von Erdbeben kann zu Phasen seismischer Ruhe oder zu raumzeitlichen Erdbebenanhäufungen (Schwärme und Nachbebensequenzen) führen. Insbesondere Nachbeben dominieren häufig die gemessene Erdbebenaktivität in instrumentellen Erdbebenkatalogen und werden hauptsächlich durch die von Erdbeben induzierten statischen Spannungsänderungen ausgelöst (Hainzl et al., 2014). Die Nachbebenrate nimmt zeitlich mit dem bekannten Omori-Gesetz, einem Potenzgesetz, ab, während die genaue Charakterisierung der räumlichen Abnahme erst kürzlich unter Beteiligung des GFZ gelungen ist (Moradpour et al., 2014). Die Vernachlässigung der Zeitabhängigkeit des Erdbebenprozesses kann somit nicht nur zu fehlerhaften

Einschätzungen des zukünftigen Aktivitätsniveaus, sondern auch seiner räumlichen Verteilung führen. Ein wichtiger Teil der Forschungsarbeiten am GFZ zielt deshalb auf eine verbesserte Charakterisierung der Interaktionen von Erdbeben ab, um Abschätzungen der Erdbebengefährdung zu verbessern.

Für kurz- und mittelfristige Vorhersagen der Seismizitätsraten eignet sich das ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence)-Modell. Dieses Modell beschreibt das raumzeitliche Auftreten der Erdbeben als Summe einer zeitlich konstanten tektonischen Hintergrundaktivität und erdbebeninduzierter Nachbebensequenzen. Die Parameter dieses empirischen Modells können aufgrund limitierter Erdbebenkataloge häufig nicht zufriedenstellend aus den Daten abgeschätzt werden. Deshalb werden Teile des Modells durch physikalische Beziehungen bestimmt. So wurden modifizierte ETAS-Modelle entwickelt, in denen die räumliche Nachbebenverteilung bzw. die Nachbebenproduktivität durch die Berechnung der erdbebeninduzierten statischen Spannungsänderungen in der Erdkruste bestimmt wird (Bach und Hainzl, 2012; Zakharova et al., 2013). Neben dem raumzeitlichen Auftreten, konnte auch gezeigt werden, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Größenverteilung und dem Spannungszustand besteht (Schorlemmer et al., 2005; Schorlemmer und Wiemer, 2005). Dieser Zusammenhang kann durch das Kartieren der Stressfeldvariationen für verbesserte raumzeitliche Abschätzung der Nachbebenaktivität verwendet werden.

Um die Vorhersagekraft existierender Seismizitätsmodelle zu ergründen, wurde eine internationale Plattform, das „Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability“ (CSEP) ins Leben gerufen. Sie hat sich als Ziel gesetzt, objektive und reproduzierbare Tests von Seismizitätsmodellen durchzuführen. Dabei wird die Modellberechnung unabhängig von den Modellierern in einem der vier weltweit existierenden Testzentren durchgeführt und gegen Erdbeben getestet, die nach der Modellberechnung aufgetreten sind. Seismizitätsmodelle, die sich in diesen Tests bewähren, können dann mit größerem Vertrauen in seismischen Gefährdungsanalysen verwendet werden. Besonders hervorzuheben ist das hochauflösende globale Experiment, bei dem statistische Vorhersagen für mehr als 250 Mio. Zellen (definiert in Longitude, Latitude und Magnitude) täglich getestet werden. Das GFZ trägt zu dieser Initiative sowohl mit der Entwicklung geeigneter Testverfahren, als auch als Modellentwickler maßgeblich bei (z. B. Schorlemmer et al., 2007; Schorlemmer und Gerstenberger, 2007).

Die größten Erdbeben treten auf existierenden Verwerfungen auf und bauen die dort angestaute Spannung schlagartig ab. Die Berechnung der Wiederkehr dieser Beben spielt für die Abschätzung der Erdbebengefährdung eine große Rolle, aber deren relativ seltenes Auftreten macht es nahezu unmöglich, innerhalb von wenigen Jahren aussagekräftige Testresultate für die entsprechenden Vorhersagemodelle zu erhalten. Daher werden als Anhaltspunkte geologische und historische Indikatoren für eine Abschätzung der Häufigkeit von Erdbeben her-



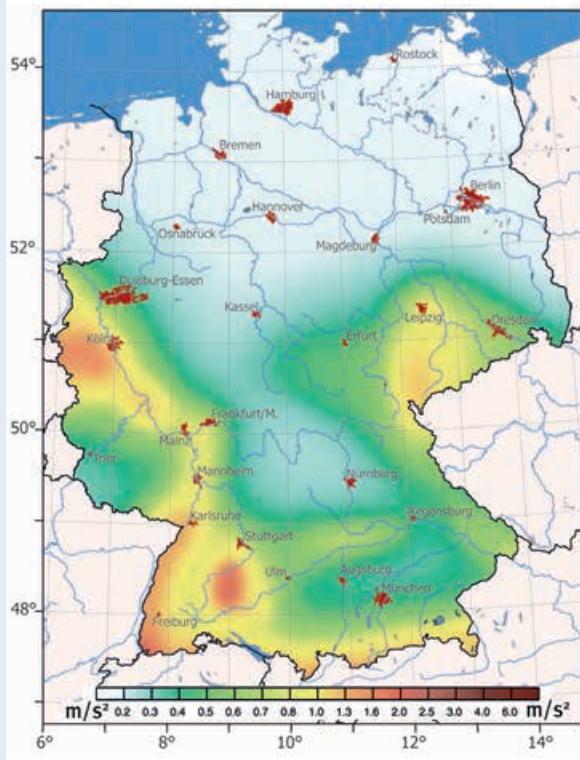


Abb. 2: Karte der Spitzenbodenbeschleunigungen PGA (Felsuntergrund, 50 %-Fraktile) für 4 % Überschreitenswahrscheinlichkeit in 100 Jahren bzw. einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit  $P=4 \times 10^{-4}$ . Dem entspricht eine mittlere Wiederholungsperiode  $T=2500$  Jahre (Abb. aus Grünthal et al., 2009).

Fig. 2: Map of peak ground acceleration PGA (rock, 50 % fractile) for an exceedance probability of 4 % in 100 years, respectively an annual exceedance probability of  $P=4 \times 10^{-4}$ , which corresponds to an average recurrence period of  $T=2500$  years.

angezogen. Diese sind z. B. geomorphologische Analysen, wie der Versatz von Bachläufen oder der Versatz von Schichten, der durch Grabungen an den Verwerfungen erfasst werden kann. In manchen Regionen, wie z. B. in Italien, können zusätzlich auch lang zurückreichende historische Aufzeichnungen verwendet werden. Basierend auf diesen Daten werden einfache statistische Modelle angepasst, mit deren Hilfe die Auftrittswahrscheinlichkeit und ihre Variabilität festgelegt werden.

### Von der Aktivitätsprognose zur Gefährdung

Gesellschaftlich relevant ist nicht die Aktivitätsprognose selbst, sondern die Abschätzung der Erdbebengefährdung, welche die Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens bestimmter Größen

von Bodenbewegungen beschreiben. Diese Wahrscheinlichkeiten hängen neben der Häufigkeit, Magnitude und Lage der Hypozentren auch von dem Bruchtyp und von lokalen Bodeneigenschaften ab. Zwei Arten der Beschreibung werden hierbei verwendet: Intensitäten und physikalische Größen, wie Bewegungsgeschwindigkeit oder -beschleunigung.

Intensitäten beschreiben die örtlichen Effekte von Erdbeben auf die Umwelt. Dies umfasst den gesamten Bereich von der Spürbarkeit des Bebens über verschiedene Stufen der Beschädigung von Gebäuden bis hin zu deren vollständiger Zerstörung. Diese Form der Beschreibung muss an die Verletzbarkeit von Gebäuden kalibriert werden, um allgemeingültige Intensitätswerte liefern zu können. Obwohl heute direkt physikalische Größen der Bodenbewegung gemessen werden können, bleiben Intensitäten wichtig, da für historische Beben nur Intensitäten aus Beschreibungen von Zeitzeugen abgeleitet werden können (Schellbach und Grünthal, 2016). So können heutige Beben mit historischen verglichen oder Auswirkungen möglicher Wiederholungen historischer Beben besser verstanden werden. Intensitäten werden mit Hilfe von Gleichungen vorhergesagt, die im Wesentlichen die Magnitude und Entfernung zum Erdbeben als Parameter benötigen. Solche Gleichungen werden aus vorhergehenden Intensitätsbeobachtungen hergeleitet. Vergleichbar mit den Tests für Erdbebenvorhersagemodelle wurden am GFZ Tests durchgeführt, die die Vorhersagequalität von Intensitätsvorhersagegleichungen für Italien untersuchen (Mak et al., 2015). Dabei konnte festgestellt werden, dass Gleichungen, die auf physikalischen Prinzipien basieren, eine größere Vorhersagekraft haben, als die, welche die Daten rein statistisch anpassen. Diese Testverfahren können in der Zukunft helfen, aus der Vielzahl solcher Gleichungen diejenigen auszuwählen, deren Vorhersagekraft am größten ist.

Intensitäten sind sehr gut zur Kommunikation geeignet, gleichwohl werden Gefährdungsanalysen meistens in physikalischen Größen angegeben, da diese für die Entwicklung von Gebäudevorschriften notwendig sind und insgesamt eine genauere Beschreibung der Bodenbewegung liefern. In der Regel werden Bodenbewegungsgleichungen für die tektonischen Hauptgruppen (z. B. Subduktionszone) aus möglichst vielen vorhergehenden Beobachtungen abgeleitet. Beobachtungen legen jedoch nahe, dass regionale Eigenheiten der Verwerfungen, Erdbeben und Krusteneigenschaften signifikanten Einfluss auf die Bodenbewegungen haben und diese berücksichtigt werden müssen. Daher werden in dieser interdisziplinären Forschung am GFZ Regionalisierungen von Bewegungsgleichungen durch datenbasierte Charakterisierungen von regionalen Eigenschaften, Wellenausbreitungssimulationen und direktes Beobachten von Bodeneigenschaften an kritischer Infrastruktur vorangetrieben, so z. B. in hochaktiven Gebieten (Kotha et al., 2016) oder stabilen Teilen Europas (Drouet und Cotton, 2015). Insbesondere aber werden die exponentiell wachsende Menge an Bodenbewegungsbeobachtungen und neue Methoden im maschinellen Lernen zur Entwicklung vollständig datenbasier-

ter Bewegungsgleichungen genutzt (Derras et al., 2014). Damit wird es möglich, die Abhängigkeit der Bodenbewegungen von der Charakteristik der Erdbeben (Faltungstyp, Tiefe) und des lokalen/regionalen Untergrunds (Boden-/Gesteinstypen, Lage) zu ermitteln. Innerhalb von EPOS (European Plate Observing System) leitet das GFZ die Gruppe für regionale Bewegungsgleichungen für Europa.

Gefährdungsanalysen verknüpfen Aktivitätsprognosen mit Bodenbewegungsgleichungen. Hierbei wird zwischen deterministischen und probabilistischen Analysen unterschieden. Eine deterministische Analyse beschreibt ein konkretes Erdbebenszenario und die dabei zu erwartenden Bodenbewegungen. Im Gegensatz dazu basieren probabilistische Analysen auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen unterschiedlicher Szenarien und liefern daher ein vollständigeres Bild der zu erwartenden Bewegungen. Das GFZ ist sowohl an weltweiten Analysen (z. B. SHAREP; Woessner et al., 2015), als auch an regionalen oder nationalen Gefährdungseinschätzungen beteiligt (siehe Abb. 2, Grünthal et al., 2009). Gleichzeitig wurde in Zusammenarbeit mit dem Global Earthquake Model (GEM) am GFZ ein Kompetenzzentrum für das Testen aller an Gefährdungsanalysen benötigten Komponenten aufgebaut.

In einer Pilotstudie wurden sowohl japanische Bodenbewegungsgleichungen als auch Gefährdungsmodelle des United States Geological Survey (USGS) getestet (Mak und Schorlemmer, in press).

## Crowd-sourced Daten, citizen science und dynamische Risikoabschätzung

Gefährdungsanalysen beschreiben die physischen Auswirkungen von Erdbeben und dienen als Grundlage für Vorschriften für erdbebensicheres Bauen. Obwohl solche Vorschriften für viele Erdbebengebiete existieren, entspricht ihnen nur ein Bruchteil der Häuser. Da bei jedem größeren Beben mit Schäden und Opfern zu rechnen ist, ist es sinnvoll, sogenannte Risikomodelle zu berechnen, um die Auswirkungen von Erdbeben auf die Bevölkerung und die Gebäude abschätzen zu können. Dazu werden Modelle entwickelt, die die Verteilung von Gebäuden und ihre Verwundbarkeit beschreiben. Mit diesen Modellen können aus den Gefährdungsanalysen Risikoberechnungen erstellt werden und die potenziellen Zahlen der beschädigten und zerstörten Gebäude sowie der verletzten und getöteten Menschen abgeschätzt werden. Diese Modelle sind nicht nur für staatliche Akteure wichtig, sondern dienen auch der (Rück-)Versicherungswirtschaft zur Abschätzung der Versicherungsprämien.

Am GFZ wird ein Ansatz zur Erschließung einer völlig neuen Datenquelle erprobt. Diese Idee basiert auf offenen Daten und aktiver Bürgerbeteiligung (citizen science). Als Grundlage wird OpenStreetMap (OSM, [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)), eine

offene geographische Datenbank, quasi eine Wikipedia der Geodaten, verwendet. Da OSM auf der Arbeit von Freiwilligen basiert, ist die Datenvollständigkeit sehr heterogen. Dennoch gibt es bereits intensiv erfasste Gebiete, in denen jedes Gebäude mindestens als Grundriss enthalten ist. Gegenwärtig hat OSM mehr als 175 Mio. Gebäudegrundrisse und diese Zahl wächst um rund 100 000 Gebäude täglich. Das System berechnet für jedes Gebäude so viele Expositionsindikatoren, wie es die Datenausgangslage in OSM erlaubt (siehe Abb. 3). Dieses neue Konzept dient nicht nur der möglichst schnellen Erfassung der urbanen Expansion in dynamisch wachsenden Städten, sondern ebenfalls der Einbindung lokaler Akteure mithilfe neuartiger Erfassungshilfen. Dazu wird eine Applikation für Tabletcomputer und Smartphones entwickelt, mit der einfach und schnell vor Ort Gebäudeparameter erfasst werden können. Dadurch könnte bei lokalen Akteuren, die bei der Erfassung risikorelevanter Daten mithelfen, ein stärkeres Bewusstsein für Erdbebenrisiko und ein besseres Verständnis der Risikolage der eigenen Gemeinde geschaffen werden. Zwei Pilotprojekte in Griechenland und Japan mit lokalen Experten und Akteuren, darunter die Stadtverwaltungen und Nichtregierungsorganisationen, sind geplant.

Zudem wird ein neues Konzept erarbeitet, in dem die gesamte hier vorgestellte Berechnungskette von Seismizitätsmodellen bis zur Risikoberechnung in einem rein daten- und testbasierten System automatisiert wird, um die zahlreichen ungeprüften Expertenannahmen aus diesen Berechnungen zu eliminieren und nur die Informationen zu verwenden, die in den Beobachtungen enthalten sind. Jede Modellkomponente soll permanent auf ihre Vorhersagequalität getestet werden und ggf. durch bessere Komponenten ersetzt werden. Ferner sollen Komponenten entwickelt werden, die sich dynamisch an die Beobachtung anpassen, um eine verbesserte Vorhersage zu ermöglichen. Das resultierende Gefährdungs- und Risikomodell wird dadurch hochdynamisch sein, da sowohl die Modellkomponenten je nach Testergebnis ausgetauscht werden, als auch alle Vorhersagen sich mit der Dynamik der Erdbebenverteilung sowie der Infrastruktur verändern.

## Literatur

- Bach, C., Hainzl, S. (2012): Improving empirical aftershock modeling based on additional source information. - *Journal of Geophysical Research*, 117, B04312.
- Derras, B., Bard, P. Y., Cotton, F. (2014): Towards fully data driven ground-motion prediction models for Europe. - *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 1, pp. 495–516.
- Drouet, S., Cotton, F. (2015): Regional Stochastic GMPEs in Low Seismicity Areas: Scaling and Aleatory Variability Analysis—Application to the French Alps. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 4, pp. 1883–1902.
- Giardini, D., Grünthal, G., Shedlock, K. M., Zhang, P. (1999): The GSHAP global seismic hazard map. - *Annali di Geofisica*, 42, 6, pp. 1225–1230.

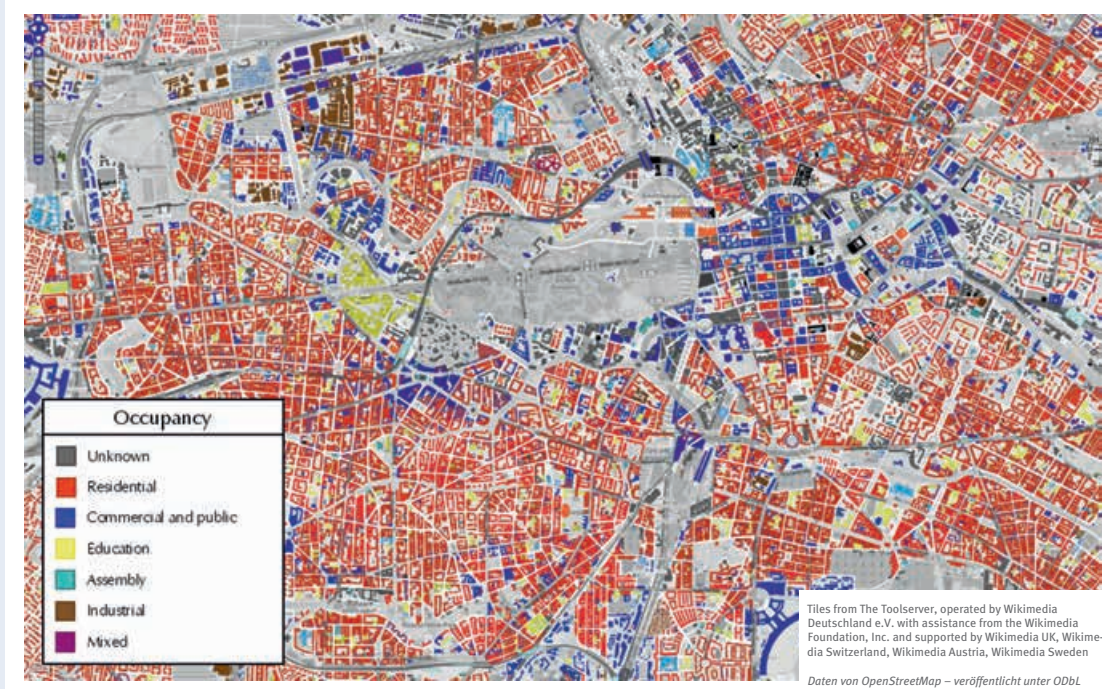


Abb. 3: Aus OpenStreetMap-Daten abgeleitete Gebäudenutzung in Berlin. Die Legende gibt nur eine grobe Klassifizierung wieder.

Fig. 3: Building occupancy types in Berlin derived from OpenStreetMap data. The legend only refers to a rough classification.

- Grünthal, G., Bosse, C., Stromeier, D. (2009): Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland: Version 2007 mit Anwendung für die Erdbeben-Lastfälle der DIN 19700:2004-07 „Stauanlagen“, (Scientific Technical Report STR; 09/07), Potsdam: Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, 81 p.
- Grünthal, G., Stromeier, D., Heidbach, O. (2013): Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen. - System Erde, 3, 1, pp. 54–61.
- Hainzl, S., Moradpour, J., Davidsen, J. (2014): Static stress triggering explains the empirical aftershock distance decay. - Geophysical Research Letters, 41, 24, pp. 8818–8824.
- Kotha, S. R., Bindi, D., Cotton, F. (2016): Partially non-ergodic region specific GMPE for Europe and Middle-East. - Bulletin of Earthquake Engineering, 14, 4, pp. 1245–1263.
- Mak, S., Clements, R., Schorlemmer, D. (2015): Validating Intensity Prediction Equations for Italy by Observations. - Bulletin of the Seismological Society of America, 105, 6, pp. 2942–2954.
- Mak, S., Schorlemmer, D. (in press): A comparison between the forecast by the United States National Seismic Hazard Maps with recent ground motion records. - Bulletin of the Seismological Society of America.
- Moradpour, J., Hainzl, S., Davidsen, J. (2014): Nontrivial decay of aftershock density with distance in Southern California. - Journal of Geophysical Research, 119, 7, pp. 5518–5535.
- Schellbach, K., Grünthal, G. (2016): Historische Seismologie – Schlüssel für verlässlichere Daten zur Abschätzung der Erdbebengefährdung. - System Erde, 6, 1, pp. 44–49.
- Schorlemmer, D., Wiemer, S. (2005): Microseismicity data forecast rupture area. - Nature, 434, 7037, p. 1086.
- Schorlemmer, D., Wiemer, S., Wyss, M. (2005): Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. - Nature, 437, 7058, pp. 539–542.
- Schorlemmer, D., Gerstenberger, M. C. (2007): RELM Testing Center. - Seismological Research Letters, 78, 1, pp. 30–36.
- Schorlemmer, D., Gerstenberger, M. C., Wiemer, S., Jackson, D. D., Rhoades, D. A. (2007): Earthquake Likelihood Model Testing. - Seismological Research Letters, 78, 1, pp. 17–29.
- Schorlemmer, D., Woessner, J. (2008): Probability of Detecting an Earthquake. - Bulletin of the Seismological Society of America, 98, 5, pp. 2103–2117.
- Schorlemmer, D., Mele, F., Marzocchi, W. (2010): A Completeness Analysis of the National Seismic Network of Italy. - Journal of Geophysical Research, 115, B4, B04308.
- Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M. B., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R. W., Rovida, A. N., Sesetyan, K., Stucchi, M. (2015): The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. - Bulletin of Earthquake Engineering, 13, 12, pp. 3553–3596.
- Zakharova, O., Hainzl, S., Bach, C. (2013): Seismic moment ratio of aftershocks with respect to main shocks. - Journal of Geophysical Research, 118, 11, pp. 5856–5864.

# Historische Seismologie

## Schlüssel für verlässlichere Daten zur Abschätzung der Erdbebengefährdung

Konrad Schellbach und Gottfried Grünthal  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Seismic hazard assessments can only be as good as the historical past is known. Therefore, reliable seismicity records have to be extended back into history as far as possible. Hence, historical seismological investigation is of utmost importance in order to achieve long-term earthquake catalogue data of high quality. This basic research has been performed at the GFZ German Research Centre for Geosciences as a multidisciplinary approach of seismologists and historians for many years.*

*Seismic activity before the installation of the first seismographs in the beginning of the 20th century can only be reconstructed based on written sources. For Central Europe, these documents date back up to the middle of the 8th century. The historical information for each earthquake has to be source-critically analyzed and transferred into parameterized information, which is then catalogued. During the long tradition of collecting past seismic information starting more than a century ago, many mistakes were made, like duplications of events, misinterpreted strength, location and wrong dating of earthquakes, which could be identified by our investigation. We show exemplarily how these uncertainties can be mitigated. Historical passing on of information is transferred to modern seismicity parameters by applying historic-critical methods. Thus, we are able to acquire better and more reliable long-term data for historical earthquake catalogues and for trustworthy long-term seismic hazard assessments.*



## Die Erforschung historischer Seismizität als Aufgabe multidisziplinärer Grundlagenforschung

Eine gesellschaftliche Herausforderung geowissenschaftlicher Forschung besteht darin, die Auswirkungen von Naturkatastrophen oder Naturgefährdungen zu vermindern. Im Vergleich aller Naturgefährdungen verursachen Erdbeben im globalen wie im europäischen Maßstab sowohl die größten Verluste an Menschenleben als auch die höchsten materiellen Schäden. Diese Gefahr ist in Deutschland vergleichsweise gering, jedoch nicht so gering, dass etwa auf Baunormen zum erdbebengerechten Konstruktionsentwurf verzichtet werden kann. Da das erdbebengerechte Bauen mit zusätzlichen Aufwendungen verbunden ist, wird aus ökonomischen Gründen insbesondere dort erdbebensicher gebaut, wo die Gefährdung es verlangt. Eine zentrale Aufgabe der Ingenieurseismologie ist es, Erdbebengefährdungskarten auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Grundlage zu berechnen, um für das Erdbebeningenieurwesen die Daten bereitzustellen, wo und mit welchen seismischen Lasten zu rechnen ist. Seit mehr als 20 Jahren werden derartige Karten und Daten für verschiedene Baunormen der Bauindustrie, aber auch zur Sicherheitsüberprüfung von Stauanlagen vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ zur Verfügung gestellt.

Grundlage verlässlicher Einschätzungen zur Erdbebengefährdung sind möglichst weit in die Historie zurückreichende, glaubwürdige Daten zu aufgetretenen Erdbeben. Besonders in schwach seismisch aktiven Gebieten, in denen signifikante schadenverursachende Beben sehr selten und in mittleren Abständen von Jahrhunderten auftreten, ist die Erforschung der historischen Seismizität von essentieller Bedeutung. Jedoch ist der Zeitraum hinreichend detaillierter instrumenteller Aufzeichnungen seit den 1960er Jahren völlig unzu-

reichend. Obwohl ab etwa 1900 die ersten Seismographen installiert wurden, waren deren Detektionsmöglichkeiten noch sehr eingeschränkt. Alle Daten davor basieren auf schriftlichen Überlieferungen menschlicher Wahrnehmungen zu beobachteten Auswirkungen von Erdbeben. Diese wurden insbesondere seit dem 19. Jh. systematisch gesammelt und in Form von Erdbebenkatalogen aufbereitet. Die erstaunlich große Menge solcher Quellen ab etwa 1750 kann von erfahrenen Seismologinnen und Seismologen analysiert werden. Bezüglich weiter zurückliegender Überlieferungen ist eine enge Zusammenarbeit mit den Geschichtswissenschaften zwingend geboten, was in ausgesprochenem Maße für die Nachrichten aus dem Mittelalter vor etwa 1500 zutrifft. Um das Seismizitätsgeschehen hinreichend zu verstehen, kann auf diese Quellen von vor 1500, die für Deutschland bis zur Zeit der Karolinger Mitte des 8. Jh. zurückreichen, keinesfalls verzichtet werden. Seit einer Reihe von Jahren besteht eine intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit von Forschern des GFZ mit Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für die Geschichte des Mittelalters an der Universität Potsdam. Diese interdisziplinären Forschungsarbeiten zur Historischen Seismologie wurden 2011 als ein Projekt des Berlin-Potsdamer Forschungsverbunds Geo.X etabliert.

Ziele und integrative Aufgaben von Seismologie und Geschichtswissenschaft bestehen darin, bestehendes Wissen zu evaluieren und neue quellenkritische Methoden zu entwickeln, um hinreichend präzise Erdbebenparameter zu historischen Beben abzuleiten (*Grünthal 2004; Ambraseys 2005*). Diese verbesserten Daten ermöglichen robuste und verlässlichere Erdbebengefährdungsanalysen.

## Erdbebenkataloge als Ergebnis frühneuzeitlicher Wissenssammlung

Das gegenwärtige Wissen über die Seismizität des letzten Jahrtausends in Mitteleuropa, wie es Abb. 1 in einem Ausschnitt zeigt, ist das Ergebnis einer langen Wissenschaftstradition. Seit der Renaissance trugen Gelehrte Nachrichten zu vergangenen Erdbeben aus schriftlichen Quellen zusammen.

In Italien schufen Humanisten wie *Manetti (1457)* und später auch nördlich der Alpen *Lycosthenes (1557)* systematische Sammlungen mit einem an ein breites Publikum gerichteten enzyklopädischen Anspruch. Das schwere Erdbeben vom 1. November 1755 in Lissabon, das sich bis in unseren Raum durch Schwingen von Lüstern während der Messe zu Allerheiligen bemerkbar machte, bewirkte eine konzeptionelle Neuausrichtung. Kants ursachenlogische sowie erkenntnisthe-

*Links: Fresko mit den wahrscheinlichen Schäden des starken Villach-Erdbebens von 1348 an der Burg Arnoldstein (Kärnten, Österreich). Es ist Bestandteil des Apokalypsenzyklus vom Straßburger Nikolaus Wurmser von 1361-1362 in der Marienkapelle der Burg Karlstein nahe Prag. (Foto: Hammerl & Lenhardt (1997): Erdbeben in Österreich, S. 19, mit frdl. Genehmigung durch C. Hammerl)*

*Left: Fresco showing probably the damage due to the strong earthquake near Villach in 1348 at the Castle Arnoldstein (Carinthia, Austria). It is part of an apocalypse cycle in the Lady Chapel of Karlstein Castle near Prague by the Strasbourg Nikolaus Wurmser from 1361-1362.*



**Kontakt:** K. Schellbach  
(schellba@gfz-potsdam.de)

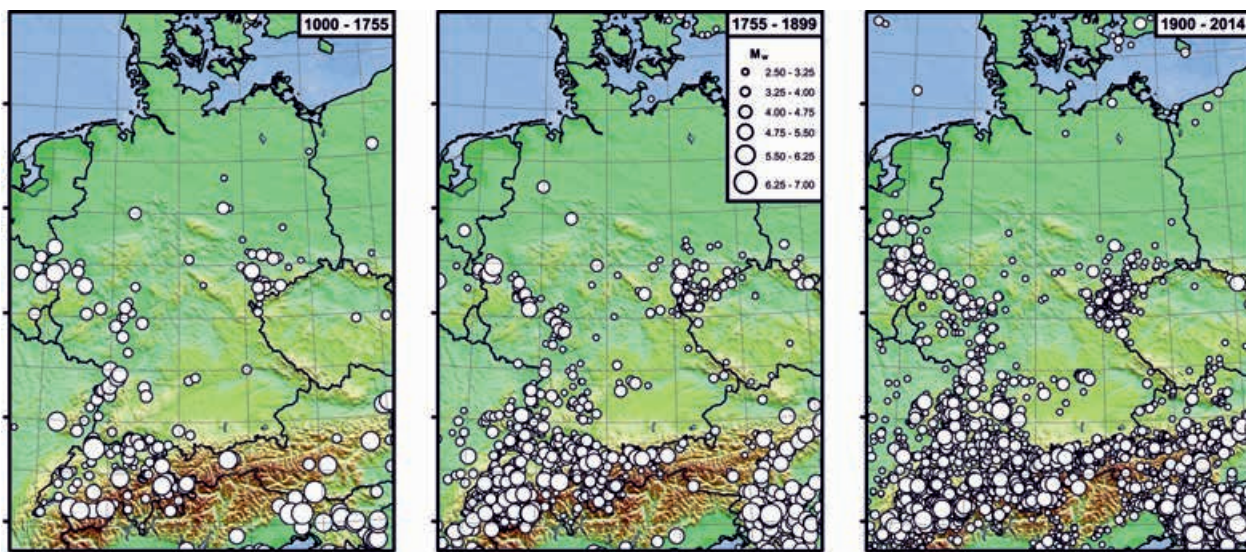


Abb. 1: Epizentrenkarten für Teile Mitteleuropas für drei Zeiträume anhand der Datenbank zum Erdbebenkatalog von Grünthal und Wahlström (2012; Grafiken: GFZ)

Fig. 1: Epicentre maps for parts of Central Europe for three time periods based on the databank of the earthquake catalogue by Grünthal and Wahlström (2012)

oretische Gedanken zum Lissabon-Erdbeben machten, wie die literarischen Abhandlungen von Voltaire und Goethe, dieses Ereignis einer breiten europäischen Öffentlichkeit zugänglich. Getragen von einer sich ändernden Wissensgesellschaft emanzipierte sich in der Folgezeit die Interpretation von Erdbeben als örtlicher Prozess im Erdinnern von bisherigen Erklärungen, die bis in die Antike zurückreichen (Grünthal, 2004).

Spätestens mit der Aufklärung änderte sich somit der deskriptive Sammlungscharakter, wie er für frühneuzeitliche Arbeiten typisch ist. Der Fokus verschob sich nun zu Gunsten einer primär naturwissenschaftlichen Anwendbarkeit mit der Zusammenstellung originaler Quellen sowie der gezielten Erstellung detaillierter Erdbebenkataloge seit dem Ende des 19. Jh. (ebd.). Quantitative Kompilationen unterschiedlichster Nachrichten bewirkten jedoch einen hohen Fehleranteil. Der Anspruch umfangreicher Quellensammlung, als Grundlage aller modernen Erdbebenkataloge, ging zu Lasten einer quellenkritisch-methodischen Bewertung der Erdbebennachrichten. Ein hohes Maß an Datierungsfehlern, rezeptionsbedingten Doppelnennungen sowie fälschlichen Lokalisierungs- und Stärkeangaben prägt folglich den Inhalt zahlreicher mitunter heute noch verwendeter Erdbebenkataloge.

Zielstellung einer modernen Historischen Seismologie ist es, jene Unsicherheiten herauszuarbeiten und zu quantifizieren, die, aus vormodernen Wahrnehmungsweisen und Wissensbeständen resultierend, auf die historische Überlieferung einwirkten. Es gilt zu beachten, dass das physikalische Modell des Erdbebenprozesses ein Konzept der Moderne ist. In früheren Zeiten waren Erklärungen für Erdbeben stets ein Ausdruck des jeweiligen zeitgenössischen Wissensstandes, dem das Prinzip tektonischer Erdbeben unbekannt war. Frühe Historiographen entwickelten oft ihre eigenen Herleitungen für die Erschütterungen der Erde. Insbesondere die Erdbeben des Mittelalters stellen die Forschung vor die Herausforderung, dass historische Berichte vor diesem Hintergrund abgefasst wurden und sich nur aus historischer Sicht erschließen lassen.

Mittelalterliches Denken ist nicht von einem universell gedachten Weltkonzept zu trennen, in dem antike Philosophie und christliche Glaubensvorstellung miteinander eng verschmolzen (Abb. 2). Erst die Rekonstruktion des zeitgenössischen Wissensstands, die Kenntnis um praktizierte Argumentations- und Erinnerungstechniken sowie schließlich das Verständnis über die konzeptionelle Rolle der Geschichtsschreibung als wesentlicher Träger vergangener seismischer Informationen ermöglicht eine verlässliche ereignisgeschichtliche Rekonstruktion von Erdbebenereignissen (Schellbach, 2014).



Abb. 2: Der Fall Babylons gemäß der Offenbarung des Johannes, dargestellt auf dem Wandteppich der Apokalypse von Angers (1373-1382). Erdbeben als Zeichen göttlichen Wirkens in der Heilsgeschichte sind fundamentaler Bestandteil mittelalterlicher Welterklärung. (Foto: La chute de Babylone (tapisserie de l'Apocalypse), Angers, Frankreich, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:La\\_chute\\_de\\_Babylone.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:La_chute_de_Babylone.jpg))

Fig. 2: The Fall of Babylon according to the Book of Revelations illustrated on the tapestry of the Apocalypse of Angers (1373-1382). Earthquakes as signs of divine action in salvation history are a fundamental aspect of medieval explanation of the world.

## Falschbeben und neue Parameter als Ergebnis überprüfter Erdbebenkataloge

Die Schwierigkeiten bei der Bewertung historischer Erdbeben sind vielfältig. Beispiele wie jene für die Jahre 1201, 1202 und 1205 überlieferten brandenburgischen Falschbeben (ebd.) verdeutlichen stellvertretend die Herausforderungen im Umgang mit schriftlichen Quellen. Erwähnungen wie die des Lübecker Dominikaners Hermann Korner zum Erdbeben von 1205 zeigen exemplarisch die Notwendigkeit eines hermeneutischen Ansatzes in der Historischen Seismologie. Seine Schilderung *terremotus maximus factus est in Brandenburg secundum Egghardum et in aliis Marchie partibus circumquaque et plures corruerunt turres, ecclesie et domus in civitatibus eiusdem terre*<sup>1</sup> (siehe Abb. 3) ist die Folge zeitgenössischer Geschichtsauffassung, von Schreiber motivation und Publikumserwartung. Die Niederschrift vormoderner Erdbebennachrichten ist oftmals in diesem Sinne geprägt. Im vorliegenden Fall ist sie gar das Ergebnis zweier miteinander verschmolzener, aus dem Alpenraum sowie aus Palästina stammender Informationen über dortige Beben in den Jahren 1201 und 1202. Korner nutzte im vorliegenden Fall zahlreiche ältere Quellen dominikanischer Geschichtsschreibung zu beiden Beben und übertrug diese als fortgeschrittene Rezeptionsstufe als ein alleiniges Erdbeben in die Mark Brandenburg. Dort hat ein solches aber nie stattgefunden (ebd.). Beispiele wie Hermann Korners Darstellung sind, besonders für mittelalterliche und frühneuzeitliche Beben,

eher die Regel als die Ausnahme. Um die Mitte des 20. Jh. in ältere Kataloge aufgenommen, verdeutlichen sie exemplarisch die hohe Fehlerhaftigkeit zum Teil bis heute genutzter Erdbebenkataloge in Deutschland. Erst wenige moderne Arbeiten haben sich der Behebung derartiger Falschbeben konsequent angenommen.

Aufzeichnungen in der Geschichtsschreibung (wie Abb. 3), in Briefen, Tagebüchern und Reiseberichten usw. sind die entscheidende Grundlage unserer heutigen Kenntnis über die historische Seismizität. Unsicherheiten für die Parametrisierung zu benennen und wenn möglich zu verringern, heißt demnach, eine methodische Kritik dieser Quellen vorzunehmen. Mittels der Eruiierung von Schreibgewohnheiten, rezeptionsbedingten Abhängigkeiten und Kommunikationswegen werden die wesentlichen Hürden auf dem Weg zu einer verlässlichen Parametrisierung überwunden. Dies betrifft das Erkennen von Doppelüberlieferung und das Wissen um den Sinngehalt oft standardisiert gebrauchter, narrativer Muster zur Beschreibung eingetretener Erdbeben, wie jene typische lateinische Wendung *terrae motus factus est*<sup>2</sup>. Ebenfalls gilt es für Zeiten mit ausgeprägter mündlicher Tradition und geringer Schriftlichkeit die mitunter hohen Verlusten von Überlieferungen zu berücksichtigen.

Aktuelle Erdbebenkataloge, wie die beiden am GFZ erstellten Kataloge CENEC<sup>3</sup> (Grünthal et al., 2009) und EMEC<sup>4</sup> (Grünthal

<sup>1</sup> „Ein sehr heftiges Erdbeben hat in Brandenburg und überall in den anderen Teilen der Mark, gemäß Eckehard, stattgefunden und mehrere Türme, Kirchen und Häuser sind in den Städten dieser Erde eingestürzt.“

<sup>2</sup> „Es ist ein (starkes) Erdbeben geschehen.“

<sup>3</sup> Central, northern and Northwestern European Earthquake Catalogue

<sup>4</sup> European-Mediterranean Earthquake catalogue

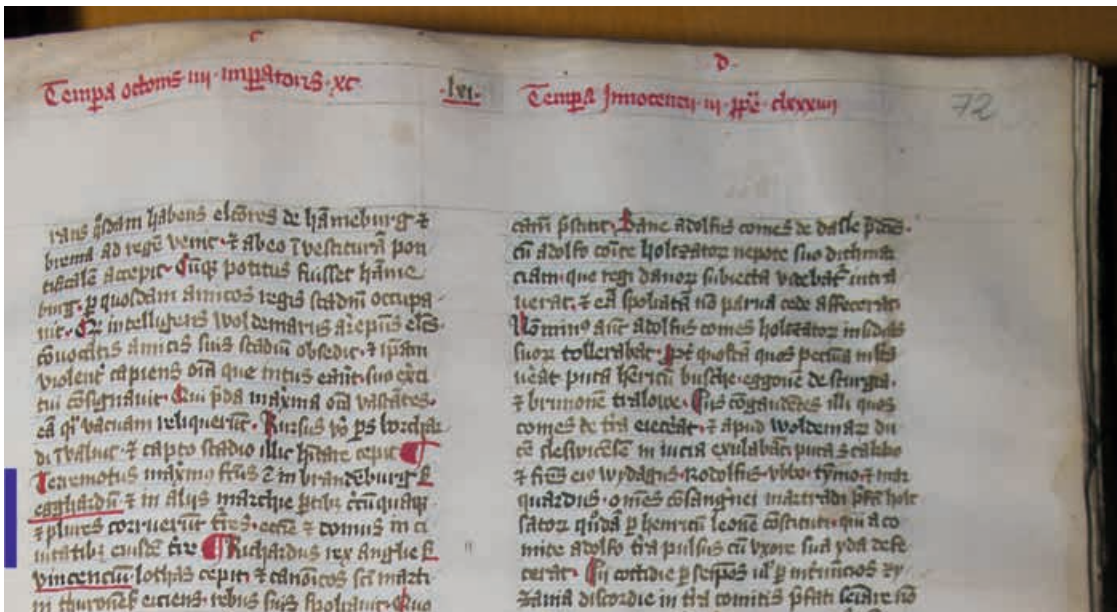


Abb. 3: Erwähnung des Erdbebens von 1205 (blau markiert) in Hermann Korners *Chronica novella de quarte opere*. Lüneburg, Ratsbücherei, Ms. Hist. C. 2.2, fol. 72r, a. (Fassung D, um 1435). (Foto: Abdruck mit frdl. Genehmigung der Ratsbücherei Lüneburg)

Fig. 3: The description of the earthquake of 1205 (marked by the blue line) in the manuscript of version D of Korner's *Chronica novella* is from about 1435.

und Wahlström, 2012), wurden bereits im Bewusstsein um die Bedeutung historischer Quellenkritik erstellt. Durch die Eingliederung methodischer Einzelstudien konnte der Fehleranteil gegenüber vergleichbaren Arbeiten deutlich vermindert werden. Die Vergabe neuer Parameter zur Lokalisierung und zur makroseismischen Intensität zeugen gemeinsam mit dem Erkennen vieler Falschbeben vom erreichten Fortschritt. Für die Zukunft gilt es, diesen Weg einer verbesserten Katalogqualität weiter zu beschreiten.

### Vergabe von makroseismischen Intensitäten auf Grundlage schriftlicher Überlieferungen des Mittelalters

Die Stärke historischer Erdbeben aus vorinstrumenteller Zeit wird in Form makroseismischer Intensitäten parametrisiert. Die offiziell eingeführte Europäische Makroseismische Skala EMS-98 (Grünthal, 1998) bietet nicht nur die Grundlage einer verbesserten Intensitätsbewertung unter Verminderung des subjektiven Faktors, sondern auch spezielle Anleitungen zur Intensitätsbewertung historischer Erdbeben.

In einer modernen und gemäß quellenkritischer Maßstäbe agierenden Historischen Seismologie wird angenommen, dass die reine Überlieferung eines wahrgenommenen Erdbebens durch die mittelalterliche Geschichtsschreibung keine explizite Ab-

schätzung einer makroseismischen Intensität erlaubt. Dennoch sollte die Schütterwirkung für das relevante Gebiet zumindest als stark empfunden worden sein. Dies entspräche einer makroseismischen Intensität von 5. Erschütterungen dieser Intensität werden von den meisten Menschen in Gebäuden wahrgenommen und wirken auf wenige ängstigend. Zur Nachtzeit erwachen viele Schlafende. Gleichfalls spüren Beobachter ein starkes Zittern oder Schütteln des ganzen Gebäudes. Zusätzlich schwingen hängende Objekte beträchtlich (ebd.). In der Praxis hat sich die Bestimmung von makroseismischen Intensitäten gemäß der EMS-98-Skala als erstaunlich zuverlässig und robust erwiesen. Anhand der Stärkebestimmungen moderner Beben ist anerkannt, dass die Magnituden schwächerer bis mittelstarker für Deutschland typischer Beben anhand makroseismischer Informationen etwa mit gleichen Unsicherheiten verbunden sind wie die Unsicherheiten von Magnituden aus instrumentellen Aufzeichnungen.

Mitunter gestaltet es sich jedoch gerade für mittelalterliche Erdbeben schwierig, eine makroseismische Intensität auf Basis der universell anwendbaren EMS-98-Skala zu vergeben. Oftmals verlangt in diesen Fällen der Erdbebenbericht eine Interpretation, die sich nicht ausschließlich auf den überlieferten Wortsinn beschränkt, sondern eine hermeneutisch geschulte Lesart der einzelnen Schreibumstände erfordert (ebd.). Ein Beispiel, wie das in der Chronik Bernolds von St. Blasien übermittelte Erdbeben von 1092, veranschaulicht die Problematik. In seinen



Worten ereignete sich des Nachts ein schweres Erdbeben in der Nähe des Klosters Allerheiligen bei Schaffhausen. Allerdings wurde das „starke“ Beben nur von den wenigen anwesenden Mönchen wahrgenommen. Die Tatsache, dass die Mehrheit der schlafenden Mönche nicht erwachten und somit keine Zeugen der Erschütterung wurden (*Bernold von St. Blasien, Chronicon, S. 498f.*), steht dem entgegen, die als „stark“ überlieferte Erschütterung mit einer Intensität von 5 oder größer zu bewerten.

## Schlussfolgerung für die weitere Forschung

Das Beispiel vom Beben 1092 unterstreicht die Notwendigkeit, Aussagen mittelalterlicher Erdbebenbeschreibungen für moderne seismologische Anwendungen zu erklären. Erst durch eine Dechiffrierung der oftmals in den Worten *terrae motus factus est (magnus)* standardisiert erfolgten Beschreibung lässt sich eine ereignisgeschichtliche Rekonstruktion als methodische Vorbedingung der Parametrisierung sicher durchführen.

Für die Zukunft ist eine systematische quellenkritische Überarbeitung bestehender historischer Datenreihen seit Mitte des 8. Jh. zu Erdbeben in Deutschland bis zum Beginn instrumenteller seismischer Aufzeichnungen notwendig. Die Etablierung einer neuen Generation parametrisierter historischer Erdbebenkataloge ist somit im Sinne von Wissenschaft und Gesellschaft.

## Literatur

- Ambraseys, N. (2005): Historical earthquakes in Jerusalem – A methodological discussion. - *Journal of Seismology*, 9, 3, pp. 329–340.
- Robinson, I. S. (Ed.) (2003): Die Chroniken Bertholds von Reichenau und Bernolds von Konstanz: 1054-1100, (Monumenta Germaniae Historica: Scriptores: 6, Scriptores rerum Germanicarum; N. S., 14), Hannover: Hahn, 645 p.
- Grünthal, G. (1998): European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), (Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie; 15), 99 p.
- Grünthal, G. (2004): The history of historical earthquake research in Germany. - *Annals of Geophysics*, 47, 2/3, pp. 631–643.
- Grünthal, G., Wahlström, R., Stromeyer, D. (2009): The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC) - updated and expanded to the last millennium. - *Journal of Seismology*, 13, 4, pp. 517–541.
- Grünthal, G., Wahlström, R. (2012): The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. - *Journal of Seismology*, 16, 3, pp. 535–570.
- Lycosthenes, C. (1557): *Prodigiorum ac ostentorum Chronicon*, Basel: Petri, 670 p.
- Manetti, G. (ca. 1457): *De terraemotu libri tres*, (translation into Italian by C. Scopelliti, annotated by C. Scopelliti and D. Molin, ENEA, Roma 1983).
- Schellbach, K. (2014): Erdbeben in der Mark Brandenburg? Vorstellung und Wirklichkeit in den Rezeptionsgewohnheiten spätmittelalterlicher Weltchronistik. - In: Bütow, S., Riedel, P., Tresp, U. (Eds.), *Das Mittelalter endet gestern. Beiträge zur Landes-, Kultur- und Ordensgeschichte. Heinz-Dieter Heimann zum 65. Geburtstag*, (Studien zur brandenburgischen und vergleichenden Landesgeschichte; 16), Berlin, pp. 50–64.

# Von der Gesteinsprobe bis zur Platten- grenze: Skalenübergreifende Analyse von Bruchprozessen

Marco Bohnhoff, Grzegorz Kwiatek, Georg Dresen  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Rupture processes show strong similarities on broad spatial scales suggesting that in parts the governing physics for microcrack formation in the laboratory or a large earthquake along a tectonic plate boundary are the same. We discuss examples ranging from rock deformation experiments in the laboratory under controlled boundary conditions, induced seismicity in mines and geological reservoirs to natural earthquakes posing tremendous seismic hazard to population centers. We describe fundamental relations for the entire bandwidth of rupture processes involving fractures, faults and shear zones and their seismic characteristics such as b-value or seismic source properties. Laboratory tests on small-scale rock samples allow studying aspects of processes that control earthquake nucleation and rupture propagation. However, up-scaling of laboratory results to the field scale requires that dominant deformation processes remain the same on vastly different scales, and that potential effects of changing kinematic boundary conditions may successfully be accounted for by appropriate constitutive equations. Our approach shows that constitutive models capturing fundamental physical processes on the laboratory scale may be successfully applied to improve process understanding of deformation on the field scale with the potential to improve seismic hazard estimation.*



Die Entstehung von Erdbeben wurde in der Antike aufgrund fehlender Kenntnisse der grundlegenden physikalischen und geowissenschaftlichen Zusammenhänge meist der Gewalt der Götter zugeschrieben. Unsere heutige phänomenologische Vorstellung ihrer Entstehung ist nur etwas über 100 Jahre alt. Nach dem vernichtenden Erdbeben von San Francisco 1906 formulierte Henry Fielding Reid im Jahr 1910 die sogenannte „Elastic Rebound Theory“ (Reid, 1910). Diese Beschreibung des Erdbebenprozesses durch das Modell eines Scherbruchs gilt heute weithin als Geburtsstunde der modernen Seismologie. Demnach bewegen sich Gesteinsblöcke und Erdplatten aneinander vorbei und es kommt durch Reibung und an Unebenheiten zum Verhaken. Die langsame, aber über lange Zeiträume andauernde, nahezu kontinuierliche Bewegung führt dazu, dass die verhakte Plattengrenze Spannung aufbaut und die umgebende Gesteinsformation elastisch verformt wird. Diese Verformung an tektonischen Plattengrenzen kann über Jahrzehnte bis Jahrhunderte andauern mit Bewegungen von einigen Zentimetern pro Jahr. Ein Teil der während dieses Prozesses gespeicherten elastischen Energie wird schließlich nach Überschreiten der Gesteinsfestigkeit entlang der Plattengrenze durch einen Scherversatz schlagartig in Form von Erdbeben freigesetzt. Die bei diesem Ereignis erzeugten seismischen Wellen können an der Erdoberfläche oder in Überwachungsbohrungen von Seismometern erfasst und analysiert werden (Bohnhoff et al., 2010).

Fundamentale Fragen wie die nach dem möglichen Nukleationspunkt zukünftiger Erdbeben, dem Verlauf des Bruchprozesses und nach den entscheidenden Parametern, die schließlich dazu führen, dass ein Erdbeben endet und der Bruch zum Stillstand kommt, sind nach wie vor Gegenstand aktueller Forschung. Während man Region und maximal zu erwartende Magnitude zukünftiger Erdbeben abschätzen kann, ist eine Voraussage des Zeitpunkts, der genauen Lokation und der aktuellen Magnitude eines Erdbebens bisher jedoch nicht möglich.

Durch eine Vielzahl von Beobachtungen im Feld und im Labor, sowie durch neue Messtechnik und Analyseverfahren

verfügen die Geowissenschaften heute über ein detailliertes, aber noch unvollständiges Bild von dem, was unmittelbar vor und während eines Erdbebens geschieht. Die grundlegenden physikalischen und mechanischen Zusammenhänge, die bei der Entstehung und Ausbreitung von Beben eine Rolle spielen, sind inzwischen bekannt. Da aber Erdbeben in vielen Kilometern Tiefe entstehen, sind diese Prozesse nicht unmittelbar zugänglich. In den letzten Jahren wurden weltweit einige Forschungsbohrungen in aktive Erdbebenzonen erfolgreich durchgeführt. Hochauflösende seismologische Beobachtungen und eine Beprobung des Gesteins führten zu grundlegend neuen Erkenntnissen. Angesichts der hohen Bohrkosten, der begrenzten Bohrtiefe und der Komplexität der beteiligten Prozesse bleiben dies jedoch auf absehbare Zeit nur räumlich-zeitlich punktuelle Stichbeprobungen.

Die Seismologie nutzt daher Modelle, um die Bruchvorgänge in der Tiefe zu simulieren. Die Modelle basieren auf indirekten seismologischen Aufzeichnungen, die z. B. Informationen zum Verlauf eines Bruchs in der Tiefe beinhalten, und auf satellitengestützten geodätischen Beobachtungen der Geländedeformation während eines Bebens. Diese Daten werden durch experimentelle Laborstudien ergänzt, in denen Bruchprozesse unter kontrollierten Randbedingungen an Gesteinsproben nachgestellt und untersucht werden. Dies ist möglich, weil sich auf der räumlichen Skala Bruchprozesse innerhalb einer großen Bandbreite ähneln, d. h. manche Eigenschaften sind skaleninvariant. Daher weist ein starkes Erdbeben viele Gemeinsamkeiten mit einem Gesteinsriss in einem Bergbauschacht oder mit einer im Labor deformierten Gesteinsprobe auf (Abb. 1). Diese Skaleninvarianz erlaubt es, sich die Erde *quasi* ins Labor zu holen und die Erdbebenprozesse durch gezielte, kontrollierte Deformationsexperimente bei gleichzeitiger hochgenauer akustischer Überwachung nachzubilden und dort, wo es möglich ist, die Erkenntnisse auf den Feldmaßstab hochzuskalieren. Der Schwerpunkt der hier vorgestellten Forschungsarbeiten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ liegt daher auf einem verbesserten Verständnis des Erdbebenprozesses durch Analyse von Bruchprozessen auf verschiedenen räumlichen Skalen.

Die während eines Erdbebens freigesetzte seismische Energie wird Charles. F. Richter und Benno Gutenberg folgend als Erdbeben-Magnitude angegeben (Richter, 1935). Die Magnitude leitet sich aus dem Logarithmus der maximalen Amplitude im gemessenen Seismogramm ab, mit der ein kurzperiodisches Standardseismometer ein Beben in einer definierten Entfernung zum Epizentrum aufzeichnen würde. Ein Punkt mehr auf der sogenannten Richterskala bedeutet demnach eine etwa 10-fach höhere Amplitude im Seismogramm und damit die 32-fache Energiefreisetzung. Daraus leitet sich ab, dass relativ kleine numerische Unterschiede in der Richterskala sehr

*Links: Neuseeland, nördlicher Teil der Südinsel. Die Grenze zwischen der Schneedecke in den Südalpen und der Vegetation entlang der Nordwestküste markiert die Alpine Fault, eine Verwerfungszone, an der ein starkes Erdbeben bevorsteht. (Bild: NASA)*

*Left: South Island, northern part, New Zealand. The bright white snow contrasts sharply with the deep green vegetation of the coastal areas reflecting the Alpine fault that is expected to have a large earthquake in the future*



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

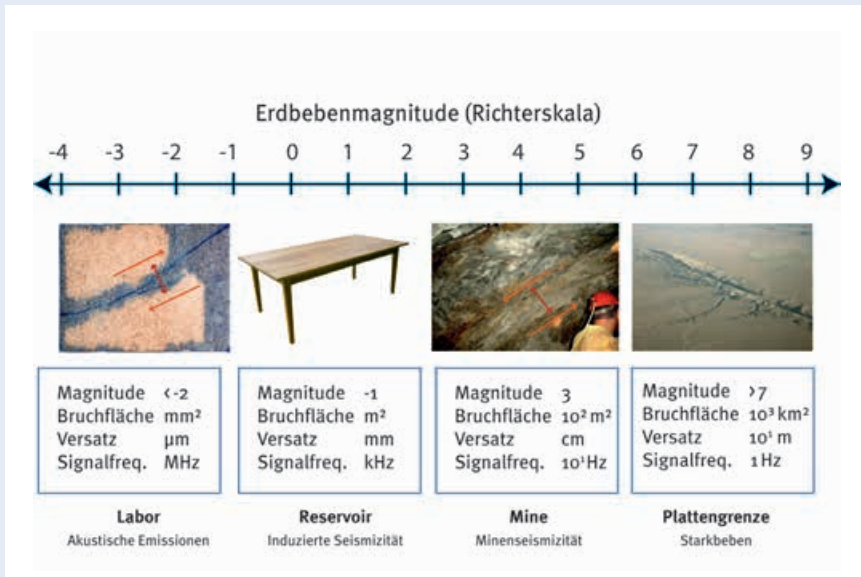


Abb. 1: Die Magnituden-Richterskala als logarithmisches Maß für die während eines Bruchprozesses freigesetzte Energie. Die vier Beispiele verdeutlichen Bruchprozesse auf verschiedenen Skalen mit Angaben zu den Schlüsselparametern Magnitude, Bruchfläche, Versatz während der Aktivierung und der jeweils dominierenden Signalfrequenz im seismischen Fernfeld. Da es sich bei der Richterskala um ein logarithmisches Maß handelt, existieren auch Brüche mit negativen Magnitudenwerten. (Fotos: links: GFZ; links Mitte: Dan Olson; rechts Mitte: GFZ; rechts: David K. Lynch, <http://www.sanandreasfault.org>)

Fig. 1: Richter scale for earthquake magnitudes over a broad range. The four examples refer to rupture processes from different scales with values for the source parameters magnitude, rupture surface, coseismic slip and signal frequency in the seismic far field. Since the Richter scale is logarithmic also negative magnitudes exist.

große Unterschiede in der freigesetzten Energie bedeuten. So entspricht etwa ein Erdbeben der Magnitude -1 der Energie, die bei einer Verschiebung von zwei Flächen der Größe einer Tischplatte um wenige Millimeter freigesetzt wird; in etwa mit dem Zerschlagen eines handgroßen Steins vergleichbar. Ein Erdbeben der Magnitude 4,5 (das entspricht etwa der Gesamtenergie eines durchschnittlichen Tornados) ist stark genug, um unabhängig vom Ort seines Auftretens auf der Erde vom weltweiten Seismometernetz erfasst und lokalisiert zu werden. Ein Erdbeben der Magnitude ~9 (z. B. vor Japan 2011 oder Sumatra/Indonesien 2004) schließlich entspricht einem Äquivalent von 32 Mrd. t TNT-Sprengstoff, also der mehr als tausendfachen Energie einer großen Wasserstoffbombe. Abbildung 1 verdeutlicht schematisch den Zusammenhang der zugrundeliegenden Größenordnungen relevanter Bruch- und Erdbebenparameter.

### Erdbebenhäufigkeit: Je kleiner desto mehr

Die größten Bruchprozesse treten an tektonischen Plattengrenzen auf. Dabei werden wie beschrieben Magnituden von bis zu 8 (Transformstörungen) oder sogar 9 (Subduktionszonen) erreicht. Solche Starkbeben sind durch die fortdauernde Aufladung und Entladung von Spannung durch die Bewegungen der Kontinentalplatten wiederkehrende Phänomene, wobei die Wiederkehrperiode ähnlicher Beben an gleicher Stelle vor allem von der relativen Plattengeschwindigkeit abhängig ist und bis zu mehrere Jahrhunderte lang sein kann. Der bisherige Zeitraum der instrumentellen Seismologie von etwas mehr als hundert Jahren reicht also nicht aus, um durch Mehrfachmessungen an gleicher Stelle das seismische Gefährdungspotenzial sicher bestimmen zu können.

Je größer ein Erdbeben ist, desto seltener tritt es auf. Dieses Naturgesetz, nach seinen Entdeckern Gutenberg-Richter-Relation genannt, besagt, dass pro Größenordnung hin zu kleineren Magnituden etwa zehn Mal mehr Beben auftreten. Im zeitlichen und räumlichen Umfeld eines Erdbebens der Magnitude 8 treten also etwa 100 000 (10<sup>5</sup>) Beben der Magnitude 3 auf und 10<sup>9</sup> Beben der Magnitude -1. Daraus folgt implizit, dass die Erfassung kleinerer Beben eine höhere Anzahl an Ereignissen und damit eine größere Messreihe und bessere statistische Grundlage für eine Modellbeschreibung oder die Ableitung von Skalierungsrelationen ergibt (Kwiatak et al., 2011; Bohnhoff et al., 2013). Diesem Phänomen folgend lässt sich aus Hypozentrenkatalogen verschiedener Erdbebenarten der sogenannte b-Wert berechnen, der sich aus der Steigung der Magnitudenhäufigkeitsverteilung ergibt. Der b-Wert ist – abgesehen von leichten Variationen, die z. B. als Fieberthermometer für den Spannungszustand an kritischen Erdbebenzonen dienen können – im globalen Mittel wie auch individuell für einzelne Erdbebenarten etwa 1 (Abb. 2).

### Menschengemachte Erdbeben?

Die größten *in-situ* beobachtbaren Bruchprozesse treten in Minen auf und erreichen typischerweise Magnituden um 4. Eine Ausnahme bilden die Goldminen in Südafrika, wo der Bergbau in mehr als 3 km Tiefe direkt bis in eine krustale Störungszone vorgedrungen ist und Magnituden >5 erreicht werden. Dort gelang durch speziell entwickelte akustische Untertage-Monitoringnetze die Erfassung von Mindestmagnituden bis zu -4, was eine Analyse von Bruchprozessen über außergewöhnliche neun Größenordnungen erlaubt (Kwiatak et al., 2011). Die Seismizität

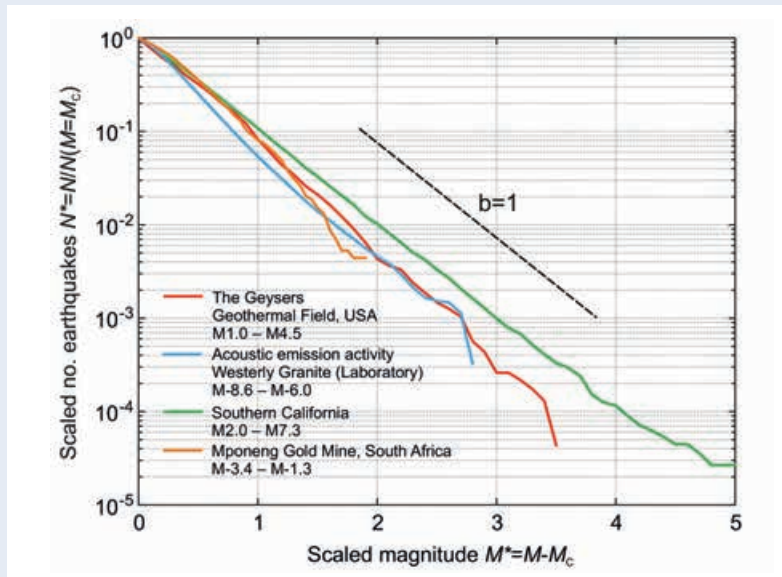


Abb. 2: Erdbebenhäufigkeitsverteilung für akustische Emissionen aus Laborversuchen (GFZ-Sektion 4.2), Minenseismizität (Kwiatek et al., 2011), induzierte Seismizität in Reservoiren (Kwiatek et al., 2015) und Erdbeben in Kalifornien (Hauksson et al., 2012). Für alle Datensätze ist das Verhältnis von größeren zu kleineren Magnituden, der sogenannte seismische  $b$ -Wert, vergleichbar mit Werten um 1.

Fig. 2: Magnitude-frequency distribution for acoustic emission data from laboratory tests (GFZ-section 4.2), seismicity in Gold mines (Kwiatek et al., 2011), induced seismicity in reservoirs (Kwiatek et al., 2015) and natural seismicity in California (Hauksson et al., 2012). The relation between larger and smaller events, the  $b$ -value, is similar for all data sets with values around 1.

im Zusammenhang mit Bergbauaktivität wird dem Bereich „anthropogene“ oder induzierte Seismizität zugeordnet. Durch den Abbaubetrieb unter Tage werden Spannungsumlagerungen im umgebenden Gebirge erzeugt, die sowohl Bergschläge als auch Erdbeben im direkten Umfeld der Stollen auslösen können.

Abgesehen vom Bergbau tritt der Begriff induzierte Seismizität in der öffentlichen Wahrnehmung im Wesentlichen im Zusammenhang mit der Stimulation von geologischen Reservoiren auf. Dabei werden bei der Prospektion und Exploration durch das Einpressen von Fluiden unter Hochdruck in tiefe geothermische Reservoire, Öl- und Gaslagerstätten oder Schiefergasvorkommen unterschiedliche Ziele verfolgt: Meist dienen diese Aktivitäten der Erhöhung der Gesteinspermeabilität im Reservoirgestein (Reservoirstimulation, Fracking) oder der Aufrechterhaltung von Reservoirdrücken nach langjähriger Förderung (Enhanced Oil/Gas Recovery). Auch diese Prozesse führen zu Veränderungen im lokalen Spannungsfeld des Reservoirs bzw. in seiner unmittelbaren Umgebung. So kann bereits durch kleine Spannungsperturbationen im Gestein auf vorher vorhandenen Bruchflächen gespeicherte Energie in Form von Scherspannung vorzeitig durch induzierte Erdbeben freigesetzt werden. Durch diese Eingriffe wird also *quasi* die seismische Uhr vorgestellt und es werden seismische Ereignisse ausgelöst, die früher oder später ohnehin aufgetreten wären. Die Magnituden dieser Beben liegen meist unterhalb der Spürbarkeitsgrenze ( $M \sim 2$ ) oder sogar unterhalb der instrumentellen Detektionsschwelle ( $M \sim 0$  an der Erdoberfläche). Dennoch kommt es in Einzelfällen zu induzierten Erdbeben, die in aller Regel zwar kein substantielles seismisches Gefährdungspotenzial aufweisen, jedoch in den letzten Jahren zu

verstärkten Forschungsaktivitäten geführt haben mit dem Ziel, diese Prozesse zu verstehen und wenn möglich, das Auftreten induzierter Seismizität vermeiden zu können.

## Erdbeben im Labor

Zur Analyse von Bruch- und Reibungsprozessen können Laborversuche durchgeführt werden, bei denen sich die in der Erde herrschenden Randbedingungen teilweise nachstellen und kontrollieren lassen. Bei der Belastung von Gesteinsproben in einer Druckkammer entsteht Risswachstum, und es kommt zur Abstrahlung akustischer Emissionen. Dies sind hochfrequente elastische Wellen, die aufgezeichnet und deren Ursprungsort bestimmt werden kann. Mit diesem in der Materialforschung inzwischen weit verbreiteten Prüfverfahren ist eine detaillierte *In-situ*-Beschreibung des Bruch- und Reibungsvorgangs im Labor möglich (Goebel et al., 2012). Zur Erfassung dieser „Laborerdbebenwellen“ werden piezokeramische Sensoren direkt auf der Oberfläche der Gesteinsprobe angebracht (Abb. 3). Die eintreffenden elastischen Wellen werden in elektrische Signale umgewandelt, verstärkt und in einem Mehrkanal-Transientenrekorder gespeichert. Im Gegensatz zur Erfassung der seismischen Wellen von natürlichen Erdbeben (Abstrakte im Bereich bis einige hundert Hertz) erstreckt sich der Frequenzbereich akustischer Emissionen bis in den Megahertz-Bereich. Es werden also an jedem Sensor pro Sekunde Millionen Amplitudenmesswerte erfasst. Bei einem einzigen Bruchexperiment können Tausende bis Zehntausende von Laborerdbeben aufgezeichnet werden, die Magnituden in der Größenordnung von  $-5$  und kleiner haben

können (Abb.4). Die Auswertung derartig großer Datenmengen erfordert vollautomatisierte Verfahren zur Prozessierung, Ortung und Charakterisierung der Signale.

In einer Reihe von Laborstudien konnten fundamentale Beobachtungen zur Entstehung und Ausbreitung von Scherbrüchen gemacht werden. Die Experimente zeigen generell eine gute Übereinstimmung zwischen der Hypozentrenverteilung der akustischen Emissionen und der Struktur der erzeugten oder aktivierten Scherbrüche. Es ist bekannt, dass Scherbrüche im intakten Gestein oder entlang von Brüchen in Nukleationszonen (asperities) entstehen und sich kaskadenartig ausbreiten können. Räumliche und zeitliche Veränderungen in der Magnituden-Häufigkeitsverteilung der akustischen Emission zeigen systematische Trends über den Bruchverlauf, die Rückschlüsse auf das Spannungsfeld und den Schädigungsgrad an Scherzonen der Kontinentalplatten ermöglichen. Moderne Verfahren der Signalanalyse erlauben die Unterscheidung verschiedener Herdprozesse der akustischen Emissionen, die sich z.B. Zug- oder Scherrissen zuweisen lassen. Die dabei entstehenden charakteristischen Verteilungsmuster liefern zudem Hinweise auf den komplexen Zusammenhang zwischen Bruchausbreitung und Gesteinsart. Diese Beobachtungen aus dem Labor können auf vergleichbare seismologische Messungen in Reservoiren und an Plattengrenzen übertragen werden und liefern Hinweise auf grundlegende mechanische und physikalische Prozesse.

Die hier vorgestellten Studien und Beispiele zeigen, dass Bruchprozesse und Erdbeben über sehr unterschiedliche Ska-

lenlängen Gemeinsamkeiten aufweisen, die es erlauben, die empirischen Beobachtungen aus verschiedenen Bereichen zu einheitlichen Modellen der dynamischen Bruchentstehung zusammenzuführen. Dabei reicht die beobachtete Skaleninvarianz über die gesamte erfasste Bandbreite von akustischen Emissionen im Labor bis hin zu Starkbeben entlang von tektonischen Plattengrenzen. Für den Bruchprozess lässt sich dies anschaulich durch Auftragen des während des Bruchs erfolgten Spannungsabfalls (stress drop) darstellen (Abb.4). Dieser Wert weist zwar innerhalb einzelner Datensätze typischerweise Schwankungen um wenige Größenordnungen (hundertstel bis zehner MPa) auf. Diese Schwankungen und deren Mittelwert sind jedoch für alle beobachteten Größenordnungen von Bruchprozessen gleich. Die entlang der Achsen aufgetragenen Bruchparameter seismisches Moment (Maß für Energie, vgl. die parallel gezeigte Richterskala mit umgerechneter Magnitude), Bruchflächengröße, co-seismischer Scherversatz und Signalfrequenz der abgestrahlten elastischen Wellen sind im logarithmischen Maßstab angegeben und erstrecken sich über bis zu 24 Größenordnungen.

## Ausblick

Die oben ausgeführten Beispiele fokussieren auf Sprödbrüche und die zugehörigen Parameter. An der Entstehung von Erdbeben an Plattengrenzen oder auch auf der Reservoirskala können neben den beschriebenen dynamischen Bruchprozessen jedoch noch weitere Verformungsmechanismen beteiligt

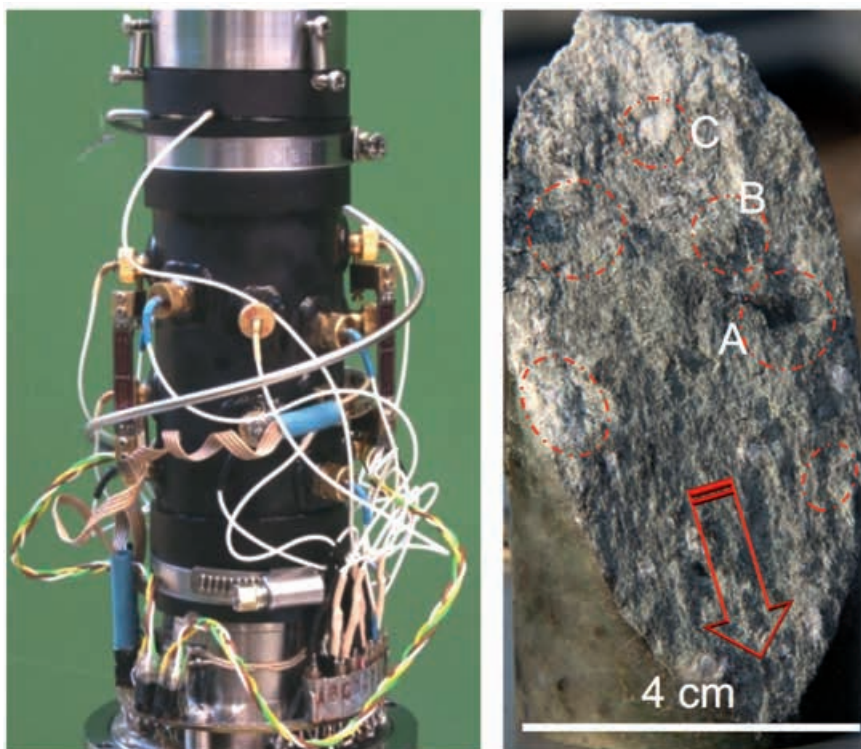


Abb. 3: Links: Messaufbau für Gesteinsdeformationsexperimente im Labor. Der Messzylinder beinhaltet die Gesteinsprobe samt Piezosensoren und wird in einer Hochdruckkammer bis an die Festigkeitsgrenze belastet. Rechts: Gesteinsprobe nach dem Experiment. Rote Bereiche markieren Zonen erhöhter seismischer Aktivität, denen eine zentrale Rolle beim Nukleationsprozess von Erdbeben zukommt. Der Pfeil markiert die Bewegungsrichtung während des Bruchs. (Fotos: GFZ)

Fig. 3: Left: Experimental setup with the rock specimen embedded in rubber sleeve clamped to steel endcaps and piezosensors glued onto the specimen to monitor acoustic emissions (AE) during rock-deformation experiments in the laboratory. Right: Ruptured specimen after the experiment. Red areas are zones of elevated AE activity and indicate asperities on the rupture surface that play a fundamental role for rupture nucleation. The arrow indicates the slip direction during failure.

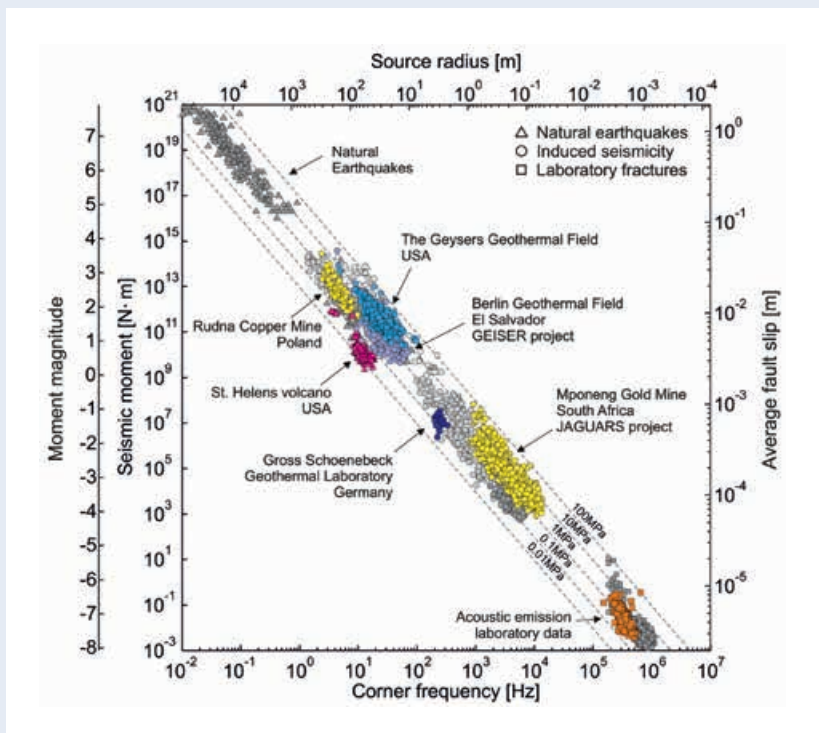


Abb. 4: Co-seismischer Spannungsabfall gemessen in Megapascal (MPa) für unterschiedliche Größenordnungen von Bruchprozessen. Die Bandbreite erstreckt sich von natürlicher Seismizität (nach Leonhard, 2010) über Minen- und Reservoir-induzierte Seismizität (Kwiatek et al., 2011; 2015), Seismizität an Vulkanen (Harrington et al., 2015) bis hin zu akustischen Emissionen in Laborexperimenten (GFZ-Sektion 4.2).

Fig. 4: Coseismic stress drop plotted with key earthquake source parameters over the entire bandwidth of observed rupture processes extending from acoustic emissions in the laboratory to large natural earthquakes. Individual data sets shown here are natural earthquakes (after Leonard, 2010), induced seismicity in mines and reservoirs (Kwiatek et al., 2011; 2015), volcano seismicity (Harrington et al., 2015). Acoustic emission data are unpublished results from the rock-deformation laboratory in GFZ-Section 4.2.

sein. So sind im Verlauf der vergangenen zehn Jahre erstmalig so genannte „slow earthquakes“ beobachtet worden: langsame, aber zeitlich distinkte Schervorgänge, die ihre Energie im Verlauf von Stunden bis Monaten freisetzen. Die zugrunde liegenden Mechanismen und ihre mögliche Rolle und Bedeutung bei der Entstehung von Brüchen und Erdbeben ist noch wenig erforscht, auch existieren Erkenntnislücken in Bezug auf die Zeiträume zwischen den magnitudenstarken Beben. Hierzu wird es in Zukunft nötig sein, die gesamte Prozesskette innerhalb des seismischen Zyklus zu analysieren. Eine verbesserte Abschätzung der seismischen Gefährdung bei Starkbeben kann dazu beitragen, die Georisiken solcher Naturgefahren zu reduzieren.

## Literatur

- Bohnhoff, M., Dresen, G., Ellsworth, W. L., Ito, H. (2010): Passive Seismic Monitoring of Natural and Induced Earthquakes: Case Studies, Future Directions and Socio-Economic Relevance. - In: Cloetingh, S., Nengendank, J. (Eds.), *New Frontiers in Integrated Solid Earth Sciences*, (International Year of Planet Earth), Springer, pp. 261–285.
- Bohnhoff, M., Bulut, F., Dresen, G., Eken, T., Malin, P. E., Aktar, M. (2013): An earthquake gap south of Istanbul. - *Nature Communications*, 4, 1999.
- Goebel, T. H. W., Becker, T., Schorlemmer, D., Stanchits, S., Sammis, C., Rybacki, E., Dresen, G. (2012): Identifying fault heterogeneity through mapping, spatial anomalies in acoustic emission statistics. - *Journal of Geophysical Research*, 117, B03310.
- Harrington, R. M., Kwiatek, G., Moran, S. C. (2015): Self-similar rupture implied by scaling properties of volcanic earthquakes occurring during the 2004-2008 eruption of Mount St. Helens, Washington. - *Journal of Geophysical Research*, 120, 7, pp. 4966–4982.
- Hauksson, E., Yang, W., Shearer, P. M. (2012): Waveform Relocated Earthquake Catalog for Southern California (1981 to June 2011). - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102, 5, pp. 2239–2244.
- Kwiatek, G., Plenkens, K., Dresen, G. (2011): Source Parameters of Picoseismicity Recorded at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 6, pp. 2592–2608.
- Kwiatek, G., Martinez Garzon, P., Dresen, G., Bohnhoff, M., Sone, H., Hartline, C. (2015): Effects of long-term fluid injection on induced seismicity parameters and maximum magnitude in northwestern part of The Geysers geothermal field. - *Journal of Geophysical Research*, 120, 10, pp. 7085–7101.
- Leonard, M. (2010): Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 5A, pp. 1971–1988.
- Reid, H. F. (1910): The mechanics of the earthquake, (The California earthquake of April 18, 1906: report of the State earthquake investigation commission; in two volumes and atlas; 2), (Publication/Carnegie Institution of Washington; 87,2), Washington: Carnegie Institution, 192 p.
- Richter, C. F. (1935): An instrumental earthquake magnitude scale. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25, 1, pp. 1–32.

# Vom Flüstern, Raunen und Grollen der Landschaft

## Seismische Methoden in der Geomorphologie

Jens M. Turowski<sup>1</sup>, Michael Dietze<sup>1</sup>, Anne Schöpa<sup>1</sup>, Arnaud Burtin<sup>2</sup>, Niels Hovius<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> GFZ; jetzt: Institut de Physique du Globe de Paris, Frankreich

*The Earth's surface is constantly changing as material is redistributed by processes like slope failures, debris flows and floods. Although this is a natural part of landscape evolution, we perceive many of these processes as hazards. Especially during their extreme manifestations, they can cause significant damage and even injury and loss of life. The process understanding that is necessary for the safe keeping of the environment that we live in can be obtained by acute observation. Seismic measurements provide distinct advantages over traditional methods. Within a sensor network, many important processes at the Earth's surface can be observed and identified, along with their meteorological drivers. Further, seismic networks make it possible to monitor the entire landscape without the need of a prior choice of location. In this way, nearly complete event catalogues can be obtained and the interaction of different processes can be studied. The potential of seismic observations of Earth surface processes is illustrated with an example from the Illgraben, Switzerland. There, a two-way interaction between rock slope failures and debris flows was observed during a summer thunderstorm.*





## Das dynamische System Erdoberfläche

Die Erdoberfläche verändert sich ständig durch eine Vielzahl von Geoprozessen wie Steinschläge, Erdbeben, Murgänge, Bergstürze und Sedimenttransport durch Flüsse. Die Geomorphologie erforscht diese Prozesse und die Entwicklung der gesamten Landschaft. Die verschiedenen Erdoberflächenprozesse können große Schäden anrichten, vor allem wenn sie in extremen Formen auftreten. Daher werden sie oft als Naturgefahren wahrgenommen. Auch sind Erdoberflächenprozesse nicht unabhängig voneinander, sondern beeinflussen sich gegenseitig. Zum Beispiel kann ein Fluss seine Ufer unterspülen und dadurch Erdbeben auslösen, die große Mengen an Material in das Gerinne liefern. So kann sich der Fluss aufstauen; Überschwemmungen sind möglich. Für eine sichere und nachhaltige Nutzung der Landschaft ist es deshalb erforderlich, unterschiedliche Erdoberflächenprozesse und ihre Wechselbeziehungen umfassend zu verstehen und soweit möglich zu quantifizieren.

Prozesskenntnis wird durch intensive Beobachtung entwickelt. Es kann jedoch aufwendig sein, geomorphologische Prozesse direkt zu beobachten. Die Landschaft ist während seltener, extremer Wetterereignisse am aktivsten und es ist schwierig oder sogar gefährlich, direkte Messungen vorzunehmen. Oft kann zudem nicht genau vorhergesagt werden, wann und wo Erdoberflächenprozesse auftreten. Nur mit Geduld und Glück ist es möglich, zur rechten Zeit am rechten Ort zu sein und diese Prozesse mit entsprechenden Instrumenten aufzuzeichnen. Die Entwicklung von Methoden, mit denen eine Vielzahl von Erdoberflächenprozessen in einem großen Gebiet automatisch, flächendeckend und kontinuierlich beobachtet werden kann, ist aktuell eine der großen Herausforderungen in der Geomorphologie. Deshalb entwickeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ seismische Methoden für die Anwendung in der Geomorphologie.

*Links: Blick in den Illgraben, ein Seitental des Rhône-tals im Süden der Schweiz. Steile, unbewachsene Hänge und brüchiges Gestein führen dort zu häufigen Steinlawinen. Murgänge transportieren dieses Material stromabwärts und liefern etwa 10 % des gesamten Sedimentaufkommens der Rhône. (Foto: K. Cook, GFZ)*

*Left: View of the Illgraben, a tributary of the Rhône in southern Switzerland. Steep, unvegetated slopes and fractured rocks lead to frequent rock falls. Debris flows evacuate the material and supply around 10 % of the total sediment load of the Rhône river.*



**Kontakt:** J. M. Turowski  
(jens.turowski@gfz-potsdam.de)

## Seismische Signale von der Erdoberfläche

Massenverlagerungen durch geomorphologische Prozesse lösen seismische Wellen aus, die, je nach Intensität, in Distanzen von einigen Metern bis zu vielen hundert Kilometern mit gängigen seismischen Instrumenten aufgezeichnet werden können. Seismometer sind somit ideal geeignet, das Flüstern, Raunen und Grollen der Landschaft aufzunehmen. Ein einfaches Experiment, in dem zwei Steine verschiedenen Gewichts (35,9 kg und 7,2 kg) aus 1 m Höhe auf den Boden fallengelassen wurden, illustriert das Potenzial moderner Seismometer (Abb. 1). Die Signale wurden von einem Breitbandseismometer aufgezeichnet, das 5 m entfernt vom Aufschlagpunkt in 50 cm Tiefe vergraben wurde. Die Daten erlauben zwei Aussagen: Das Signal, das der größere Stein ausgelöst hat, zeigt eine höhere Amplitude und eine tiefere Frequenz im Vergleich zu dem Signal, das der kleinere Stein ausgelöst hat.

Aufgrund dieser Beobachtungen kann erwartet werden, dass seismische Signale Informationen über Ort, Zeit, Art und Größe des Auftretens von geomorphologischen Prozessen enthalten. Tatsächlich werden seismische und auch akustische Methoden routinemäßig zur Beobachtung von Schneelawinen (Suriñach et al., 2000) sowie von Sedimenttransport in Flüssen verwendet (Gray et al., 2010) und sind häufig Bestandteil von Warnanlagen für Naturgefahren (Badoux et al., 2009). Jedoch sind diese Anwendungen auf bestimmte Prozesse an einem bestimmten Ort ausgerichtet. Dabei wird der seismische Sensor an einer Stelle verbaut, die direkt von dem entsprechenden Prozess betroffen ist, z. B. unmittelbar im Flussbett. Häufig wird der Sensor auch bestmöglich akustisch isoliert, damit nur der gewünschte Prozess aufgezeichnet und Rauschen aus umliegenden Quellen unterdrückt wird. Auf diese Weise lässt sich zwar die Beobachtung des gewünschten Prozesses optimieren, die Möglichkeiten der seismischen Methoden werden jedoch nicht vollständig ausgeschöpft.

Ein Netzwerk von in der Landschaft verteilten Seismometern hat dagegen ein sehr viel größeres Potenzial. Da zahlreiche geomorphologische Prozesse messbare seismische Wellen auslösen, kann mit einem solchen Netzwerk im Prinzip die gesamte Aktivität der Landschaft beobachtet werden. Triangulierung erlaubt es, den Ursprungsort des Signals zu lokalisieren. Dies bietet einen entscheidenden Vorteil: Seismische Netzwerke sind die momentan einzige bekannte Messtechnik in der Geomorphologie, die zeitlich hoch aufgelöst alle Prozesse, die Geräusche verursachen, in der gesamten Landschaft aufzeichnen kann. Damit ist es erstmals möglich, nahezu komplette räumlich und zeitlich aufgelöste Ereigniskataloge zu erstellen und die Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Prozessen zu untersuchen.

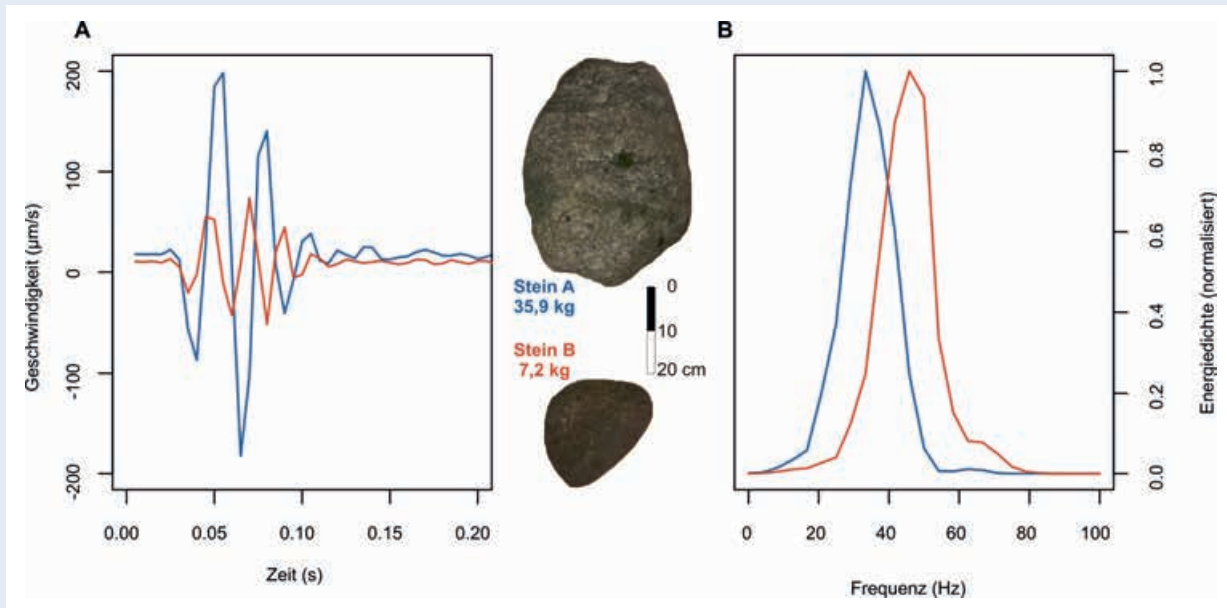


Abb. 1: Zwei unterschiedlich große Steine wurden aus 1 m Höhe auf den Boden fallengelassen. Das Signal, das durch den größeren Stein ausgelöst wurde, zeigt eine höhere Amplitude (A) und eine tiefere Frequenz (B).

Fig. 1: Two rocks of different size were dropped to the ground from a height of 1 m. The signal of the bigger rock shows a higher amplitude (A) and a lower frequency (B).

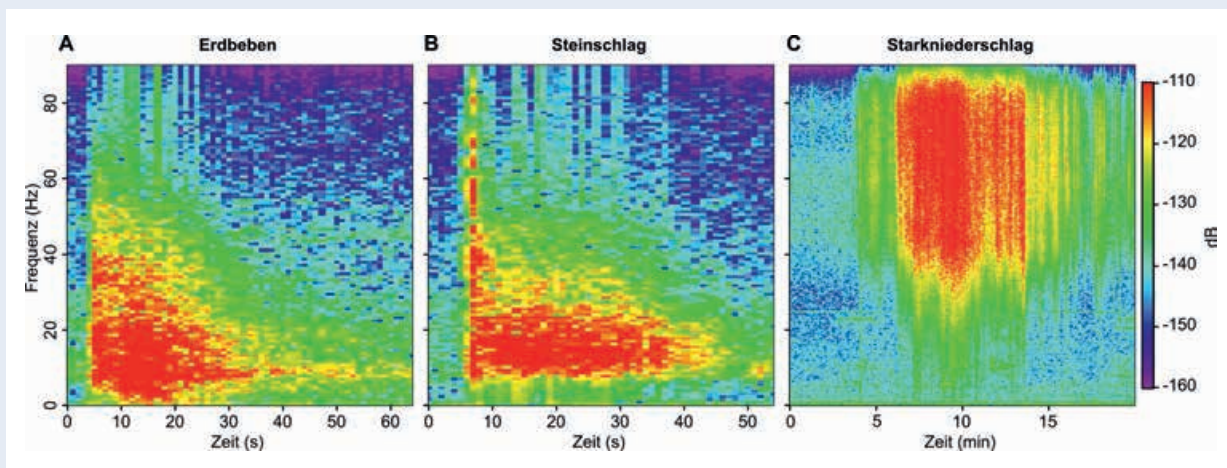


Abb. 2: Spektrogramme verschiedener seismischer Ereignisse. A: Erdbeben, B: Steinschlag, C: Starkniederschlag

Fig. 2: Spectrograms of different seismic events. A: Earthquake, B: Rockfall, C: Heavy precipitation

Für eine Interpretation der Daten ist es jedoch notwendig, allein anhand des Signals die verschiedenen geomorphologischen Prozesse voneinander und von anderen seismischen Quellen, wie Erdbeben und menschlicher Aktivität, unterscheiden zu können. Abbildung 2 zeigt eine Auswahl seismischer Signale sehr unterschiedlichen Ursprungs als sogenannte Spektrogramme, also als die Veränderung der seismischen Energie über die Zeit in verschiedenen Frequenzbereichen. Ein Erdbeben (Abb. 2A) unterscheidet sich erst auf den zweiten Blick klar von einem Steinschlag (Abb. 2B) durch das Vorhandensein sehr tiefer Frequenzen, das Fehlen der hohen Frequenzen zu Beginn und die typisch dreieckige Form des Spektrogramms. Die hohe Aktivität am Anfang des Steinschlagereignisses (Abb. 2B) in allen Frequenzen zwischen 10 Hz und 80 Hz resultiert vom ersten Einschlag der Felsmasse, während die daran anschließende Aktivität vom Rollen und Stürzen der Steine auf der Schutthalde herrührt. Ein Starkniederschlagsereignis erzeugt aus seismischer Sicht vor allem hohe Frequenzen ( $>30$  Hz) über mehrere Minuten (Abb. 2C).

### Ein Murgang, sein Auslöser und seine Folgen: Ein Beispiel vom Illgraben, Schweiz

Der Illgraben ist ein 10 km<sup>2</sup> großes Nebental des Rhônetales im Kanton Wallis im Süden der Schweiz (Abb. 3). Steile Hänge und brüchiges Gestein führen dort zu regelmäßigen Murgängen (*Schlunegger et al., 2012*). Murgänge sind Schlamm- und Gerölllawinen, die mit hoher Geschwindigkeit große Mengen an Gestein durch das Gerinne schieben. Am 13. Juli 2011 lieferte ein Sommergewitter im Illgraben insgesamt 18 mm Nieder-



Abb. 3: Der Illbach führt wenig Wasser, aber Murgänge transportieren mehrmals im Jahr große Mengen Gestein in die Rhône. (Foto: J. Turowski, GFZ)

Fig. 3: The Illbach has a low water discharge, but its channel conveys debris flows several times a year, transporting large quantities of sediment into the Rhône.

schlag und löste eine Reihe geomorphologischer Prozesse einschließlich mehrerer Murgänge aus. Diese Ereignisse wurden mit einem aus zehn Instrumenten bestehenden seismischen Netzwerk aufgezeichnet (*Burtin et al., 2014*) und sollen im Folgenden als Beispiel dienen, die Möglichkeiten dieser Messmethodik zu erläutern.

Im Verlauf des 13. Juli 2011 zeigen die Sensordaten hochfrequente seismische Signale, die mit den Niederschlagsmessungen korrespondieren (Abb. 4). Die Periode höchster seismischer Aktivität beginnt um 14:45 Uhr Ortszeit zeitgleich mit dem Sommergewitter. Im Laufe des Nachmittags können mehrere Episoden mit hoher seismischer Aktivität beobachtet werden, die die Signaturen geomorphologischer Prozesse tragen. So gibt es mehrere Ereignisse mit der Signatur von Steinlawinen, die über die gesamte Dauer des Gewitters auftreten. Die Signatur von Murgangaktivität findet sich ab 14:57 Uhr in den seismischen Daten.

An allen seismischen Messstationen im Illgraben zeigen sich während des Gewitters drei separate Pulse von mehreren Minuten Länge, wobei der dritte Puls die größte Stärke aufweist (Abb. 4A). Die einzelnen Pulse erscheinen zeitversetzt an den Stationen; je weiter stromabwärts die Messstation liegt, desto später tritt die Aktivität auf (vgl. Abb. 4A und 4B). Dies weist auf eine sich stromabwärts bewegende Masse hin. Da diese seismischen Aktivitäten zeitlich mit dem Ansprechen der Murgangwarnanlage im Illgraben zusammenfallen, liegt es nahe, die drei Pulse in den seismischen Signalen als Murgangsequenz zu interpretieren.

Der dritte Murgangspuls zeigt höhere seismische Aktivität am unteren Ende des Gerinnes und aktiviert ein breites Frequenzspektrum zwischen 1 und 50 Hz. Bemerkenswert ist, dass der dritte Puls kurz nach einem Steinlawinenereignis am unteren Teil des Westhangs des hinteren Illgrabens einsetzt (Steinlawine S1 um 15:18 Uhr, Abb. 4C und 4D). Das Abbruchgebiet grenzt direkt an das Murganggerinne (Abb. 5) und etwa zweieinhalb Minuten nach der Steinlawine wurde ein markanter Anstieg in der Murgangaktivität aufgezeichnet. Diese Beobachtungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass das Steinlawinenereignis um 15:18 Uhr den dritten Murgangspuls ausgelöste.

Während der Bewegung des dritten Pulses durch das Gerinne erfassten mehrere Messstationen ein weiteres größeres Steinlawinenereignis in Gerinnenähe (Steinlawine S2 um 15:22 Uhr). Zeitgleich mit dieser Steinlawine steigerte sich die seismische Energie des Murgangsignals deutlich und nachhaltig (Abb. 4D). Der Hang ist offensichtlich als Folge der Murgangaktivität abgerutscht. Die plötzliche Zufuhr von Material ließ das Volumen des Murgangs und damit die seismische Energie des Signals ansteigen.

Durch die zeitlich hochaufgelösten Messungen der seismischen Sensoren und die Lokalisierung der geomorphologischen

Ereignisse im Einzugsgebiet war es möglich, für das Gewitter am 13. Juli 2011 eine zeitliche Abfolge der Einzelereignisse zu erstellen, die einen kausalen Zusammenhang nahelegen. So konnte eine Kopplung von Niederschlag, Steinlawinen und Murgängen dargelegt werden; eine Steinlawine kann sowohl zu einem Murgang führen, wie auch ein Murgang zu einer Steinlawine. Mit anderen Messmethoden wäre diese Ereignissequenz nur mit viel Glück und Aufwand zu verfolgen gewesen.

## Seismische Messungen als neuer Standard in der Geomorphologie

Die beschriebene seismische Messmethode hat großes Potenzial in der geomorphologischen Forschung. Als einzige momentan bekannte Methode kann sie Daten zur räumlichen wie zeitlichen Verteilung wichtiger Erdoberflächenprozesse liefern, die zur Verlagerung von Material führen. Mehr noch, auch Wetterereignisse hinterlassen als seismische Wellen ihre Spuren in der Landschaft. Zum Beispiel ist der Einschlag von Regentropfen in der Nähe der Instrumente gut messbar und

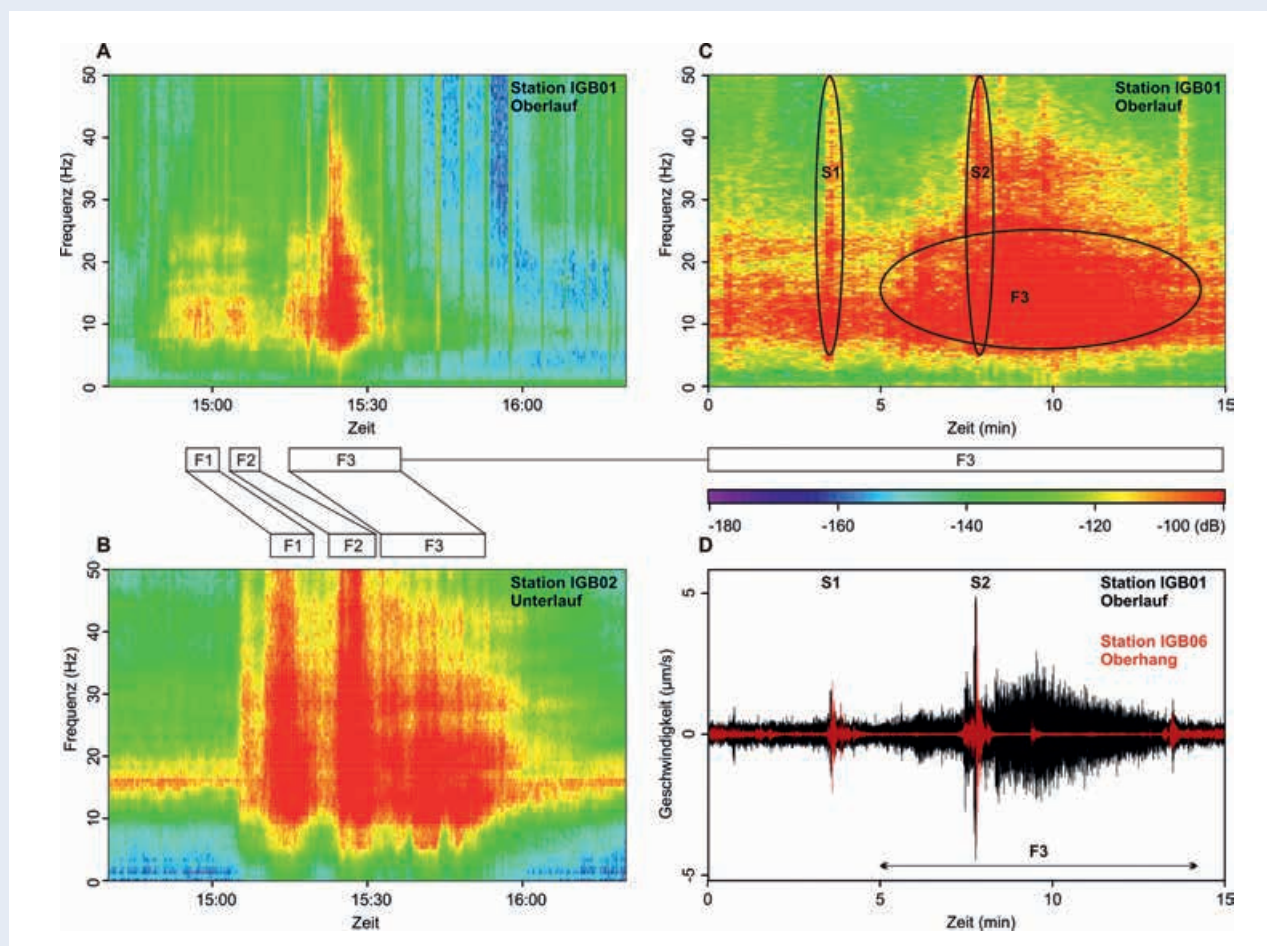


Abb. 4: Eine Murgangsequenz im Illgraben aus seismischer Sicht. Spektrogramme der drei Murgangspulse (F1 bis F3) von zwei Stationen entlang des Gerinnes am Oberlauf (A) und Unterlauf (B). Zwischen dem Eintreffen der einzelnen Pulse vergehen jeweils etwa 15 Minuten. C: Vergrößerter Ausschnitt des Spektrogramms des dritten Murgangs mit Signalen von zwei Steinlawinen (S1 und S2). D: Seismogramme des dritten Murgangs und der Steinlawinen von zwei Stationen (Stationsstandorte siehe Abb. 5)

Fig. 4: Debris flow sequence in the Illgraben from a seismic perspective. Spectrograms of three flow surges (F1 to F3) recorded by two stations along the channel upstream (A) and downstream (B). Arrivals of the surges are separated by ca. 15 minutes. C: Zoom into the spectrogram of the third debris surge with signals of two rock avalanches (S1 and S2). D: Seismograms of the third surge and two rock avalanches from two different seismic stations (see Fig. 5 for station locations)



Abb. 5: Wechselbeziehungen von Erdoberflächenprozessen im Illgraben, Schweiz. Steinlawineneignis  $S_1$  löst den dritten Murgangpuls aus, der sich im Gerinne stromabwärts bewegt (orange Pfeile). Durch Erosion des Ufers wird eine weitere Steinlawine,  $S_2$ , aktiviert. Seismometerstationen (weiße Kreise mit Stationsnummern IGB01 bis IGB10, nicht alle Stationen sind sichtbar) zeichnen diese Kette von Ereignissen auf und geben so Einblick in die Wechselwirkungen von Prozessen. (Foto: Google Earth)

Fig. 5: Interaction of Earth surface processes in the Illgraben, Switzerland. Rock avalanche  $S_1$  causes the third mudflow pulse that moves downstream (orange arrows). A second rock avalanche  $S_2$  is activated by erosion of the channel banks. Seismometer stations (white circles with station numbers IGB01 to IGB10, not all stations are visible) detect this sequence of events and give insight into the feedbacks between processes.

Windenergie wird durch Baumwurzeln als seismische Wellen in den Boden übertragen. Somit können nicht nur die geomorphologischen Prozesse, sondern auch die meteorologischen Bedingungen, die sie auslösen, mit denselben Instrumenten gemessen werden.

## Ausblick

Bevor der Einsatz seismischer Instrumente zum Standard in der geomorphologischen Forschung wird, ist noch viel Forschungsarbeit zu leisten. Obwohl bereits gezeigt wurde, dass geomorphologische Prozesse messbare seismische Signale erzeugen und dass die verschiedenen Prozesse anhand ihrer Signalcharakteristiken unterschieden werden können, fehlen für viele Prozesse und Anwendungen direkte Vergleichsdaten, die mit traditionellen Messmethoden parallel zu seismischen Daten erhoben wurden. Solche Vergleichsdaten sind z. B. wichtig, um theoretische Vorhersagen der seismischen Charakteristiken einzelner Prozesse zu testen und um die seismischen Analysemethoden umfassend zu validieren. Auch fehlt es an geeigneten Werkzeugen, welche die komplexen seismischen Daten und Auswertungsmethoden für die Geomorphologie leicht zugänglich machen. Nur mit der Unterstützung der Seismologie können seismische Messmethoden momentan gezielt, genau und effizient in der Geomorphologie eingesetzt werden.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des GFZ erstellen daher momentan eine Datenbank mit qualitativ hochwertigen, parallel aufgezeichneten seismischen und traditionellen Beob-

achtungen verschiedener geomorphologischer und meteorologischer Prozesse. Zudem entwickeln sie ein frei zugängliches Softwarepaket, das auf die Bedürfnisse der geomorphologischen Forschung zugeschnitten ist. Diese Arbeiten sollen einen breiten Einsatz seismischer Methoden in der Geomorphologie ermöglichen und somit dazu beitragen, dass geomorphologische Naturgefahren schnell erfasst und die Auswirkungen für Bevölkerung und Infrastruktur minimiert werden.

## Literatur

- Badoux, A., Graf, C., Rhyner, J., Kuntner, R., McArdell, B. W. (2009) : A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. – *Natural Hazards*, 49, 3, pp. 517–539.
- Burtin, A., Hovius, N., McArdell, B. W., Turowski, J., Vergne, J. (2014): Seismic constraints on dynamic links between geomorphic processes and routing of sediment in a steep mountain catchment. - *Earth Surface Dynamics*, 2, pp. 21–33.
- Gray, J. R., Laronne, J. B., Marr, J. D. G. (2010): Bedload-surrogate Monitoring Technologies, (Scientific Investigations Report/U.S. Geological Survey; 2010-5091), Reston, VA.: U. S. Geological Survey, 37 p.
- Schlunegger, F., Norton, K., Caduff, R. (2013): Hillslope processes in temperate environments. - In: Stoffel, M., Marston, R. A. (Eds.), *Mountain and hillslope geomorphology*, (Treatise on Geomorphology; 7), Amsterdam [u. a.]: Elsevier/Acad. Press, pp. 337–354.
- Suriñach, E., Sabot, F., Furdada, G., Vilaplana, J. M. (2000): Study of seismic signals of artificially released snow avalanches for monitoring purposes. - *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 25, 9, pp. 721–727.

# Vulkanseismologie – ein Blick ins Innere der Vulkane

*Torsten Dahm, Eleonora Rivalta, Thomas R. Walter, Sebastian Heimann, Birger-Gottfried Lühr, Philippe Jousset*  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Volcanic activity involves different processes on different scales at depth and at the surface. Many of them generate seismic signals, ranging from tiny, earthquake-like signals to increased continuous vibrations to significant ground motion events before and during volcanic eruptions. A range of modern tools of volcano seismology is nowadays used to monitor changes in the volcanic activity and volcanic unrest. Additionally, advanced seismology is able to image the deep volcanic structures at high resolution and to map the depth and size of magmatic reservoirs beneath volcanoes. Although seismology is a key technology for volcano research and the assessment of volcanic hazard, novel concepts of volcano monitoring combine seismology with different types of multi-parameter sensors to characterize the processes accompanying volcanic unrest. GFZ is developing advanced approaches for volcano monitoring and volcano modeling involving a broad scale of instruments and disciplines. The article focuses mainly on two examples from volcanoes in South America and Iceland showing how large magmatic reservoirs are slowly filled over periods of decades and abruptly depleted over periods of months during volcanic eruptions.*



Vulkanismus ist das Ergebnis einer Kette von Prozessen im Untergrund. Fluide bewegen sich in der Tiefe, Magmen werden gebildet und Spannungen können sich aufbauen, lange bevor sich an der Oberfläche eine Eruption manifestiert. Die Vulkanseismologie erlaubt Einblicke in die Tiefe, insbesondere durch die Registrierung von Bruchprozessen, Spannungsfeldbestimmungen und tomographische Abbildungsverfahren.

Nahezu jedes Vulkanobservatorium betreibt Seismometer und seismische Netze. Moderne Observatorien kombinieren ihre Seismometernetze mit einer Vielzahl unterschiedlicher Sensoren und Messverfahren und entwickeln bzw. verbessern fortlaufend ihre Auswerte- und Modellierungsverfahren. Die Seismologie spielt dabei eine wichtige Rolle, da sie eine der wenigen Disziplinen ist, die hochauflösende Abbildungen von geologischen Strukturen und Aktivitäten im Vulkaninnern ermöglichen, auch in Echtzeit und selbst aus sicherer Entfernung und unabhängig von den Witterungsbedingungen.

Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ wird die Vulkanseismologie in enger Verbindung zur Erdbebenseismologie weiterentwickelt. Neue Ansätze der Erdbebenforschung lassen sich auf Vulkane übertragen und umgekehrt. Die vielfältigen Signale, die an Vulkanen gemessen werden, sind häufig Anstoß und Motor für neue Entwicklungen und erweitern das Verständnis von Fluidprozessen im Erdinneren. Im Folgenden werden zwei Beispiele der seismologischen Forschung am GFZ vorgestellt, die den Zusammenhang zwischen der Entwicklung und Aktivität von Vulkanen und überregionalen Effekten verdeutlichen.

## Seismische Signale an Vulkanen

Im Vergleich zu tektonischen Erdbeben zeigen seismische Signale an Vulkanen eine vielfältigere und komplexere Charakteristik und werden durch verschiedene Quellmechanismen, die bis dicht unter die Erdoberfläche reichen, generiert. Neben klassischen „tektonischen“ Scherbrüchen unter Vulkanen findet man Signale, die durch Fluid- und Magmabewegungen, Kollapsereignisse im Untergrund, Geröll- und Schlammlawinen

und Einschläge vulkanischer Gesteinsbomben ausgelöst werden. Die gemessenen Signale sind sehr unterschiedlich und reichen von Seismogrammen mit langperiodischen (LP) und impulsiven Ausschlägen der Primär- (P-) und Sekundär- (S-)Wellen (vulkantektonische Erdbeben, VT), über hochkomplexe Multiphasensignale bis zu multi- und monofrequenten Tremorsignalen, die über Minuten bis Tage andauern können. LP-Signale und Tremore werden als Anzeichen für Fluid- und Magmenbewegung interpretiert (Jousset *et al.*, 2013). Allerdings trägt die heterogene Struktur eines Vulkans, der aus unterschiedlichen Lagen kompakter Laven, feinkörniger Aschen, Sanden und grobkörniger Block- und Geröllmaterialien besteht, zur Komplexität der Aufzeichnungen bei. Ein pulsartiges Signal wandelt sich innerhalb von wenigen hundert Metern Laufweg durch diese Lagen in ein zeitlich ausgedehntes Signal mit schwachen Ersteinsätzen um. Eine Klassifizierung der seismischen Signale an Vulkanen kann helfen, diese Daten zu interpretieren.

Dabei spricht jeder Vulkan seine eigene seismische Sprache. An dem Vulkan Galeras in Kolumbien treten z. B. vor einem Ausbruch nahezu monofrequente, schraubenförmige Signale mit abklingenden Amplituden, sogenannte Tornillos auf. Für die Klassifizierung und Einordnung solcher Signale müssen Vulkane über mehrere Jahre mit seismischen Überwachungsnetzen beobachtet werden. Klassifizierte Signale können wichtige Hinweise zum Aktivitätszustand eines Vulkans liefern, die in die Alarmstufen-Setzung einfließen und so zur Risikominderung beitragen. Komplexe Multiphasensignale aus geringer Tiefe an steilen Schichtvulkanen zeigen beispielsweise an, dass der Lavadom wächst und eventuell ein gefährlicher pyroklastischer Strom bevorsteht. Der Anstieg der Energie der kontinuierlichen Bodenbewegung wird häufig als Aktivitätsmaß an Vulkanen verwendet und dient u. a. zur Festlegung und Erweiterung von Evakuierungsbereichen (Jousset *et al.*, 2013).

Seismische Untersuchungen liefern zudem Informationen über den Unterbau eines Vulkans. So helfen z. B. groß angelegte Experimente, die seismischen Geschwindigkeiten abzubilden (Tomographie) und damit die Aufstiegszonen von Fluiden und die Einlagerung von partiellen Schmelzen in der Kruste zu lokalisieren. Die Geschwindigkeitserniedrigungen können in solchen Zonen bis zu 30 % betragen. Das Verhältnis von P- zu S-Wellengeschwindigkeiten erlaubt Abschätzungen zum Volumen fluider und gasförmiger Bestandteile im Gestein (Dahm und Fischer, 2014). Anhand tomographischer Methoden konnte für Vulkane wie den Merapi in Indonesien gezeigt werden, dass sich partielle Schmelzen von rund 100 km Tiefe bis nahe unter den Vulkan abbilden (Lühr *et al.*, 2013).

Links: Blick von Norden auf den Vulkan Lastarria am nördlichen Rand des Lazufre-Vulkankomplexes (Foto: T. R. Walter, GFZ)

Left: View from north on the Lastarria volcano at the northern tip of the Lazufre volcanic complex



Kontakt: T. Dahm  
(torsten.dahm@gfz-potsdam.de)

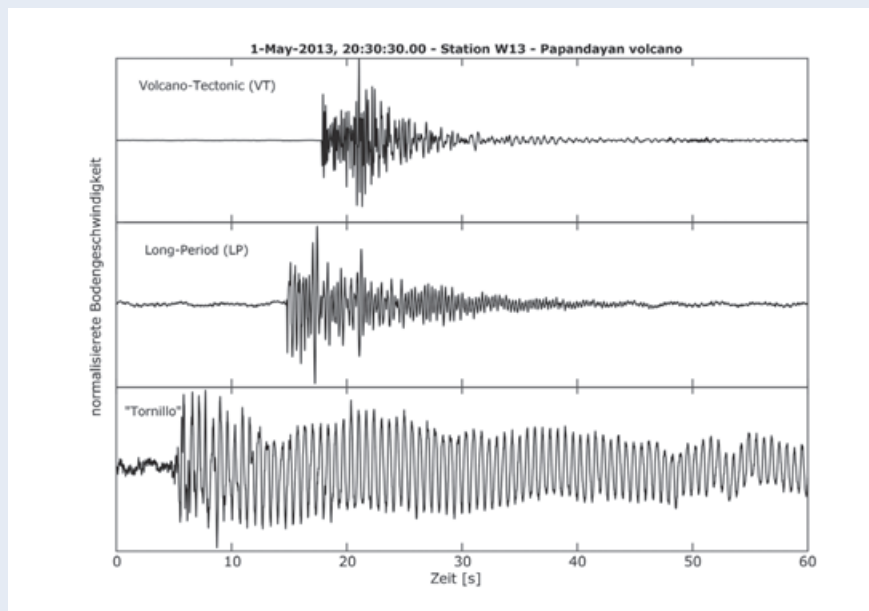


Abb. 1: Beispiele für Seismogramme von vulkantektonischen (VT) und lang-periodischen (LP) Ereignissen sowie eines tremorähnlichen Tornillo-Ereignisses am Vulkan Papandayan in Indonesien

Fig. 1: Seismogram examples of a volcano-tectonic (VT), a long-period (LP) and tremor-like Tornillo event at Papandayan volcano in Indonesia

## Riesige Magmakammern im Untergrund

In der Region des Lazufre-Vulkankomplexes an der chilenisch-argentinischen Grenze in den Anden zwischen den Vulkanen Lastarria (Abb. 2) im Norden und Cordon del Azufre im Süden wurde vor einigen Jahren durch Satellitendatenauswertungen eine gigantische Aufwölbung der Erdoberfläche entdeckt. Seit 1997 hat ein Gebiet von etwa 2000 km<sup>2</sup> begonnen, sich kontinuierlich mit einer Rate von etwa 3 cm/Jahr aufzuwölben (Abb. 3; vgl. auch Beitrag *Walter et al., System Erde (2011) 1, S. 30-35*). Die Ursachen sind magmatische und hydrothermale Prozesse in der Erdkruste. Unter dem Lazufre füllt sich möglicherweise eine riesige Magmakammer, die sich in Zukunft in einem großen Ausbruch entleeren könnte. Aber wie sehen die Reservoirs vor Supereruptionen aus und wie entwickeln sie sich? Und in welcher Tiefe liegen diese?

Deformationsmessungen mit Hilfe von Satelliten können hierauf keine eindeutige Antwort geben. Das GFZ hat daher zusammen mit Partneruniversitäten aus Chile und der Universität Hamburg im Jahr 2008 ein temporäres seismisches Netz am Lazufre installiert (Abb. 3) und konnte unter Verwendung von Daten aus einer zweiten Messkampagne der Universität von Alaska Fairbanks zwischen 2011 und 2013 tomographische Abbilder der magmatischen Reservoirs unter der Lazufre-Region erstellen. Für die Auswertung der hochkomplexen Signale wurden unterschiedliche, moderne Ansätze der Seismologie verwendet.

Die Oberflächenwellentomographie aus der Korrelation der Bodenunruhe zeigt, dass es unter dem Lastarria (Abb. 3c, A und B) am nördlichen Rand der sich hebenden Region zwei kleine Anomalien gibt, die wahrscheinlich magmatischen Ursprungs sind (*Spica et al., 2015*). Die untere Anomalie hat eine horizontale Ausdehnung von etwa 4 km und liegt in 3 bis 6 km Tiefe. Sie wird als kleines Magmareservoir gedeutet. Die darüber liegende Anomalie in etwa 1 km Tiefe ist kleiner und vermutlich hydrothermalen Ursprungs.

Mit der Oberflächenwellentomographie konnten nur Strukturen in den obersten 7 km der Kruste untersucht werden. Das für die großflächige Hebung der Lazufre-Region verantwortliche Reservoir liegt jedoch tiefer. Seine Dimension und Ausdehnung konnte durch die teleseismische Analyse der Wellen von regionalen und weit entfernten Erdbeben, welche den Krustenraum unter dem Vulkan durchstrahlen, abgeschätzt werden. Diese Raumwellentomographie bildet tatsächlich ein imposantes magmatisches Reservoir in einer Tiefe von etwa 7 bis 15 km ab, dessen laterale Ausdehnung etwa 10 x 20 km beträgt (Abb. 3c, C). Wellen, die durch diese Zone laufen, werden um bis zu 30 % verlangsamt.

Die Daten aus Chile legen den Schluss nahe, dass große Magmareservoirs innerhalb weniger Jahre oder Jahrzehnte entstehen können. Diese Erkenntnis ist alarmierend, da dies be-



deutet, dass es schwer prognostizierbar ist, wo in Zukunft ein derartiges Reservoir entsteht. So wurde nur zufällig am Vulkan Laguna del Maule, unweit des Lastarria in Chile, eine nochmals deutlich stärkere Aufwölbung registriert, die sogar die Dimensionen des Yellowstone-Supervulkans übersteigt. Nur durch systematische und globale Vermessungen der Vulkanregionen weltweit lassen sich fundierte Aussagen über die Häufigkeit derartiger großvolumiger Magmenreservoirs treffen. Solange die genaue Lage und Geometrie großer Reservoirs nicht bekannt sind, werden Kalderen auch weiterhin überraschend und ohne Vorwarnung an der Oberfläche entstehen.

### Kalderen – Zeugen großer Magmakammern

Immer wieder werden Magmakammern durch Eruptionen oder Intrusionen geleert. Ausbrüche treten auf, wenn das Magma durch eine Öffnung oder einen Riss an der Oberfläche in die Atmosphäre fließt, entweder effusiv oder, in Abhängigkeit von Viskosität und Gasgehalt, in verschiedenen Explosionsgraden. Intrusionen hingegen sind spaltenförmige Einlagerungen im Gestein. Die Magmen dringen entweder senkrecht oder waagrecht in die Kruste und durchbrechen dabei das intakte Gestein (Rivalta *et al.*, 2015). Beispielsweise trat zwischen August 2014 und Februar 2015 am isländischen Vulkan Bárðarbunga eine große Gangintrusion auf, der ein effusiver Ausbruch und ein Kaldera-Kollaps am Zentralvulkan folgten (Abb. 4).

Der Kaldera-Kollaps betraf eine elliptisch geformte Region des Hauptkraters mit einem Durchmesser von 10 bis 14 km, die innerhalb von sechs Monaten um mehr als 66 m einsackte. Der Ausbruch förderte insgesamt  $2 \pm 0,4 \text{ km}^3$  vulkanisches Gestein und war damit der größte Ausbruch auf Island seit der Laki-Eruption von 1783/84. Weltweit gab es in den letzten 100 Jahren nur sechs bestätigte Kollapsereignisse an Vulkanen.

Der erhöhte Grad an Seismizität wies im August 2014 auf ein Anwachsen der Spannungen unterhalb des Vulkans hin. Die Entstehung und Ausbreitung einer seitlichen, vertikalen Intrusion konnte während der ersten zwei Wochen anhand einer wandernden Seismizitätswolke verfolgt werden. Ausgehend vom östlichen Bereich der Kaldera bewegte sich das Beben-Cluster zuerst nach Osten, dann nach Nordosten und zeigte damit an, dass sich ein Gang über eine Länge von etwa 40 km ausbreitete (Abb. 4). Bei Holuhraun, nördlich des Bárðarbunga, brach die Gangausbreitung ab, die Erdoberfläche wurde durchschnitten und es kam zur effusiven Eruption. Die Gangintrusion und der Ausbruch leerten das Magmareservoir unterhalb der Kaldera solange, bis die Sogwirkung auf das Dach der Magmakammer zu groß wurde und die Kaldera abzusinken begann. An der Kaldera-Ringstörung traten während des Kollaps' Hunderte von Erdbeben mit Magnituden  $>4$  auf (Abb. 4).

Die Bárðarbunga-Intrusion und der Ausbruch werden derzeit mit einer breiten Palette seismologischer und anderer Modellierungstechniken erforscht und mit früheren, großen Intrusionsereignissen verglichen. Die Seismizität folgte der Front des Magmakörpers während der Gangintrusion. Durch die genaue Lokalisierung der Mikrobeben konnte bestätigt werden, dass die durch Tektonik und den Vulkanbau verursachten Spannungen den krummen und segmentierten Intrusionspfad gesteuert haben, wie es bereits vorab in theoretischen Arbeiten postuliert worden ist (Rivalta *et al.*, 2015). So kann aufgrund morphologischer Änderungen oder durch eine Wechselwirkung mit aktiven Störungen die Ausbreitung einer magmatischen Intrusion gestoppt werden (Maccaferri *et al.*, 2016). Umgekehrt erzeugen große Intrusionen Spannungsänderungen in der Kruste, die das Muster der Mikrobebenaktivität verändern und selbst große Erdbeben auslösen oder die seismische Aktivität an Verwerfungen über Jahre abbauen können. Auch sind am Bárðarbunga in nächster Zeit weitere Intrusionen wahrscheinlich, da diese, ähnlich wie dies für Erdbeben gilt, typischen Häufigkeitsverteilungen genügen, wobei kleinere Intrusionen den größeren oft folgen (Passarelli *et al.*, 2015).

Seismologisch auffällig ist die induzierte Seismizität entlang der Kaldera-Randstörung während der sechsmonatigen Einsturzphase. Herdmechanismen wurden mit modernen Inversionsverfahren aus der Anpassung von synthetisch erzeugten an die beobachteten Raum- und Oberflächenwellenformen der Seismogramme verschiedener Stationen modelliert. Sie zeigen Mischbrüche an, also z. B. eine Scherverschiebung bei gleichzeitiger Volumenreduktion. Weitergehende Arbeiten sollen mittels seismologischer Modellierung dieser Mischbrüche Rückschlüsse auf das Volumen und die physikalischen Eigenschaften des Magmareservoirs ermöglichen. Ebenso auffällig



Abb. 2: Schwefelfelder unterhalb des Lastarria-Kraters in rund 5000 m Höhe (Foto: T. R. Walter, GFZ)

Fig. 2: Fumarole fields at the base of the crater of Lastarria volcano in approx. 5000 m elevation

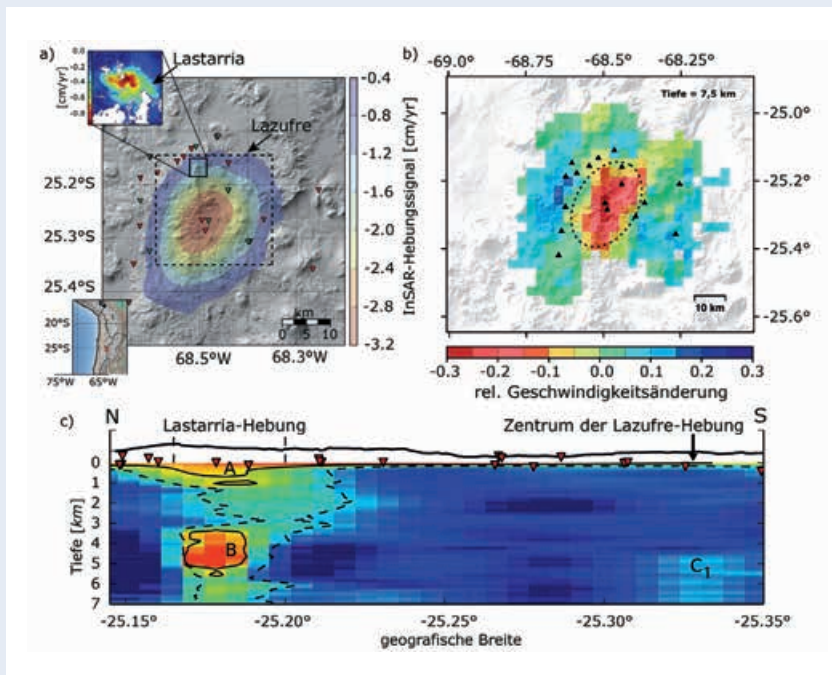


Abb. 3: (a) Stationsnetz (Dreiecke) und Hebungsraten (farbige Konturen) am Lazufre-Vulkankomplex in Chile; (b) Ausdehnung der Zone anomaler P-Wellengeschwindigkeit (in %) in etwa 7,5 km Tiefe (aus Raumwellentomographie); (c) Tiefenschnitt der obersten 7 km unter dem Vulkan mit den Zonen A, B und C anomaler S-Wellengeschwindigkeit (Oberflächenwellentomographie)

Abb. 3: (a) Seismic stations (triangles) and uplift rates (colored contours) at the Lazufre volcanic complex; (b) Extension of the anomalous zone of P-wave velocities (%) in 7.5 km depth (body wave tomography); (c) Depth section of the uppermost 7 km beneath the volcano with zones A, B and C of anomalous S-wave velocities (surface wave tomography)

ist die Abfolge von 77 Erdbeben mit Magnituden  $>5$ . Die Wiederkehrzeiten und die Verteilung der Bebenstärken passen zu einem Seismizitätsmodell, das man für tektonische Erdbeben seit langem postulierte, aber bisher nur selten bestätigen konnte – ein gelungenes Beispiel dafür, wie sich Vulkaneismologie und Erdbebenforschung ergänzen.

## Ausblick

Die Vulkaneismologie ist eine etablierte Methodik, weltweit Vulkane und deren Bruchprozesse im Untergrund zu überwachen. Auch können andere assoziierte Prozesse, wie Gerölllawinen, Glutlawinen und Dampfgas-Explosionen präzise und in Echtzeit registriert werden. Allerdings zeigte sich in der Praxis, dass die Komplexität von vulkaneismologischen Signalen die Erfassung physikalisch unabhängiger Daten erfordert. Eine erfolgreiche Vulkanüberwachung basiert daher auf einer Multiparameter-Observierung, bei der Seismologie, Deformationsmessung, Temperatur- und Gasüberwachung ineinandergreifen; nur bei Änderungsdetektionen an mehreren dieser Sensoren werden Warnstufen angehoben und die Bevölkerung informiert. Somit sind Vulkane ideale Labore, an denen neue Methoden entwickelt und erprobt werden.

Ähnlich wie der erste Seismograph am Vesuv 1876 zunächst testweise zum Einsatz kam, werden heute neue Beobachtungsmethoden an Vulkanen erprobt. Das Spektrum der neuen Ver-

fahren lässt dabei Arbeitsfelder der Chemie und Physik mit modernen Ingenieurwissenschaften verschmelzen. Massenverlagerungen können durch hochgenaue Schwerfeldmessungen, aber auch durch präzise Atomuhren entdeckt werden. Europäische Satelliten liefern aus über 600 km Höhe Daten, aus denen millimetergenaue Muster der Bodenbewegung erstellt werden. Auf Grundlage dieser Daten kann zukünftig die Relevanz von Supervulkanen neu bewertet werden. Unbemannte Fluggeräte ermöglichen Überflüge und Messungen an Vulkangipfeln, wo das Arbeiten für Vulkanologinnen und Vulkanologen riskant wäre. Insbesondere durch die Verfahren moderner Kommunikation und Sensorik steigt derzeit die verfügbare Datenmenge enorm an. Darüber hinaus werden auch Analysemethoden revolutioniert: so lassen beispielsweise tausende von Computerprozessoren über Cloud-Rechenoperationen für Modellierungen zu, die bislang undenkbar waren.

Diese neuen technischen Möglichkeiten der Vulkaneismologie bilden die Basis für eine bessere Risikobewertung vulkanischer Aktivitäten und tragen dazu bei, mögliche Schäden für Infrastrukturen und die Bevölkerung gefährdeter Regionen zu minimieren.

## Danksagung

Die graphische Bearbeitung aller Abbildungen erfolgte durch Regina Milkereit, GFZ.

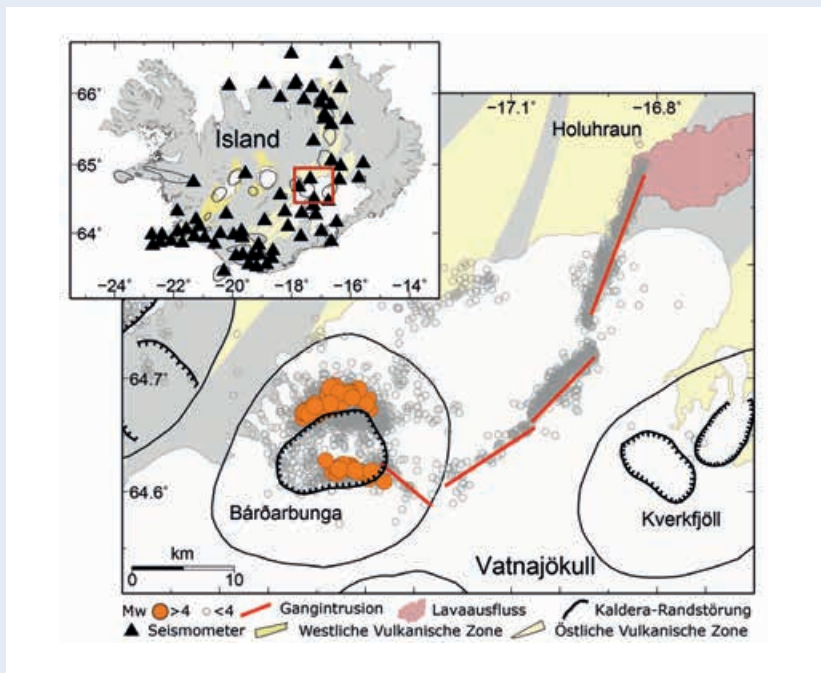


Abb. 4: Vulkanische Aktivität am Vulkan Bárðarbunga (Island) zwischen 2014 und 2015. Die Erdbeben mit Magnituden  $M \geq 4$  an der Kaldera-Randstörung sind durch farbige Kreise hervorgehoben. Die segmentierte Gangintrusion (rote Linien) wurde von tausenden von Mikrobeben begleitet (offene Kreise). Der Lavafluss bei Holuhraun ist eingezeichnet.

Fig. 4: Volcanic activity at the Bárðarbunga volcano (Iceland) between 2014 and 2015. Earthquakes with  $M \geq 4$  at the caldera ring-fault are indicated by coloured circles. The segments of the dike intrusion (red lines) were accompanied by thousands of micro-earthquakes (open circles). The lava flow at Holuhraun is indicated.

## Literatur

- Dahm, T., Fischer, T. (2014): Velocity ratio variations in the source region of earthquake swarms in NW Bohemia obtained from arrival time double-differences. - *Geophysical Journal International*, 196, 2, pp. 957–970.
- Jousset, P., Budi-Santoso, A., Jolly, A. D., Boichu, M., Surono, Dwiyo, S., Sumarti, S., Hidayati, S., Thierry, P. (2013): Signs of magma ascent in LP and VLP seismic events and link to degassing: An example from the 2010 explosive eruption at Merapi volcano, Indonesia. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261, pp. 171–192.
- Lühr, B.-G., Koulakov, I., Rabbel, W., Zschau, J., Ratdomopurbo, A., Brotopuspito, K. S., Fauzi, P., Sahara, D. P. (2013): Fluid ascent and magma storage beneath Gunung Merapi revealed by multiscale seismic imaging. - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261, pp. 7–19.
- Maccaferri, F., Rivalta, E., Passarelli, L., Aoki, Y. (2016): On the mechanisms governing dike arrest: Insight from the 2000 Miyakejima dike injection. - *Earth and Planetary Science Letters*, 434, pp. 64–74.
- Passarelli, L., Rivalta, E., Cesca, S., Aoki, Y. (2015): Stress changes, focal mechanisms and earthquake scaling laws for the 2000 dike at Miyakejima (Japan). - *Journal of Geophysical Research*, 120, 6, pp. 4130–4145.
- Rivalta, E., Taisne, B., Bungler, A. P., Katz, R. F. (2015): A review of mechanical models of dike propagation: Schools of thought, results and future directions. - *Tectonophysics*, 638, pp. 1–42.
- Spica, Z., Legrand, D., Iglesias, A., Walter, T. R., Heimann, S., Dahm, T., Rogier, J.-L., Rémy, D., Bonvalot, S., West, M., Pardo, M. (2015): Hydrothermal and magmatic reservoirs at Lazufre volcanic area, revealed by a high-resolution seismic noise tomography. - *Earth and Planetary Science Letters*, 421, pp. 27–38.

# Trends in seismologischer Instrumentierung

Christian Haberland, Rüdiger Giese, Jan Henniges, Karl-Heinz Jäckel, Philippe Jousset, Stefan Lüth, Thomas Reinsch, Trond Ryberg<sup>1</sup>  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Significant scientific findings are often directly related to innovations in measurement technology. For investigating the Earth's interior the invention of the seismography played the most important role. Starting with the first seismograph suitable for scientific investigations by Ewing, Gray and Milne in the 1870s and its improvement by Wiechert around 1900, seismic instrumentation was available in the beginning of the last century to reveal the layered structure of our planet. Since then, instruments were steadily improved, and controlled source experiments and seismic networks significantly contribute today to our understanding of the Earth's structure and the ongoing dynamic processes as well as to the exploration of resources as oil, gas, water and minerals. At the GFZ German Research Centre for Geosciences we work on technical innovations and apply them in experiments around the world and at a variety of scales. We develop highly portable, low-cost, high-performance seismic data recording systems, which are designed to be used in "large-N" array configurations (>1000 receivers) and on the sea floor (shallow water). Distributed acoustic sensors (DAS) based on fibre-optic cables allow extremely dense sampling of the seismic wavefields. Seismic sources and receivers integrated in borehole tools illuminate in high-resolution the subsurface during drilling operations (Seismic prediction while drilling, SPWD).*



Bedeutende wissenschaftliche Erkenntnisse stehen oftmals in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung innovativer Messtechnik und Sensorik sowie ihrer Weiterentwicklung. Bei der Erforschung des Innern der Erde spielt die Erfindung des Seismographen eine herausragende Rolle. Nachdem die bis ins späte 19. Jahrhundert überwiegend verwendeten Seismoskope nur Erschütterungsanzeiger waren, ermöglichte der von Sir James A. Ewing, Thomas Gray und John Milne 1879 entwickelte und später von Ernst von Rebeur-Paschwitz und dann von Emil Wiechert um 1900 verbesserte Seismograph die quantitative Messung der durch seismische Wellen hervorgerufenen Bodenbewegungen. Diese wiederum lassen Aufschluss über den Aufbau der Erde und die in ihr ablaufenden Prozesse zu. Der Wiechertsche Horizontalseismograph (Abb. 1) war als Pendel ausgeführt, welches viskos gedämpft war und auf berußtem Papier aufzeichnete. Die große Masse von rund 1000 kg, nötig zur Überwindung der Reibung, begrenzte die Einsatzmöglichkeiten auf den reinen Observatoriumsbetrieb. Boris Borisovich Galizin entwickelte 1903 den elektrodynamischen Seismographen, bei dem eine Induktionsspannung gemessen wird, die bei der Relativbewegung einer mit der seismischen Masse verbundenen Spule in einem Magnetfeld entsteht – jenes Messprinzip, welches bis heute sogenannten Geophonen zugrunde liegt.

Bereits früh wurden die Seismographen zu globalen Beobachtungsnetzen zusammengeschlossen, die zur Entschlüsselung des Schalenbaus der Erde führten. So erfolgte die Entdeckung des Erdkerns 1906 durch Richard D. Oldham (erste Bestimmung der Tiefe der Kern-Mantel-Grenze 1913 durch Beno Gutenberg), der Kruste-Mantel-Grenze durch Andrija Mohorovičić 1909/1910, des flüssigen, äusseren Erdkerns durch Harold Jeffreys 1926 und des (festen) inneren Erdkerns durch Inge Lehmann 1936 (siehe z.B. *Shearer, 2009* und *Schweitzer, 2003*). In dieser Zeit wurden zudem Verfahren mit künstlichen seismischen Quellen wie Sprengungen insbesondere für Prospektionsaufgaben wie auch für krustenseismische Untersuchungen eingeführt. Neben der Erkundung der Struktur



Abb. 1: Der im Foyer des GFZ ausgestellte Horizontalseismograph von Emil Wiechert war in Potsdam von 1903 bis 1954 im Einsatz (Foto: E. Gantz, GFZ)

Fig. 1: The Horizontal Wiechert Seismograph, on display in the GFZ foyer, was in operation in Potsdam from 1903 to 1954

des Erdinnern dienten seismische Netzwerke auch dem Studium von Erdbeben. Charles F. Richter entwickelte im Jahr 1935 das nach ihm benannte Maß für die Stärke von Erdbeben.

Seitdem wurden die Geräte ständig weiterentwickelt. Moderne Seismometer arbeiten nach dem Force-Balance-Prinzip, d.h. die auf die seismische Masse wirkenden Kräfte werden mittels einer geeigneten elektronischen Rückkopplung kompensiert. Hierdurch werden die Eigenschaften der Seismometer wesentlich verbessert (Linearität, Breitbandigkeit), da der Frequenzgang weitgehend unabhängig vom mechanischen System eingestellt werden kann. Dies ermöglicht weiterhin eine Verkleinerung der Sensoren, da durch eine hohe Güte des Masse-

*Links: Moderne seismische Registriergeräte sind so klein, dass 300 Einheiten problemlos mit drei Geländewagen in Alukoffern auf dem Dach transportiert werden können – wie hier während eines Einsatzes in Namibia. (Foto: C. Haberland, GFZ)*

*Left: Modern seismic recording instruments are very compact so that 300 of such units packed in alu-boxes on the roof can easily be transported by three cars as seen here during a seismic experiment in Namibia.*



**Kontakt:** C. Haberland  
(christian.haberland@gfz-potsdam.de)

<sup>1</sup> Mitverfasser in alphabetischer Reihenfolge

Feder-Schwingers ihr Eigenrauschen auch bei kleinen Massen und Eigenperioden gering gehalten werden kann. Gleichzeitig sind solche Sensoren robuster und können mobil eingesetzt werden. Somit können auch lokale Erdbeben und Detailstrukturen beispielsweise von Gebirgen, Subduktionszonen oder Scherzonen mit temporären seismischen Netzen untersucht werden (z.B. *Haberland et al., 2014*).

Die Einführung der Digitaltechnik in den 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts bedeutete einen Durchbruch zu signifikant verbesserter Registrierung, Übertragung und Speicherung der aufgenommenen Daten. Das Global Positioning System (GPS) erlaubt heute die genaue Synchronisierung der einzelnen Stationen; in naher Zukunft könnten miniaturisierte Atomuhrmodule diese Aufgabe übernehmen. Ebenfalls miniaturisierte Beschleunigungssensoren (mikro-elektro-mechanische Systeme, MEMS), die beispielsweise auch in Airbags und Smartphones eingebaut sind, werden zunehmend in der Explorationsseismik eingesetzt. Neben den inertialen Sensoren können auch Stainmeter zur Messung seismischer Wellen benutzt werden. Diese bisher wenig eingesetzten Geräte könnten durch neue optische und faseroptische Technologien (s.u.) erheblich an Bedeutung gewinnen.

Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ beschäftigen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit der Entwicklung und Weiterentwicklung von innovativer seismischer Sensorik sowie mit der effizienten Registrierung und Speicherung der Daten, um neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu erzielen. Nachfolgend werden einige Neuentwicklungen vorgestellt.

### Kompakte, mobile Feldseismographen für „Large-N“-Anwendungen

Eine wichtige Zielstellung der Seismologie ist, immer höher aufgelöste Abbilder des Untergrunds zu erstellen, um die Strukturen und damit verbundene geologische Prozesse besser zu verstehen. Dafür ist es – neben verbesserten Analyseverfahren – erforderlich, das Wellenfeld möglichst dicht räumlich und zeitlich abzutasten. Mit der dichten Abtastung lassen sich grundsätzlich methodisch andere Auswerteverfahren wie z.B. die Helmholtztomographie, Wellenfeld-Gradiometrie und Arrayverfahren (basierend auf kohärenten Wellenfeldbeobachtungen) anwenden. In der Explorationsseismik werden schon heute Messungen mit bis zu 100 000 Empfängern durchgeführt, die in relativ begrenzten Messgebieten teilweise kabelbasiert arbeiten. Bei größerskaligen Untersuchungen (beispielsweise der Erdkruste) oder bei Erdbebenuntersuchungen kommen autonome seismische Stationen zum Einsatz, die temporär installiert werden. Derzeit erfolgen diese Untersuchungen mit relativ wenigen seismischen Sensoren (Zehner bis wenige Hundert; also deutlich weniger als in der Explorationsseismik). Am GFZ werden kompakte und robuste Datenrekorder entwickelt (CUBE-Datenrekorder; siehe auch *Haberland und Ryberg, 2012*), die

sich durch einen besonders geringen Stromverbrauch auszeichnen, kostengünstig sind und an die eine Vielzahl von Sensoren angeschlossen werden können. Dies erleichtert die Logistik, verringert die Transportkosten (siehe Foto Seite 68), erhöht die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Stationen und reduziert den Personalaufwand für die Installation erheblich (siehe z.B. *Ryberg et al., 2015*). Somit können sehr viele Geräte („Large-N“) bei Experimenten zu wissenschaftlichen Fragestellungen eingesetzt werden. Gerade im Zusammenspiel mit modernen Breitbandsensoren, die ebenfalls einen sehr geringen Stromverbrauch aufweisen und kompakt sind, ermöglichen diese Geräte innovative Analysemethoden und tragen damit zu neuen Einblicken in Untergrundstrukturen sowie in Erdbeben- und Vulkanprozesse bei.

### Ortsverteilte akustische Messungen (Distributed acoustic sensing, DAS)

Distributed Acoustic Sensing (DAS) ist eine neue Technologie, bei der eine optische Faser, wie z.B. aus der Telekommunikation bekannt, als Sensor zur Aufzeichnung akustischer Signale eingesetzt wird. Grundlage hierbei ist das Prinzip der optischen Zeitbereichsreflektometrie (optical time-domain reflectometry, OTDR), wodurch Messdaten entlang der optischen Faser mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung registriert werden können. Mit gegenwärtig verfügbaren Techniken können Abtastraten von z.B. 1kHz bei 1m Datenpunktabstand entlang von Sensorkabeln mit einer Länge von bis zu 40km realisiert werden, was völlig neue Möglichkeiten für geophysikalische Anwendungen eröffnet. Zudem haben die erforderlichen Sensorkabel einen einfacheren Aufbau als konventionelle



Abb. 2: Installation eines faseroptischen Kabels (gelb) während des Einbaus der Verrohrung in der Bohrung RN-34 im Reykjanes-Geothermiefeld, Island (Foto: M. Poser, GFZ)

Fig. 2: Installation of a fiber-optic cable (yellow) during running of the casing of the RN-34 well within the Reykjanes geothermal field, Iceland

Schwingungsaufnehmer und sind deutlich robuster, was einen einfacheren und kostengünstigeren Einsatz auch unter rauen Umgebungsbedingungen ermöglicht (Abb. 2).

Als Messgröße werden Dehnungsänderungen entlang der optischen Faser aufgezeichnet. Im Zuge der Dateninterpretation können diese entweder direkt verwendet, oder auch in die konventionell aufgezeichneten Geschwindigkeiten umgerechnet werden. Erste geophysikalische Messungen in Bohrlöchern sind für explorationsseismische Anwendungen mit vertikalen seismischen Profilmessungen (VSP) durchgeführt worden. Feldversuche mit DAS-VSP am GFZ-Pilotstandort Ketzin haben gezeigt, dass die aufgezeichneten Signale generell mit konventionellen Geophonen vergleichbar sind, jedoch ein geringeres Signal/Rausch-Verhältnis aufweisen (Daley *et al.*, 2013). Erfolgt der Einsatz mit fest hinter der Verrohrung eingebauten Messkabeln, kann eine verbesserte Datenqualität gegenüber einem Sensor erzielt werden, der konventionell im Steigraum des Bohrlochs abgehängt wird. Mit dieser Methode konnte beispielsweise ein hochaufgelöstes seismisches 3D-Imaging im Nahbereich der Bohrungen in Ketzin mit vergleichsweise geringem Aufwand durchgeführt werden (Götz *et al.*, 2015).

Um die Anwendbarkeit für seismologische Untersuchungen an der Erdoberfläche zu erproben, wurden DAS-Daten entlang eines 15 km langen Telekommunikationskabels im isländischen Reykjanes-Geothermiefeld erfasst (Reinsch *et al.*, 2015). Erste Auswertungen zeigen, dass hierbei sowohl die Signale natürlicher als auch künstlicher seismischer Quellen erfolgreich aufgezeichnet werden konnten. Derzeit laufende Auswertungen dieser Daten, in Kombination mit Daten eines Netzwerks seismischer Breitbandstationen, das in Zusammenarbeit mit ÍSOR (Iceland GeoSurvey) eingerichtet wurde, zielen darauf ab, ein besseres Abbild des geothermischen Reservoirs zu ermöglichen (Jousset *et al.*, 2014).

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten am GFZ haben zum Ziel, die DAS-Methode weiterzuentwickeln, um unterschiedliche Signalcharakteristiken anzugleichen, das Signal/Rausch-Verhältnis zu verbessern und die bei den Messungen erzeugten, sehr großen Datenmengen zu prozessieren. Bei dem bislang üblichen Messkabelaufbau besteht eine ausgeprägte direktionale Sensitivität in Richtung der Längsachse der Kabel, wodurch Einschränkungen gegenüber etablierten Drei-Komponenten-Sensoren bestehen. Messungen in Bohrungen mit fest eingebauten Sensorkabeln stellen bislang den hauptsächlichen Anwendungsbereich dar. Mit dem am GFZ entwickelten hybriden Bohrlochmesssystem (Henninges *et al.*, 2012) sind auch faseroptische Messungen mit einem temporär abgehängten Kabel, ähnlich wie bei einer Wireline-Bohrlochmessung möglich, wodurch die Anwendungsmöglichkeiten der DAS-Methode deutlich erweitert werden.

Für die Anwendung der DAS-Methode kommen u. a. bereits vorhandene Telekommunikationsglasfaserkabel in Frage, wodurch

weltweit bereits ein viele Millionen Kilometer langes Netzwerk an potenziell nutzbaren Messkabeln zur Verfügung steht. Sie ermöglichen räumlich und zeitlich hochauflösende seismakustische Messungen und können durch weitere F&E-Arbeiten in naher Zukunft zu verbesserten Beobachtungsmöglichkeiten bei der Bohrloch- und Oberflächenseismik beitragen. Insbesondere die Langzeitüberwachung von schwer zugänglichen Strukturen (z. B. Tunnel und unterirdische Speicher) lässt sich durch permanent installierte Glasfaserkabel leichter realisieren als mit konventionellen, mobilen seismischen Empfängern (Geophone, Piezo-Aufnehmer, etc.)

### Seismic prediction while drilling (SPWD)

Die Ansprüche an die Erkundung des Untergrunds steigen mit zunehmender Tiefe an. Dies gilt sowohl für die Prospektion von Lagerstätten als auch für die Erkundung von Strukturen im Umfeld von Untertagebauwerken. Eine Möglichkeit, die Genauigkeit der Erkundung zu verbessern, besteht darin, seismische Messungen in unmittelbarer Nähe zu den geologischen Strukturen aus Bohrungen und Tunneln heraus durchzuführen. Auf diese Weise können Signalfrequenzen von einigen Hundert Hertz bis in den Kilohertz-Bereich für die Prospektion eingesetzt werden. Dies stellt aber hohe Anforderungen an die Messtechnik, da große Erschütterungen, hohe Drücke und Temperaturen sowie der sehr begrenzte Raum für eine Installation eine kompakte und robuste Bauweise der Messgeräte notwendig macht.

Basierend auf den Erfahrungen in der Entwicklung von seismischer Messtechnik für Tunnelanwendungen wurden am GFZ Messsysteme für die Anwendung in trockenen horizontalen und vertikalen Explorationsbohrungen bis 2000 m Tiefe entwickelt. Diese SPWD-Sonden (Seismic Prediction While Drilling) vereinen die Empfänger und die seismische Quelle, bestehend aus vier magnetostriktiven Vibratoren, in einem Gerät (Jaksch *et al.*, 2010). Die Vibratorsignale können unabhängig voneinander gesteuert werden, so dass eine Verstärkung der seismischen Wellen durch Interferenz in definierten Raumrichtungen ermöglicht wird. Dies erlaubt eine Vergrößerung der Erkundungsreichweite und führt zu einer Verbesserung der räumlichen Auflösung geologischer Strukturen.

Tests mit den SPWD-Bohrlochsonden sind ein wichtiger Baustein in der Entwicklung und Anpassung der Sonden an die untertägigen Einsatzbedingungen. Das GFZ besitzt mit dem KTB-Tiefenlaboratorium in Windischeschenbach und dem Untertage-Labor in Freiberg günstige Bedingungen für anwendungsnahe Testmessungen. Abbildung 3 zeigt den Einsatz der SPWD-Sonde für horizontale Bohrungen in der Eisenerzmine von Kiruna, Schweden.



Abb. 3: Test einer SPWD-Sonde in der Eisenerzmine von Kiruna, Schweden. Links: Einbau der Sonde in die Erkundungsbohrung. Rechts: Die SPWD-Sonde, bestehend aus seismischer Sektion (Vordergrund) und Elektronik-Sektion für die Signalerzeugung, Datenaufzeichnung und Übertragung zur Oberfläche (Hintergrund; Foto: R. Giese, GFZ)

Fig. 3: SPWD-sonde in the Kiruna iron ore mine. Left: Insertion of the seismic unit of the sonde into well. Right: The complete SPWD-sonde consisting of the seismic unit (foreground) and the electronic unit for signal generation, data recording and transmission (background)

## Unterwasser-Geophonstationen

Fortschritte bei technischen Komponenten wie A/D-Wandlern, Speicherchips und Computerprozessoren, die zur Entwicklung der oben vorgestellten kompakten Datenrekorder führten, ermöglichen auch neue Instrumente für den Unterwassereinsatz. Die im Datenlogger CUBE (s.o.) verwendeten elektronischen Komponenten erweisen sich als sehr leistungsfähig, so dass ein Einsatz auf dem Meeresgrund, d.h. ohne GPS-Empfang, möglich ist. Am GFZ entwickelte, leistungsfähige und kostengünstige Unterwasser-Geophonstationen (Shallow ocean bottom seismographs, S-OBS) für den Flachwassereinsatz (Abb. 4) zeigen in Tests exzellente Resultate. Die Stationen wurden in einem Pilotprojekt in Zusammenarbeit mit dem Alfred-Wegener-Institut (AWI) zum Studium der submarinen Permafrosterstreckung in der Arktis erfolgreich eingesetzt (*Overduin et al., 2015*). Mithilfe dieser Stationen konnten unter Verwendung minimalinvasiver, passiver seismischer Verfahren im ökologisch sensitiven Gebiet des Lenadeltas (Nordpolarmeer), einem der größten Flussdeltas der Erde, klimarelevante Informationen der submarinen Permafrostschicht bestimmt werden.

## Ausblick

Die aufgeführten Beispiele technischer Innovationen spiegeln vor allem den derzeitigen Trend in der Seismologie wieder, die Wellenfelder räumlich und zeitlich dichter bzw. näher am Objekt abzutasten, um eine immer höhere Auflösung des Untergrunds zu erhalten und neue Analysemethoden zu ermöglichen. Da bei diesen Ansätzen enorme Datenmengen entstehen, bestehen die größten Herausforderungen in naher Zukunft in einer effizienten Datenaufbereitung und -prozessierung.

## Literatur

- Daley, T., Freifeld, B., Ajo-Franklin, J., Dou, S., Pevzner, R., Shulakova, V., Kashikar, S., Miller, D., Götz, J., Henniges, J., Lüth, S. (2013): Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring. - *The Leading Edge*, 32, 6, pp. 699–706.
- Götz, J., Lueth, S., Henniges, J., Reinsch, T. (2015): Using a Fibre Optic Cable as Distributed Acoustic Sensor for Vertical Seismic Profiling at the Ketzin CO<sub>2</sub> Storage Site. - *Proceedings, 77th EAGE Conference and Exhibition (Madrid, Spain 2015)*.
- Haberland, C., Bohm, M., Asch, G. (2014): Accretionary nature of the crust of Central and East Java (Indonesia) revealed by local earthquake travel-time tomography. - *Journal of Asian Earth Sciences*, 96, pp. 287–295.
- Haberland, C., Ryberg, T. (2012): Seismische Datengewinnung: moderne Messsysteme verbessern die Abbildung des tiefen Untergrunds. - *System Erde*, 2, 2, pp. 32–37.
- Henniges, J., Brandt, W., Erbas, K., Moeck, I., Saadat, A., Reinsch, T., Zimmermann, G. (2012): Downhole monitoring during hydraulic experiments at the in-situ geothermal lab Gross Schönebeck - 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (Stanford, USA 2012).



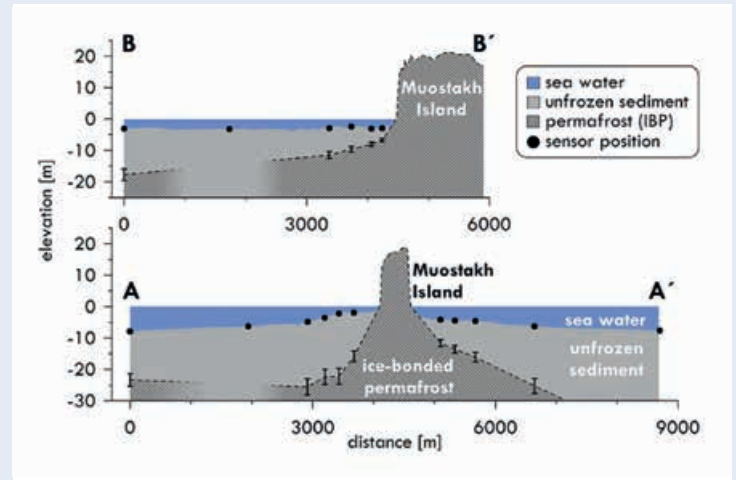


Abb. 4: Einsatz neuer Flachwasser-Seismometer (S-OBS) zur Erforschung des submarinen Untergrunds. Links: Ausbringen der Instrumente bei einem Test in der deutschen Nordsee mit dem AWI-Forschungsschiff „Mya“ (S-OBS sind die Metallzylinder, zusammen mit Ankergewicht (rote Beutel) und gelber Boje) (Foto: C. Haberland, GFZ). Rechts: Ergebnisse des Messeinsatzes in der sibirischen Arktis (Laptevsee), bei dem die Tiefenlage und Erstreckung des submarinen Permafrosts ermittelt wurde (Overduin et al., 2014; Wiederverwendung der Abbildung rechts mit freundlicher Genehmigung des Verlags John Wiley and Sons)

Fig. 4: Operation of new shallow water seismometers (S-OBS) to investigate the polar sea shelf. Left: Deployment of the instruments from AWI-RV “Mya” during a test in the North Sea (S-OBS are the metal cylinders, complemented by an anchor weight (red bag) and a yellow buoy). Right: Results of an experiment in the Siberian Arctic (Laptev Sea), in which the depth and areal extent of submarine ice-bounded permafrost was investigated (Overduin et al., 2014; reproduction of right figure with kind permission by John Wiley and Sons)

Jaksch, K., Giese, R., Kopf, M., Jurczyk, A., Mikulla, S., Weisheit, S., Groh, M., Krüger, K. (2010): Seismic Prediction While Drilling (SPWD): Looking Ahead of the Drill Bit by Application of Phased Array Technology. - Scientific drilling: reports on deep earth sampling and monitoring, 9, pp. 41–44.

Jousset, P., Ágústsson, K., Verdel, A., Blanck, H., Stefánsson, S. A., Trygvason, H., Erbas, K., Deon, F., Erlendsson, Ö., Guðnason, E., Specht, S., Hersir, G. P., Halldórsdóttir, S., Weemstra, C., Franke, S., Bruhn, D., Flóvenz, Ó. G., Friðleifsson, G. Ó. (2014): Imaging geothermal systems associated with oceanic ridge: first analysis of records from a dense seismic network deployed within and around the Reykjanes high-temperature area, SW-Iceland - Abstracts, AGU 2014 Fall Meeting (San Francisco, USA 2014).

Overduin, P. P., Haberland, C., Ryberg, T., Ohrnberger, M., Kneier, F., Jacobi, T., Grigoriev, M. N. (2015): Submarine permafrost depth from ambient seismic noise. - Geophysical Research Letters, 42, 18, pp. 7581–7588.

Reinsch, T., Hennings, J., Götz, J., Jousset, P., Bruhn, D., Lüth, S. (2015): Distributed Acoustic Sensing Technology for Seismic Exploration in Magmatic Geothermal Areas - Proceedings, World Geothermal Congress 2015 (Melbourne, Australia 2015).

Ryberg, T., Haberland, C., Haberland, T., Weber, M., Bauer, K., Behrmann, J. H., Jokat, W. (2015): Crustal structure of northwest Namibia: Evidence for plume-rift-continent interaction. - Geology, 43, 8, pp. 739–742.

Schweitzer, J. (2003): Early German contributions to modern seismology. - In: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., Kisslinger, C. (Eds.), International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology: project of the Committee on Education, International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, (International Geophysics Series ; 81B), Amsterdam [u.a.]: Academic Press, 58 pp. (auf CD-ROM).

Shearer, P. M. (2009): Introduction to Seismology, 2. ed., Cambridge [u.a.]: Cambridge University Press, 412 p.

# Netzwerk

## Wie brechen Kontinente auseinander? Neue Erkenntnisse aus Südafrika



Ausführungen von Bohrungen für seismische Messungen (Foto: C. Haberland, GFZ)

Als vor 130 Mio. Jahren der westliche Teil des Urkontinents Gondwana auseinanderbrach und die Geburt des Süd-Atlantik einleitete, trennten sich das heutige Afrika und Südamerika voneinander. Man nahm bisher an, dass enorme Mengen von Magma aus dem tiefen Erdmantel aufstiegen und dass diese heiße Gesteinsblase (genannt Tristan-Mantelplume) den Urkontinent Gondwana von unten heizte, aufweichte und schließlich aufriss. Eine Gruppe deutscher Geoforscher stellt nun diese grundlegende Annahme mit einer Studie in Frage. Anhand seismischer Messungen konnten sie zeigen, dass die Auswirkungen des Tristan-Mantelplumes auf die kontinentale Kruste Gondwanas räumlich überraschend begrenzt waren. Dies passt keineswegs zu den bisherigen Vorstellungen, die von einem entscheidenden Einfluss eines Mantelplumes beim Aufbrechen des Kontinents ausgehen. Somit kann eine dominante oder gar ausschlaggebende Rolle einer solchen Gesteinsblase beim Aufbrechen von Gondwana im Südatlantik ausgeschlossen werden. Aufsteigende heiße Gesteinsmassen im Erdmantel sind ein wichtiger Motor der Plattentektonik. Bei einem angenommenen großen Durchmesser von Tausenden von Kilome-

tern ist die von der Kern-Mantel-Grenze aus 2900 km Tiefe mitgebrachte Hitze so groß, dass sie ausreicht, die kontinentale Lithosphäre zu durchbrechen oder gar aufzulösen. An der Erdoberfläche finden sich an diesen Stellen gewaltige Mengen so genannter Flutbasalte. So auch im südlichen Afrika und – parallel dazu – Südamerika. Diese Etendeka/Paraná-Flutbasalte gelten als oberirdischer Beleg für das Aufschmelzen des westlichen Gondwanakontinents vor 130 Mio. Jahren. Belege dieses Auseinanderbrechens finden sich auch im Ozean: der Walfischrücken vor der Westküste Namibias zeichnet die Spur nach, die der Mantelplume hinterließ, als Afrika begann, sich zu formieren und nach Osten zu treiben. Die deutschen Geoforscher wollten diesem Vorgang detailliert auf die Spur kommen. Die Spuren solcher gewaltiger Gesteinsmassen finden sich in den unterschiedlichen Geschwindigkeiten wieder, mit denen seismische Wellen durch das Gestein laufen. Gemeinsam mit Kollegen vom Alfred-Wegener-Institut AWI (Bremerhaven) und vom GEOMAR (Kiel) und unterstützt durch den Geologischen Dienst Namibias haben Wissenschaftler des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ daher umfangreiche seismische Un-

tersuchungen an Land und im angrenzenden küstennahen Bereich des Südatlantiks vorgenommen. Sie legten seismische Profile parallel zur namibischen Küste und von der Küste inland laufend an. Die Geowissenschaftler konzentrierten sich auf das Gebiet an der Westküste Namibias. Dort konnten sie erstmals mit tiefreichender Seismologie die Struktur der Erdkruste an der Stelle abbilden, wo der Walfischrücken mit dem Kontinent zusammenläuft. Die Messungen weisen eine ausgeprägte seismische Hochgeschwindigkeitsanomalie in der Unterkruste bei 20 bis 40 km Tiefe auf. Dieser Bereich mit hohen Wellengeschwindigkeiten erklärt sich dadurch, dass hier heißes Gesteinsmaterial aus dem Erdmantel in die Erdkruste eingedrungen ist. Das entspricht auch der gängigen Theorie. Völlig überraschend aber sind die gemessenen begrenzten Ausmaße des identifizierten Gesteinskörpers, die den vermuteten entscheidenden Einfluss eines riesigen Mantelplumes bei Aufbrechen des Kontinents nicht bestätigen. Die Forscher erklären sich den Sachverhalt damit, dass Gondwana von Süden her begann, auseinander zu reißen. In diese Riss-Struktur drang das aufsteigende Gestein des heißen Plume ein und beschleunigte dadurch das Abtrennen von Afrika und Südamerika. Das Aufbrechen von Gondwana im Südatlantik und generell die Rolle von Mantelplumes beim Aufbrechen kontinentaler Kruste muss wohl neu bewertet werden. ■

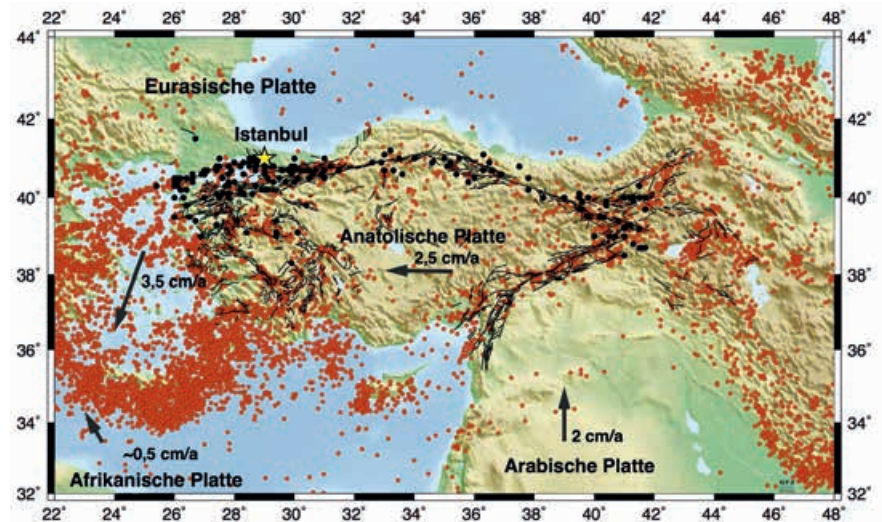
**Weitere Untersuchungsergebnisse in:** T. Ryberg, C. Haberland, T. Haberlau, M. H. Weber, K. Bauer, J. H. Behrmann, W. Jokat (2015): „Crustal structure of northwest Namibia: Evidence for plume-rift-continent interaction“. - *Geology*, Vol. 43, 8, pp. 739–742.

## Die maximale Erdbebenstärke in der nördlichen Türkei

Das seismische Risiko der Megacity Istanbul ist bekannt: mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit hat die Stadt in der nahen Zukunft mit einem verheerenden Erdbeben zu rechnen. Die Frage ist, wie stark das Beben werden kann. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ haben zusammen mit einem Kollegen von der University of Southern California die Erdbebenmaxima entlang der Nordanatolischen Verwerfung untersucht und kamen zu dem bemerkenswerten Ergebnis, dass Megabebeben der Magnitude M8 nur im Osten der Erdbebenzone zu erwarten sind. Für den westlichen Teil der Verwerfungszone, wo Istanbul angesiedelt ist, erwarten sie Starkbeben mit nicht größerer Magnitude als M7,5.

Sie stellten für ihre Untersuchungen einen neuen Katalog historischer Seismizität für die Nordanatolische Verwerfungszone zusammen, der bis 300 Jahre vor Christus zurückreicht und somit einen Zeitraum von 2300 Jahren abdeckt. Interessanterweise sind im Nordwesten der Türkei niemals Erdbeben mit Magnituden größer als 7,5 beobachtet worden. Im Gegensatz dazu sind im Osten der Türkei Magnituden bis M8 gut dokumentiert. Die Erklärung dafür liegt im Alter der Bruchzone. Die mehr als 900 km lange Nordanatolische Verwerfung reicht von der Nordägäis im Westen bis fast zum Kaukasus im Osten und läuft quer durch die nördliche Türkei. Sie stellt die Nahtstelle zwischen der Anatolischen Platte im Süden und der Eurasischen Platte im Norden dar. Die Anatolische Platte, und mit ihr die heutige Türkei, bewegt sich nach Westen und verhakt sich dabei mit der Eurasischen Platte, wodurch über Jahrhunderte Spannungen aufgebaut werden, die sich dann schlagartig in Form von Erdbeben entladen.

Der jetzt vorgestellte neue Erdbebenkatalog ergibt, zusammen mit weiteren Schlüsselgrößen wie Alter, strukturelle Beschaffenheit und Bewegungsraten der



Die Anatolische Platte und die Nordanatolische Verwerfungszone (Grafik: D. Domigall, GFZ)

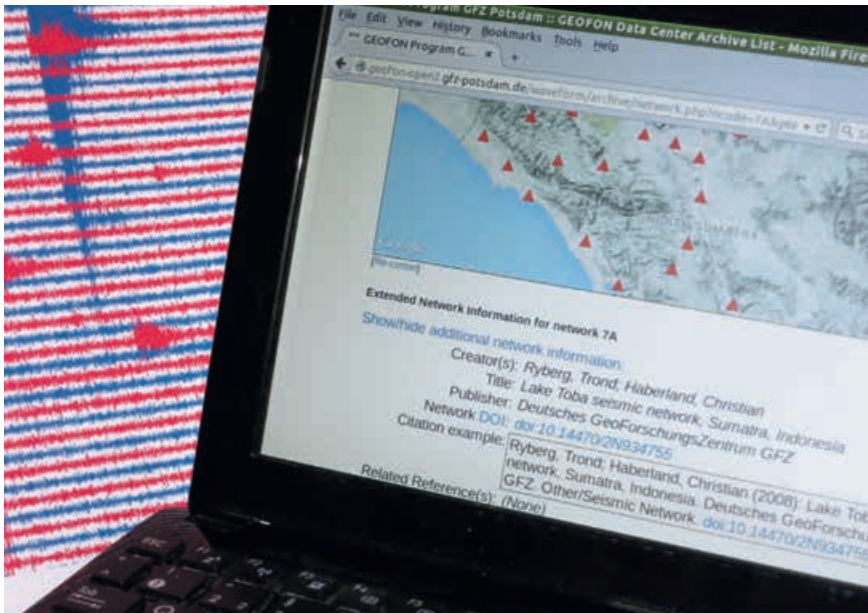
Erdplatten, ein schlüssiges Erklärungsmuster: Die geringeren Erdbebenstärken im Westen stehen im Zusammenhang mit dem früheren Entwicklungsstatus der Erdbebenzone. Sie ist dort mit etwa 8 Mio. Jahren vergleichsweise jünger und weniger gut ausgebildet als im Osten, wo sie 12 bis 13 Mio. Jahre alt ist. Die längere Zeitspanne hat hier bereits zur Ausbildung größerer zusammenhängender Bruchflächen damit zum Auftreten größerer Erdbeben geführt. Denn Verwerfungszone haben einen Lebenszyklus. Das Gestein bricht nicht entlang der gesamten Bruchzone auf einmal, sondern in Teilsegmenten. Im Laufe der Jahrmillionen wachsen einige dieser Segmente gerade durch die Erdbeben zusammen. Aufgrund ihres höheren Alters befinden sich daher im Ostteil der Verwerfung größere zusammenhängende Segmente. Deshalb treten im Osten stärkere Beben auf als im Westen, wo sich aktuell noch mehrere kleinere und teilweise noch nicht miteinander verwachsene Teilabschnitte befinden.

Für Istanbul heißt das: Diese größeren Erdbeben mit Magnitude M8 sind dort erst in vielen Jahrtausenden zu erwarten. Damit läßt sich das seismische Risiko

für Istanbul nach oben eingrenzen. Dies bedeutet jedoch keinesfalls Entwarnung, da sich die Erdbebenzone unmittelbar vor den Toren der Stadt auf dem Grund des Marmarameers befindet. Daher kann auch ein Beben mit M7,5 entsprechend große Schäden anrichten. Die Ergebnisse der neuen Studie sind wesentlich für die Abschätzung maximal zu erwartender Erdbebenmagnituden in dicht besiedelten Regionen, für die Bestimmung der seismischen Gefährdung und des damit verbundenen Risikos und letztlich für die Anpassung von Bauvorschriften. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:** M. Bohnhoff, P. Martínez-Garzón, F. Bulut, E. Stierle, Y. Ben-Zion (2016): „Maximum earthquake magnitudes along different sections of the North Anatolian fault zone“. - *Tectonophysics*, DOI: 10.1016/j.tecto.2016.02.028.

## Seismologische Datenzentren in Zeiten von Big Data



Das GEOFON-Datenzentrum ist nicht nur ein Datenarchiv, sondern bietet eine vollständige Palette von Dienstleistungen für das Management wissenschaftlicher Daten (Foto: P. Evans, aus: Evans, P. et al. (2015), Eos, 96, doi:10.1029/2015EO036971; CC BY-NC 3.0)

Das GEOFON-Programm des GFZ (<http://geofon.gfz-potsdam.de>) stellt sowohl seismische Daten von eigenen Stationen und Partnernetzwerken als auch Erdbebenparameter zur Verfügung. Es betreibt ein Datenzentrum und -archiv, das Echtzeitdatenströme der GEOFON-Stationen sowie vieler Partnernetze und Plattenrand-Observatorien erfasst und verteilt. Es archiviert und verteilt außerdem Daten temporärer Experimente und fungiert als permanentes Archiv für den Geophysikalischen Instrumentenpool Potsdam (GIPP) des GFZ. Die Bereitstellung geophysikalischer Daten für die eigene und universitäre Forschung gehört zu den Kernaufgaben des GFZ. Für seismologische Daten hat GEOFON diese Rolle übernommen und beispielsweise im Bereich der Echtzeitdatenübertragung von seismologischen Daten Protokolle entwickelt, die international zum Standard gehören. Das GEOFON-Datenmanagement hat sich im Laufe der letzten zehn Jahre verändert: von der bloßen Archivierung und Standardisierung hin zur Entwicklung von Diensten, die die Anwendung von Big Data-Ansätzen, d.h. die automatisierte Bearbeitung und Verknüpfung sehr großer Datenmengen, ermöglichen.

Die Wissenschaft benötigt einen möglichst einfachen Zugang zu verschiedensten Datenquellen. Daher hat das GEOFON-Team beispielsweise zur Entwicklung von EIDA (European Integrated Data Archive; [www.orfeus-eu.org/eida/eida.html](http://www.orfeus-eu.org/eida/eida.html)) beigetragen. EIDA ist das verteilte Datenzentrum von ORFEUS, eines Verbunds der seismologischen Forschungsinstitute in Europa. Das Archiv stellt einheitliche Benutzerzugänge bereit, die einen Datenzugang unabhängig vom physischen Speicherort an zahlreichen Instituten sowohl über intuitiv zu bedienende Web-Oberflächen als auch zur automatisierten Bearbeitung über die Kommandozeile ermöglichen.

Vor dem Hintergrund neuer wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Herausforderungen bei der Erforschung des Systems Erde entsteht zunehmend Bedarf an fächerübergreifenden Diensten. Die geowissenschaftliche Infrastruktur des GFZ, MESI, ist ein Beispiel für diese Vernetzung. Auf Basis der jahrelangen europäischen Zusammenarbeit innerhalb von ORFEUS und in infrastrukturellen EU-Projekten (EUDAT, EPOS-IP) entwickelt GEOFON eine ganze Reihe innovativer

### Grundsätze zum Umgang mit Forschungsdaten

Forschungsdaten sind elementarer Teil und Grundlage der geowissenschaftlichen Forschung am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ. Zunehmend wichtiger werden Aspekte wie Nachnutzung, Validierung, Datenanalyse und Datensynthese, bis hin zur Integration in Modellen. Die Vielfalt der Forschungsthemen am GFZ erfordert eine differenzierte Herangehensweise beim Management von Forschungsdaten. Vor diesem Hintergrund hat das GFZ im März 2016 einen übergeordneten Rahmen geschaffen und die „Grundsätze zum Umgang mit Forschungsdaten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ“ verabschiedet.

#### Link zu den Grundsätzen zum Umgang mit Forschungsdaten:

[https://media.gfz-potsdam.de/gfz/wv/doc/16/GFZ\\_Daten\\_Grundsaeetze+Erg\\_de.pdf](https://media.gfz-potsdam.de/gfz/wv/doc/16/GFZ_Daten_Grundsaeetze+Erg_de.pdf)

Hierin wird das gemeinsame Grundverständnis zum Umgang mit Daten als Orientierungsrahmen festgehalten. Davon ausgehend wird der fachspezifische Umgang mit Forschungsdaten in internen Abläufen und bei der Zusammenarbeit mit Partnern näher definiert und ausgestaltet. Die Grundsätze bilden die Basis auf der detailliertere Regeln zum Umgang mit Forschungsdaten in Arbeitsgruppen und Projekten aufbauen.

Dienste, um wissenschaftliches Arbeiten in Zeiten von Big Data zu ermöglichen.

Die Archivierung seismologischer Datensätze bei GEOFON bietet den Projektverantwortlichen eine einfache und effektive Möglichkeit, den vom GFZ verabschiedeten Grundsätzen zum Umgang mit Forschungsdaten (siehe Box oben) gerecht

zu werden. Der langfristige, offene Datenzugang über das Projektende hinaus wird auch von den Förderorganisationen immer stärker eingefordert und bedingt die Zitierbarkeit von Datensätzen. Der Ansatz des GFZ für die Sicherung des Datenerhalts mit Hilfe redundanter Datenspeicherung an verschiedenen Orten, der Auffindbarkeit und der korrekten Zitierbarkeit basiert auf dem neuesten, von den weltweit wichtigsten Datenzentren (z. B. RENC1 und CERN) entwickelten und angewendeten Stand der Technik (Moore, 2008). Hierbei arbeitet das GEOFON-Team eng mit der Bibliothek und dem Rechenzentrum des GFZ zusammen. So werden seit über einem Jahr Datensätze mit DOIs (Digital Object Identifiers) versehen, so dass sie wie wissenschaftliche Veröffentlichungen zitiert werden können (Evans et al., 2015). GEOFON

setzt fortschrittliche Authentifizierungstechnologien unter Verwendung von europäischen Initiativen wie eduGAIN für zugriffsbeschränkte Daten ein, die noch einem Embargo unterliegen.

Das GFZ befasst sich in diesem Rahmen mit der Reproduzierbarkeit von Ergebnissen und der Herausforderung, große Datenmengen und die Rechenleistung an Großrechenzentren zusammenzubringen. Dazu versieht GEOFON jede Datei mit einem persistenten Identifikator für eine unzweideutige Spezifikation von Daten und evaluiert zudem Lösungen zur Versionsverwaltung von Daten, um frühere Zustände zu jedem beliebigen Zeitpunkt wiederherstellen zu können.

Ein modernes wissenschaftliches Datenzentrum ist nicht nur ein Speicherort

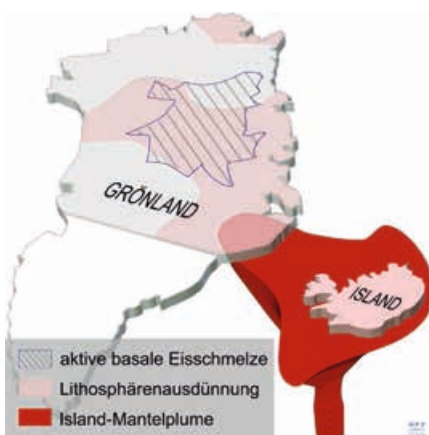
für Daten, sondern stellt einen flexiblen und leistungsfähigen Unterbau bereit, der weitestgehend Zugriffsbarrieren eliminiert und somit interdisziplinäre Forschung erleichtert. ■

#### Literatur:

R. Moore (2008): Towards a Theory of Digital Preservation. - *International Journal of Digital Curation*, Vol. 3, No. 1, pp. 63–75.

P. Evans, A. Strollo, A. Clark, T. Ahern, R. Newman, J. F. Clinton, H. Pedersen, C. Pequegnat (2015): Why Seismic Networks Need Digital Object Identifiers. - *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 96. DOI: <http://doi.org/10.1029/2015EO036971>.

## Erdwärme verursacht schnellen Eisfluss und Gletscherschmelze in Grönland



Heutige Lage des Island-Plumes, Bereiche ausgedünnter Lithosphäre und aktives Schmelzen an der Eisbasis (Grafik: A. Petrunin, GFZ)

Wer Grönlands Eismassen von heute untersucht, muss weit in die Erdgeschichte zurückschauen. Unter der Insel finden sich in der Lithosphäre heiße Stellen aus der geologischen Vergangenheit, welche zu einer Schmelze unterhalb der Eismassen Grönlands führen und das Eis deshalb schnell fließen lassen. In einem breiten Streifen von West nach Ost zieht sich eine Wärmeanomalie mit erhöhtem

Wärmefluss aus dem Erdinnern unter Grönland durch. Ein internationales Forscherteam unter Leitung des GFZ erklärt mit dieser Anomalie Beobachtungsdaten aus Radar- und Eisbohrmessungen, die eine weitgefächerte Schmelze unter dem Eisschild und erhöhte Gleitgeschwindigkeiten an der Basis des Eiskörpers zeigen. Diese Schmelze führt zu einem schnellen Eisfluss von Grönlands Gletscher-Gipfelregion über 750 km bis hin zum Nordatlantik.

Der Nordatlantik ist tektonisch aktiv. Vor 80 bis 35 Mio. Jahren vor heute bewegten die Prozesse der Plattentektonik Grönland über einen Bereich außergewöhnlich heißen Materials im Erdmantel, der heute noch für den Vulkanismus Islands verantwortlich ist. Dieses heiße Gesteinsmaterial dünnte dabei die Lithosphäre unter Grönland aus und heizte sie auf. So entstand eine große geothermische Anomalie unter einem Viertel der Landmasse Grönlands. Diese alte und langlebige Wärmequelle schuf eine Region mit viel Schmelzwasser unterhalb des Gletschers, auf der das Eis bis heu-

te rutschen und sich schnell bewegen kann. Ungefähr die Hälfte der Eiskappe im nördlichen Zentral-Grönland liegt auf aufgetautem Gesteinsbett und leitet sein Schmelzwasser über ein dichtes hydrologisches Netz unter dem Eis in den Ozean. Das Geoforschungsteam hat hier zum ersten Mal die enge Kopplung von weit in die Erdgeschichte zurückreichenden Prozessen tief im Erdinnern mit eisodynamischen Vorgängen und dem thermohydrologischen Verhalten großer Eisdecken nachgewiesen. Bisher war die erdgeschichtliche Vergangenheit des Plumes unter Grönland unter der 3 km dicken Eisdecke verborgen. Ihr Geheimnis konnten die Geoforscher nun mit einer innovativen Kombination von Computermodellen und Datensätzen aus Seismologie, Schweremessungen, Bohrungen, Radarmessungen, Eisdickenmessungen am Boden, vom Flugzeug und von Satelliten aus, entschlüsseln. Die Lage und Ausrichtung des Gebiets erhöhten geothermischen Wärmeflusses zeigt, wo Grönland über den heißen Island-Mantelplume wanderte.

Der unerwartete Zusammenhang von Mantelplumes und Eisdecken zeigt, dass die Einwirkungen auf die Eiskappen auf höchst unterschiedlichen Zeitskalen ablaufen, von Langzeitprozessen der Tektonik vor über 10 Mio. Jahren bis hin zu aktuellen Änderungen über die letzten Monate heutiger Klimaentwicklung. Zu-

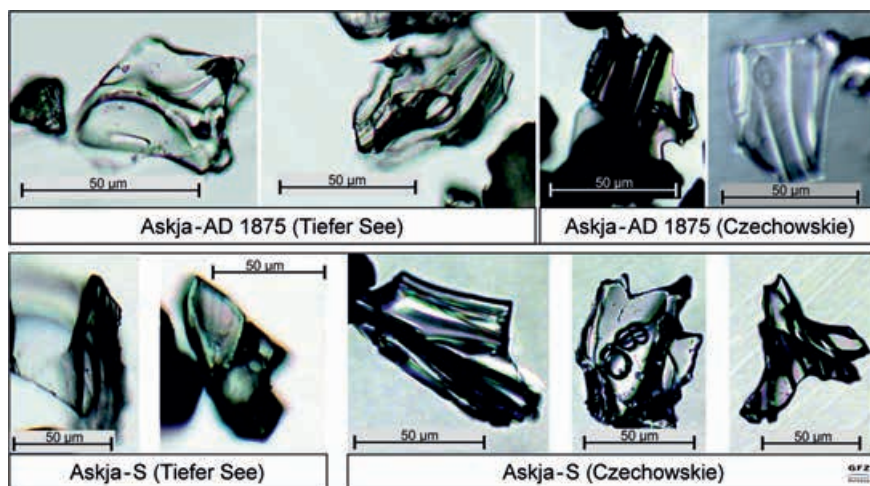
gleich ergeben die Ergebnisse der Studie auch einen unabhängigen Test für die verschiedenen Modellvorstellungen, wie sich der Nordatlantik öffnete, denn dieser tektonische Vorgang wird seit 30 Jahren diskutiert und ist bis heute noch nicht vollständig geklärt. ■

**Weitere Untersuchungsergebnisse in:** I. Rogozhina, A. G. Petrunin, A. P. M. Vaughan, B. Steinberger, J. V. Johnson, M. K. Kaban, R. Calov, F. Rickers, M. Thomas, I. Koulakov (2016): *Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history.* - *Nature Geoscience*, Advance Online Publication, 4. April 2016, DOI: 10.1038/NGEO2689.

## Spuren isländischer Vulkanasche in nordostdeutschem See



Ascheablagerungen isländischer Vulkanausbrüche wurden in den Sedimenten des Tiefen Sees im Naturpark Nossentiner-Schwinzer-Heide in Mecklenburg-Vorpommern gefunden. Damit lassen sich Klimaänderungen während der letzten 11 500 Jahre präziser als bisher datieren. Ein internationales Team von Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern unter Leitung des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ konnte Spuren von insgesamt acht Vulkanausbrüchen auf Island nachweisen, von denen sechs genau identifiziert werden konnten. Der älteste Ausbruch fand vor 11 400 Jahren statt, der jüngste geschah 1875 und ist auch in historischen Dokumenten beschrieben.



Jahresgeschichtete Ablagerungen in Binnenseen eignen sich hervorragend als Geoarchive zur Einordnung natürlicher Klimaschwankungen in der Vergangenheit. Partikel von drei der im Tiefen See identifizierten vulkanischen Aschen wurden auch 500 km weiter östlich in einen See in Polen gefunden. Damit ergibt sich erstmals die Möglichkeit einer jahrgenaue Synchronisierung der Seeablagerungen, so dass selbst geringfügige regionale Unterschiede im Klimawandel der Vergangenheit erkannt werden können. Mit diesen Informationen werden bessere Abschätzungen zukünftiger regionaler Auswirkungen des derzeitigen Klimawandels möglich.

Oben: Klimafloß auf dem Tiefen See (Foto: S. Lauterbach, GFZ)

Unten: Mikroskopaufnahmen vulkanischer Aschepartikel von zwei Ausbrüchen der Dyngjufjöll-Vulkanregion in Nordost-Island aus dem Tiefen See (Nordostdeutschland) und dem Czechowskie-See (Polen): der Askja-S-Ausbruch vor rund 11 000 Jahren und der Askja-AD1875-Ausbruch (Abb.: S. Wulf, GFZ)

Die besondere Herausforderung dieser Studie bestand darin, dass es sich nicht um sichtbare Lagen im Sediment, sondern um einzelne Aschepartikel in

Form vulkanischer Gläser handelt. Diese kleinen Ascheteilchen sind meist nicht größer als etwa 50 µm. Geochemische Analysen der einzelnen Partikel und deren Vergleich mit Vulkanaschen in Island erlauben im Idealfall eine genaue Bestimmung des jeweiligen Vulkanausbruchs. Darüber hinaus lässt sich mit dieser Methode das Verbreitungsmuster von Aschewolken von Vulkanausbrüchen in der Vergangenheit rekonstruieren. Das gibt einen genaueren Einblick in Windverhältnisse der Vergangenheit.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Virtuellen Instituts ICLEA (Integrated Climate and Landscape Evolution Analyses, [www.iclea.de](http://www.iclea.de)) durchgeführt und sind ein Beitrag zu dem vom GFZ koordinierten TERENO-Observatorium zur Klima- und Landschaftsentwicklung Nordostdeutschland. ■

#### Weitere Untersuchungsergebnisse in:

S. Wulf, N. Dräger, F. Ott, J. Serb, O. Appelt, E. Guðmundsdóttir, C. van den Bogaard, M. Słowinski, M. Błaszkiwicz, A. Brauer (2016): Holocene tephrostratigraphy of varved sediment records from Lakes Tiefer See (NE Germany) and Czechowskie (N Poland). - *Quaternary Science Reviews*, Vol. 132, pp. 1–14.

## Ozeanerwärmung führt zu stärkerer Meeresspiegelanstieg als bisher angenommen

Die Meeresspiegelerhöhung durch thermische Ausdehnung wirkt doppelt so stark wie die schmelzenden Eismassen grönländischer Gletscher. Dieses Ergebnis stellte ein Forscherteam unter Federführung der Universität Bonn fest. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Bonn führten zusammen mit dem GFZ und dem AWI Erdschwerefelddaten der GRACE-Satelliten und Radarhöhenmessungen des Meeresspiegels der Satelliten Jason-1 und Jason-2 zusammen.

Jeder Stoff dehnt sich bei Erwärmung aus, auch der Wasserkörper des Meeres. Dadurch steigt der Meeresspiegel an. Dieser Effekt war in den vergangenen zwölf Jahren fast doppelt so stark, wie bislang angenommen. Christoph Dahle, Leiter des wissenschaftlichen Prozessierungssystems von GRACE und GRACE-FO am GFZ, war für die GRACE-Datenanalyse verantwortlich. Eine wichtige Frage war dabei, wie man die Anteile des Meeresspiegelanstiegs voneinander trennt. Die beiden wichtigsten Anteile sind dabei die erwärmungsbedingte Ausdehnung des Wassers und die Wassermassenzunahme durch schmelzende Gletscher. Letztere

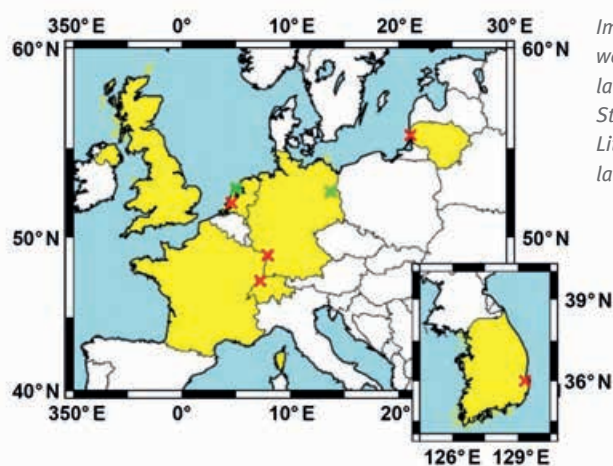
lässt sich aus den Schwerefelddaten von GRACE abschätzen, welche somit einen entscheidenden Teil zu den Untersuchungen beigetragen haben.

Ein wesentliches neues Ergebnis: In den besonders tiefen Ozeanregionen führt bereits eine geringe Erwärmung zu einem deutlichen Meeresspiegelanstieg. Ein Anstieg von mehreren Millimetern jährlich in Tiefseezonen ist keine Seltenheit. Bislang nahm man an, dass der Meeresspiegel durch die thermische Ausdehnung jährlich im Schnitt nur um 0,7 bis 1,0 mm ansteigt. Nunmehr gilt global, dass sich allein durch die Erwärmung des Wasserkörpers in den Jahren 2002 bis 2014 der Meeresspiegel um jährlich 1,4 mm an hob. Das ist ziemlich genau das Doppelte von dem, was die schmelzenden Eismassen Grönlands zur Meeresspiegeländerung beitragen. ■

#### Weitere Untersuchungsergebnisse in:

R. Rietbroek, S.-E. Brunnabend, J. Kusche, J. Schröter, C. Dahle (2016): Revisiting the Contemporary Sea Level Budget on Global and Regional Scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, DOI: 10.1073/pnas.1519132113.

## Europäische Geothermieforschung nutzt Synergien



Im europäischen Projekt DESTRESS werden standortspezifische Stimulationskonzepte entwickelt und an Standorten in Südkorea, Frankreich, Litauen, der Schweiz und den Niederlanden getestet. (Abb.: GFZ)

Im europäischen Forschungsrahmenprogramm „Horizon 2020“ wurden am GFZ drei neue Verbundprojekte im Bereich der tiefen Geothermie eingeworben. Zwei Projekte – DESTRESS und SURE – werden federführend durch die GFZ-Sektion „Geothermische Energiesysteme“ koordiniert, am Projekt GeoWell ist das GFZ als Konsortialpartner maßgeblich beteiligt. Neben der Untersuchung und Demonstration verschiedener Stimulationsverfahren in den Projekten DESTRESS und SURE, werden im Projekt GeoWell neuartige Technologien für eine sichere und effiziente geothermische Energiebereitstellung untersucht.

Im EU-Forschungsrahmenprogramm „Horizon 2020“ wurden darüber hinaus im vergangenen Jahr sechs weitere Initiativen auf dem Gebiet der Geothermie bewilligt. Zusammen mit bereits laufenden Projekten im 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) der Europäischen Kommission und weiteren national geförderten Vorhaben eröffnet diese positive Bewilligungsquote der europäischen Geothermie-Forschungscommunity die einmalige Möglichkeit, wissenschaftliche Fragestellungen komplementär und wissenschaftlich gut vernetzt zu bearbeiten.

Unter der Überschrift „SYNERGIEN“ initiierte das GFZ im März 2016 im niederländischen Utrecht eine „Geothermische Woche“, um die Zusammenarbeit und Abstimmung zwischen den Projekten und Arbeitsgruppen zu befördern. Parallel fanden die „Kick-off Meetings“ zu den Projekten DESTRESS und SURE sowie ein „Technical Meeting“ des 2013 gestarteten EU-Projekts IMAGE statt. Den Höhepunkt der Woche stellte das „Joint Geothermal Project Meeting“ dar, zu dem das GFZ die Akteure aller europäischen Geothermie-Forschungsprojekte einlud. In einem regen wissenschaftlichen Austausch wurden Querschnittsthemen identifiziert, die für das Erreichen der jeweiligen Projektziele von entscheidender Bedeutung sind und zugleich neue Optionen für projektübergreifende Aktivitäten bieten. Im Ergebnis des Treffens wurde eine Roadmap erarbeitet, die darauf zielt, den in Utrecht initiierten Erfahrungsaustausch zwischen den Projekten weiter zu intensivieren, um kontinuierlich voneinander zu lernen und die gesteckten Ziele noch effizienter zu erreichen. ■

**Weitere Informationen zu den Projekten:**  
[www.geothermalresearch.eu](http://www.geothermalresearch.eu)

**Kontakt:**  
Dr. Thomas Reinsch, GFZ-Sektion  
„Geothermische Energiesysteme“  
([thomas.reinsch@gfz-potsdam.de](mailto:thomas.reinsch@gfz-potsdam.de))

## Forschung zur saisonalen Wärmespeicherung im Untergrund

Saisonale Aquiferspeicher nutzen unterirdische Wasserreservoirs in porösen, wasserführenden Gesteinsschichten. Solche Aquifere bieten ein großes Potenzial für die jahreszeitliche Speicherung von Wärme oder Kälte. Beispielsweise kann im Sommer Wärme in diesen Gesteinsschichten gespeichert werden, um sie dann im Winter zur Wärmeversorgung zu nutzen. Zur Be- und Entladung wird die Wärme über einen Wärmeübertrager zwischen einem sogenannten kalten und einem warmen Brunnen ausgetauscht. Bereits seit dem Jahr 2000 versorgen saisonale Wärme- und Kältespeicher unterhalb des Platzes der Republik auf diese Weise die Berliner Parlamentsbauten.

Berlins Wärmeversorgung beruht derzeit fast vollständig auf fossilen Brennstoffen. Die saisonale Wärmespeicherung kann hierbei als Teil eines zukünftigen Energieversorgungskonzepts einen wesentlichen Beitrag zur Senkung des Verbrauchs fossiler Energieträger leisten. Allerdings liegen bisher nur wenig Daten zum tiefen Untergrund im Stadtgebiet von Berlin vor.

Die am 29. Februar vom GFZ begonnene Forschungs- und Erkundungsbohrung in Berlin-Charlottenburg liefert Daten für die wissenschaftliche Untersuchung des Berliner Untergrunds auf seine Eignung als Wärme- und Kältespeicher. Die Ergebnisse der Bohrung sowie die begleitenden Untersuchungen werden deshalb das Verständnis über den geologischen Aufbau des Berliner Untergrunds deutlich verbessern. Die Vertikalbohrung wird bis in eine Tiefe von etwa 530 m abgeteuft, also bis weit unterhalb der Trinkwasserschichten. Die Gesteinsproben aus der Bohrung werden vor Ort charakterisiert und in den Speziallaboren des GFZ untersucht. Zudem werden umfangreiche Bohrlochmessungen und -tests durchgeführt. Mit einem kontinuierlichen Temperaturmonitoring der Bohrung durch faseroptische Sensoren werden Daten erfasst, die Aufschluss über das Speicherverhalten geben sollen.

Die Bohrung ist Teil eines gemeinsamen Forschungsprojekts des GFZ, der TU Berlin und der Universität der Künste Berlin. Darin wird das Wissen der Fachdisziplinen Energietechnik, Geochemie und Geologie, Architektur und Städtebau zusammengeführt, um saisonale Speicherkonzepte für die Wärmeversorgung von Gebäudekomplexen und Stadtquartieren zu entwickeln. Mit der auf den Untersuchungen basierenden Erarbeitung verlässlicher Nutzungskonzepte will das Projekt zum Ausbau dieser umweltfreundlichen Technologie zur Bereitstellung der Wärmeversorgung in Ballungsräumen beitragen.

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. ■



Einbau der Verrohrung mit faseroptischem Messkabel am 9. März 2016  
(Foto: K. Erbas, GFZ)

**Weitere Informationen im Internet:**  
[www.gfz-potsdam.de/ates](http://www.gfz-potsdam.de/ates)

**Kontakt:**  
Dr. Ali Saadat, GFZ-Sektion  
„Geothermische Energiesysteme“  
([saadat@gfz-potsdam.de](mailto:saadat@gfz-potsdam.de))



## Zwanzig20-Forum Wärmewende: Öffentlicher Diskurs und Strategieentwicklung



Auf den Berliner Energietagen 2016 veranstaltete das GFZ im Rahmen des „Zwanzig20-Forums Wärmewende“ am 12. April 2016 die Session „Wärme neu gedacht!“. Mehr als 100 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Wissenschaft, Wirtschaft und Kommunen diskutierten Herausforderungen und Handlungsoptionen für eine Wärmewende.

Das vom GFZ koordinierte Forum ist Teil des BMBF-geförderten Vorhabens „Masterplan Energiewende – Wärme neu gedacht!“. Ziel ist die Entwicklung überwiegend auf Ostdeutschland ausgerichteter Strategien für den zukünftigen Einsatz innovativer Technologien zur Realisierung einer „Wärmewende“. Dabei steht eine effiziente Wärmeversorgung urbaner Räume aus heimischen, regenerativen Energiequellen im Vordergrund. In Kooperation mit Partnern aus Energiewirtschaft und Kommunen werden anhand von fünf Studien ausgewählte, lokale Integrationsansätze im Quartiersmaßstab entwickelt. Bei der Vorbereitung derartiger Demonstrationsvorhaben werden mit den technologischen Lösungsansätzen gleichzeitig die Akzeptabilität und sozio-ökonomische Rahmenbedingungen einer Markteinführung überprüft. Demonstrationsvorhaben können den beteiligten KMUs als *In-situ*-Testlabor für eigene Entwicklungen dienen und eröffnen vielfältige Möglichkeiten für Begleitforschung im Verbund. ■

### Weitere Informationen im Internet:

<http://www.gfz-potsdam.de/sektion/zwanzig20-forum-waermewende>

### Kontakt:

D. J. Acksel

GFZ-Department „Geoservices“  
([daniel.acksel@gfz-potsdam.de](mailto:daniel.acksel@gfz-potsdam.de))

## Feldexperiment zur Sole-Injektion in geologischen CO<sub>2</sub>-Speicher



Anlieferung und Zwischenspeicherung von Sole für die kontinuierliche Injektion in 630 m Tiefe, Ketzin/Havel, Oktober 2015 (Foto: T. Kollersberger, GFZ)

Mit dem erfolgreichen Abschluss eines Experiments zur Sole-Injektion endete Anfang Januar 2016 der letzte Feldversuch am Pilotstandort des GFZ zur geologischen Speicherung von CO<sub>2</sub> in Ketzin/Havel.

Von Oktober 2015 bis Januar 2016 wurde in einem Feldversuch kontinuierlich Salzwasser in das CO<sub>2</sub>-Reservoir injiziert, das sich in einer Tiefe zwischen 630 m und 650 m befindet. Insgesamt wurden knapp 2900 t Sole in den CO<sub>2</sub>-Speicher gepumpt. Die Sole besitzt eine chemische Zusammensetzung, die mit dem Salzwasser vergleichbar ist, das sich in dem Speichergestein, einer porösen Sandsteinschicht, vor Beginn der CO<sub>2</sub>-Injektion befand.

Der GFZ-Pilotstandort Ketzin beherbergt das europaweit größte Forschungsprojekt zur geologischen Speicherung des Treibhausgases Kohlendioxid. Mehr als 67000 t CO<sub>2</sub> wurden dort seit 2008 in den Untergrund gebracht, um diese Möglichkeit der Treibhausgasreduktion zu erforschen. Das eingebrachte Kohlendioxid verdrängte das salzige natürliche Porenwasser. Für eine Langzeitspeicherung ist aber davon auszugehen, dass dieses Porenwasser in das Speichergestein zurück strömt und sich mit dem eingebrachten CO<sub>2</sub> vermischt. Das Experiment simulierte im Zeitraffer diesen natürlichen Rückfluss und die damit verbundene Verdrängung des CO<sub>2</sub>. Zwei Hauptziele

wurden dabei verfolgt: Zum einen sollte bestimmt werden, wieviel des im Porenraum vorhandenen CO<sub>2</sub> durch die injizierte Sole verdrängt werden kann. Zum anderen sollte untersucht werden, welche Unterschiede zwischen der Verdrängung des Formationsfluids durch CO<sub>2</sub> während der CO<sub>2</sub>-Injektion und der Verdrängung des CO<sub>2</sub> durch Sole während der Sole-Injektion bestehen.

Die bisherigen Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass die geologische Speicherung von Kohlendioxid bei adäquater wissenschaftlicher und technischer Begleitung ein sicherer und gangbarer Weg ist. Die jetzt gewonnenen Erkenntnisse zum Verhalten von Sole und Gas sind zentrale Größen zur Beurteilung des Langzeitverhaltens und der Langzeitsicherheit eines CO<sub>2</sub>-Speichers. Mit dem Feldversuch können erstmalig die üblicherweise nur in Laborversuchen gewonnenen Daten zur residualen CO<sub>2</sub>-Sättigung unter realen Gesteinsbedingungen überprüft und validiert werden.

Die Ausbreitung der injizierten Sole und die damit einhergehende Verdrängung des gespeicherten CO<sub>2</sub> aus dem bohrlochnahen Bereich wurden im Vorfeld des Versuchs simuliert und während des Versuchs insbesondere mit Hilfe eines geoelektrischen Messsystems, das den elektrischen Widerstand des Untergrunds misst, überwacht. Dieses bereits

2007 vor Beginn der eigentlichen CO<sub>2</sub>-Injektion hinter den Bohrlochverrohrungen installierte Messnetz erlaubt Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung von Sole und CO<sub>2</sub>. Neben den geoelektrischen Messungen wurde der Feldversuch mit einer kontinuierlichen Überwachung der Druck- und Temperaturbedingungen sowohl in der Injektions- als auch in den zwei benachbarten Beobachtungsbohrungen begleitet.

Bereits zuvor war ein Experiment zur Rückförderung von CO<sub>2</sub> aus dem Speicher im Oktober 2014 erfolgreich durchgeführt worden. Mit dem aktuell laufenden Projekt namens COMPLETE wird der operative Lebenszyklus des CO<sub>2</sub>-Speichers in Ketzin beendet. Bis Ende 2017 werden sukzessive die restlichen vier Bohrungen verschlossen und das Gelände rekultiviert. Der Lebenszyklus des Speicherstandorts endet vollständig mit der Rückgabe der Verantwortlichkeit des GFZ an die Bergbehörde des Landes Brandenburg, nachdem die Integrität des Speicherkomplexes nachgewiesen wurde. Zusammen mit den Erkenntnissen aus der aktiven CO<sub>2</sub>-Injektion ermöglichen es die beiden Feldexperimente zur Rückförderung und zur Sole-Injektion, die Prozesse vor, während und nach einer CO<sub>2</sub>-Speicherung im Detail zu verstehen und die Funktionalität und Integrität des CO<sub>2</sub>-Speichers in Ketzin nachzuweisen. ■

#### Weitere Informationen zum GFZ-Pilotstandort Ketzin:

<http://www.co2ketzin.de>

## Was haben Baustoffe und die Erforschung des Mars gemeinsam?



Gipskristallstufe (Foto: A. E. S. von Driessche)

Gips kommt auf der Erdoberfläche häufig vor und hat eine große Bedeutung für die Baustoffindustrie. Neue Erkenntnisse eines internationalen Wissenschaftlerteams unter Beteiligung des GFZ und der University of Leeds zum Entstehungsprozess dieses Minerals könnten nun helfen, die Energieeffizienz bei der Nutzung von Gips als Baumaterial zu erhöhen und überdies Einblicke in hydrologische Verhältnisse auf anderen Planeten geben. Die Entstehung von Gips war bislang nicht im Detail verstanden – man sah sie als simplen, einstufigen geochemischen Prozess. Nun wurde in dieser Studie nachgewiesen, dass der Prozess vierstufig und viel komplexer ist, als bisher angenommen.

#### Die ersten Schritte sind entscheidend

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nutzten für ihre Studie hochauflösende Synchrotron basierte Röntgenaufnahmen. Damit identifizierten und quantifizierten sie die Bildungsschritte des Minerals genau. Es zeigte sich, dass die ersten Phasen des Prozesses besonders wichtig sind. Sie bestimmen die finalen Eigenschaften des Gipses. Ein besseres Verständnis dieses Prozesses kann auch dabei helfen, Baustoffe auf Gips-Basis energie- und kosteneffizienter herzustellen. Putz zum Beispiel wird der-

zeit durch die energieintensive Erhitzung von Gips hergestellt. Vermutlich ist es nun möglich, den Reaktionspfad von Gips gezielt zu beeinflussen. Beispielsweise kann die Reaktion in der ersten Phase, in der ausschließlich Nano-Bausteine geformt werden, unterdrückt werden und dadurch unmittelbar ein hochreaktiver Vorläuferstoff von Putz erzeugt werden.

#### Gips auf dem Mars

Die Erkenntnisse lassen sich womöglich auch für die Planetenforschung nutzen, denn Gips entsteht in der Natur aus wässrigen Lösungen. Es ist bekannt, dass Gips auf der Oberfläche des Mars vorkommt. Die hier vorgestellten Erkenntnisse können dabei helfen, die hydrologischen Bedingungen auf anderen Planeten zu verstehen, die zur Zeit der Entstehung des Gipses herrschten. ■

#### Weitere Untersuchungsergebnisse in:

T. Stawski, A. E. S. von Driessche, M. Ossorio, J. D. Rodriguez-Blanco, R. Beselink, L. G. Benning (2016): Formation of calcium sulfate through the aggregation of sub-3 nm primary species. - *Nature Communications*, 7:11177, DOI: 10.1038/ncomms11177.

## Kick-off Meeting für das EU-Projekt IMPREX

Vom 30. November bis zum 3. Dezember fand in De Bilt, Niederlande, das Kick-off Meeting des EU-Projekts IMPREX statt. IMPREX „IMproving PRedictions and management of hydrological EXtremes“ soll dazu beitragen, die Gesellschaft besser zu befähigen, auf zukünftige hydrologische Extremereignisse in Europa reagieren zu können.

IMPREX bearbeitet verschiedene Zeitskalen, um die kurz- bis mittelfristige Vorhersage hydrologischer Extremereignisse sowie die Verlässlichkeit von Szenarien des Klimawandels zu verbessern. Dafür werden in einem anwendungsorientierten Ansatz Kernprozesse dieser Extremereignisse in modernen Vorhersagesystemen abgebildet. Auch sollen Strategien für ein verbessertes Risikomanagement entworfen werden. Ein Kernelement des Projekts ist die regelmäßige Erstellung einer Risikovorhersage für Europa. Das GFZ trägt vor allem mit seiner Expertise auf dem Gebiet der Modellierung von Hochwasserschäden und -Risiken für Wohngebäude und Firmen zum Projekt bei.

Vertreter der 23 Mitglieder des Konsortiums aus dem öffentlichen und privaten Sektor sowie von Universitäten und Forschungseinrichtungen nahmen an dem Treffen teil. IMPREX wird koordiniert durch das Königlich Niederländische Meteorologische Institut (KNMI) und für vier Jahre im Horizon 2020-Programm der EU gefördert. ■

### Weitere Informationen zum Projekt:

<http://www.imprex.eu>

## Drei neue EU-Trainingsnetzwerke



Gleich drei neue Doktorandennetzwerke mit GFZ-Beteiligung, die Marie Skłodowska-Curie Action fellowships Innovative Training Networks (ITN), wurden von der EU-Kommission im letzten Jahr bewilligt. Nun sind die Vorbereitungsarbeiten abgeschlossen und die ITN gehen an den Start.

**System Risk:** Zum 1. Januar 2016 ist das internationale Doktorandennetzwerk „System Risk – A Large-Scale Systems Approach to Flood Risk Assessment and Management“ gestartet. Es wird am GFZ von Prof. Bruno Merz, Leiter der Sektion „Hydrologie“, koordiniert und beschäftigt sich mit dem von Hochwasserereignissen ausgehenden Risiko. 15 Doktorandinnen und Doktoranden verteilen sich auf zehn beteiligte Projektpartner, darunter neben dem GFZ das Umweltbundesamt, die University of Bristol, die Technische Universität Wien, die Universität Bologna und FutureWater BV, eine niederländische Forschungs- und Consultingfirma. Im Zentrum des Forschungsnetzwerks steht die Entwicklung eines ganzheitlichen Flut- und Wassermanagements.

**SUBITOP:** Das ITN „SUBITOP – Understanding subduction zone topography through modelling of coupled shallow and deep processes“ startete zum 1. März 2016. Koordinator ist Prof. Niels Hovius, Leiter der GFZ-Sektion „Geomorphologie“. Der wissenschaftliche Fokus bei SUBITOP liegt auf der Erforschung der Dynamik von europäischen Plattenrandsystemen, insbesondere auf dem Prozess des Recycling der Platten durch das Abtauchen ins Erdinnere, in Verbindung mit der Topographie der Erdoberfläche. Den teilnehmenden Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sollen durch alle beteiligten Partner umfassende Kenntnisse in den Bereichen Feld- und Laborarbeit sowie numerische Modellierung vermittelt werden. Am Netzwerk sind insgesamt zehn führende

europäische Zentren der Geoforschung beteiligt sowie fünfzehn Unternehmen wie beispielsweise Entwickler von Messtechniken. Innerhalb des Projekts sind 15 Stellen zu besetzen.

**MicroArctic:** Zum 1. April 2016 startete das dritte ITN, „MicroArctic – Microorganisms in Warming Arctic Environments“, mit Beteiligung des GFZ. Die Projektkoordination des ITN liegt an der Universität Bristol, UK. Kontaktpersonen am GFZ sind Prof. Dirk Wagner, Leiter der Sektion „Geomikrobiologie“ und Prof. Liane G. Benning, Leiterin der Sektion „Grenzflächen-Geochemie“. Unter der voranschreitenden globalen Erwärmung spielt die Arktis eine zunehmende Rolle im Klimasystem der Erde. Damit nimmt auch ihre strategische Bedeutung für die europäische Politik zu. MicroArctic will die nächste Generation mikrobiologischer und biogeochemischer Expertinnen und Experten ausbilden, die über ein umfassendes Verständnis der arktischen Umwelt und ihrer Lebewesen verfügen und mit den Faktoren vertraut sind, die das arktische Ökosystem beeinflussen. Neben dem Trainingsaspekt soll das ITN zum Verständnis der Veränderungen und Anpassungen arktischer mikrobieller Lebensgemeinschaften beitragen. Zwei der Nachwuchswissenschaftler sind am GFZ angesiedelt. Neben der Universität Bristol und dem GFZ sind elf weitere Einrichtungen aus Forschung und Wirtschaft an dem Netzwerk beteiligt.

EU-geförderte Innovative Training Networks (ITN) sind europäische Netzwerke zur strukturierten Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern, die noch nicht promoviert sind, mit dem Ziel, ihre wissenschaftlichen und allgemeinen Kompetenzen innerhalb eines internationalen und interdisziplinären Forschungs- und Ausbildungsprogramms zu erweitern. Im Rahmen der Projekte werden jeweils auch Trainingsmaßnahmen fachübergreifender Art angeboten. Die drei nun am GFZ angelaufenen Projekte leisten so einen bedeutenden Beitrag zur Nachwuchsförderung. ■

## Kick-off-Meeting der chilenisch-deutschen Forschungsinitiative EarthShape

Vom 4.-8. März 2016 fand in Olmuè, Chile, das Kick-off-Meeting der chilenisch-deutschen Forschungsinitiative „EarthShape – Prägung der Erdoberfläche durch Biota“ statt, die von Prof. Todd Ehlers, Universität Tübingen, und Prof. Friedhelm von Blanckenburg, Leiter der GFZ-Sektion „Geochemie der Erdoberfläche“ koordiniert wird.

Die Forschungsinitiative stellt sich dem geowissenschaftlichen Paradigma, wonach Prozesse an der Erdoberfläche in erster Linie durch Klima (Erosion) und tektonische Kräfte (Gebirgsbildung) gesteuert werden. Untersucht wird, wie Leben, insbesondere Pflanzen und Mikroben, die Erdoberfläche formt. EarthShape untersucht die Interaktion von Biologie und Topographie an vier Standorten an der chilenischen Küste, die sich als natürliches Labor anbieten. So soll auf Basis interdisziplinärer Forschung die Grundlage für ein verbessertes Verständnis der Verknüpfung von biologischen und geologischen Prozessen geschaffen werden, über traditionelle Fachgrenzen hinweg.

Die Initiative besteht aus 13 interdisziplinären Projekten, beteiligt sind 17 Doktorandinnen und Doktoranden sowie 33 deutsche und 19 chilenische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Bereichen Geologie, Ökologie, Bodenkunde, Geographie, Mikrobiologie, Geophysik und Geochemie. EarthShape, ein durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziertes Schwerpunktprogramm, ist als internationales Zentrum für die Erforschung von Erdoberflächenprozessen offen für die Zusammenarbeit mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aller Welt. ■

**Weitere Informationen:**  
<http://www.earthshape.net>

## Internationale Zusammenarbeit des GFZ

Erfolgreich fortgesetzt wurden die Bemühungen des GFZ, die wissenschaftlichen Kontakte mit **Iran** neu zu beleben. Im Rahmen eines festlichen Empfangs in der Residenz des iranischen Botschafters, H.E. Ali Majedi, in Berlin unterzeichneten Prof. Reinhard Hüttl, Wissenschaftlicher Vorstand des GFZ, und Prof. Alireza Azmoudeh Ardalan, Direktor des iranischen National Cartographic Centre (NCC) im September 2015 ein entsprechendes Kooperationsabkommen über die zukünftige Zusammenarbeit im Bereich der Umwelt- und Klimaforschung. Das breitgefächerte Instrumentarium des GFZ zur weltraumgestützten Erdbeobachtung bildet die wissenschaftlich-technologische Grundlage für die zukünftige Zusammenarbeit. Das NCC mit etwa 1000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ist in Iran für alle Forschungsaufgaben in der Geodäsie und Kartografie zuständig.

Am 27./28. Januar 2016 besuchten sechs hochrangige Wissenschaftsvertreter des Water Research Institute (WIR) und des Iranischen Ministry of Energy das GFZ, um zukünftige Perspektiven der Zusammenarbeit und gemeinsame Forschungsthemen zu erörtern. Neben der Unterzeichnung eines Memorandum of Understanding (MoU) wurden zum Thema „(Deep) groundwater resources in Iran – Exploration and integrative Management“ interdisziplinäre Forschungsansätze diskutiert, die sukzessive in bilaterale Projekte umgesetzt werden sollen.



V.l.n.r.: Prof. H. Schuh (GFZ), Prof. R. Hüttl (Wissenschaftlicher Vorstand des GFZ), Prof. A. A. Ardalan (Direktor des NCC), S.E. Botschafter Majedi während der Unterzeichnung des Memorandum of Understanding in der Residenz des Iranischen Botschafters, 21. September 2015 (Foto: GFZ)

Am 11. November 2015 fiel in Muscat, Oman, der Startschuss für die Forschungsk Kooperation zwischen dem Nationalen Forschungsrat (TRC) des **Sultanats Oman** und dem GFZ. Im Kern des vom TRC geförderten Kooperationsprojekts „Continuous hybrid cooling using geothermal and solar heat sources and underground storage systems – GeoSol-Cool“ steht die Erprobung von konstant betriebenen Kühlsystemen für Gebäude auf Basis geothermisch und solar erzeugter Wärme, gestützt durch Untergrundspeicher. Mit einer Pilotanlage in Oman soll diese hybride Technologie zur Gebäudekühlung weltweit erstmals getestet werden. Projektpartner sind das Helmholtz-Zentrum Berlin und die TU Berlin, wo die notwendigen Arbeiten zur Entwicklung der Solar- und Kühlungstechnologien durchgeführt werden.



An dem Workshop in Muscat nahmen teil: Vertreterinnen und Vertreter des Nationalen Forschungsrates Oman TRC, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universitäten Sultan Qaboos University SQU, der German University of Technology, der Sohar University, des GFZ, der TU Berlin, des Helmholtz-Zentrums Berlin sowie Industrievertreter. (Foto bereitgestellt durch: Nationaler Forschungsrat Oman, TRC)

Vom 29. bis 31. März 2016 besuchte der Wissenschaftliche Vorstand des GFZ, Prof. R. Hüttl, verschiedene Forschungseinrichtungen in **Israel**. Das GFZ unterhält seit langem eine intensive Zusammenarbeit mit israelischen Forschungseinrichtungen, wobei insbesondere die Hebräer Universität, der Israelische Geologische Dienst, GSI, und die Universität von Tel Aviv zu nennen sind. Ziel des Besuchs war es, die bestehenden Kooperationen zu festigen und weiter auszubauen. Neben hochrangigen Vertretern der o.g. Einrichtungen, traf die GFZ-Delegation daher auch den Präsidenten des Israel Institute of Technology (TECHNION), Prof. Peretz Lavie, und die Präsidentin der Israel Academy of Sciences and Humanities, Prof. Nili Cohen. Als Kick-off der Zusammenarbeit mit dem TECHNION wurde die Durchführung eines gemeinsamen Workshops/ Summer School in der zweiten Jahreshälfte 2016 verabredet.

Ähnlich wie die Länder am arabischen Golf ist auch die Region **Zentralasien** durch eine dynamische Entwicklung in Bildung und Forschung gekennzeichnet und bildet für das GFZ seit vielen Jahren eine Schwerpunktregion gemeinsamer Forschungsprojekte. Am 24./25. August 2015 fand die 8. Sitzung des Aufsichtsrats für das Zentralasiatische Institut für Angewandte Geowissenschaften (ZAIAG) in Potsdam statt. Das ZAIAG wurde 2004 als eine gemeinsame Institution vom GFZ und der Regierung **Kirgisistans** in Bischkek gegründet und hat seitdem eine Reihe wissenschaftlich-technologischer Aktivitäten in der Region angestoßen und umgesetzt.

Im Rahmen dieses Besuchs informierten sich der kirgisische Vizepremierminister Abdyrahman Mamataliev und der Minister Kubatbek Boronov vom kirgisischen Ministerium für Gefahrensituationen (Ministry of Emergency Situations, MES) am Zentrum für Frühwarnung des GFZ über die gemeinsam mit dem ZAIAG und dem MES durchgeführten Arbeiten im ACROSS-Projekt (vgl. Beitrag Parolai et al. „Auf dem Weg zur Schadensabschätzung



Teilnehmerinnen und Teilnehmer der 8. Aufsichtsratssitzung des ZAIAG am 24. August 2015: vordere Reihe von rechts: Dr. S. Schwartze (Administrativer Vorstand des GFZ), Prof. R. Hüttl (Wissenschaftlicher Vorstand des GFZ), kirgisischer Vizepremierminister A. Mamataliev und Minister K. Boronov (MES). Hintere Reihe von rechts: ZAIAG Ko-Direktoren Dr. J. Lauterjung (GFZ) und Dr. B. Moldobekov (ZAIAG; Foto: GFZ)

in Echtzeit“ in diesem Heft, S. 32) und Resultate der von der Weltbank unterstützten Risikoabschätzung in Kirgisistan.

Exemplarisch ist die von der deutschen Bundesregierung ins Leben gerufene Initiative „Water in Central Asia“ (CAWA). Diese am GFZ koordinierte Initiative hat zum Ziel, über ein gemeinsames Wassermanagement einen politischen Annäherungsprozess zwischen den Ländern Zentralasien in Gang zu setzen. Das Projekt ist Teil des sogenannten Berliner Prozesses, in dessen Rahmen sich Deutschland seit 2008 für die regionale Kooperation in Wasserfragen in Zentralasien engagiert. Ergebnisse des 2015 verlängerten CAWA-Projekts wurden anlässlich der Konferenz „Wasser und gutnachbarschaftliche Beziehungen in Zentralasien“, am 7./8. September 2015 im Auswärtigen Amt in Berlin vorgestellt, an der hochrangige Regierungsvertreter aus Kasachstan, Kirgisistan, Tadschikistan, Turkmenistan und Usbekistan teilnahmen.

Vom 16.-18. September 2015 fand in Baku, **Aserbaidschan**, ein weiterer Workshop zur Intensivierung der Zusammenarbeit mit der dortigen Akademie der Wissenschaften statt. Die 2014 auf Initiative des Wirtschafts- und Kulturrefe-



Besuch des Zentrums für Frühwarnung am GFZ. V.l.n.r.: K. Teshebaeva (GFZ), Minister K. Boronov (MES), Prof. S. Parolai (GFZ), kirgisischer Vizepremierminister A. Mamataliev, M. Pittore, PhD (GFZ; Foto: GFZ)

rats der Deutschen Botschaft in Baku gestartete Kooperation hat zum Ziel, die für Großstädte Zentralasiens entwickelte seismische Gefährdungs- und Vulnerabilitätsanalyse auf die Hauptstadt Aserbaidschans auszudehnen.

In **Russland** wurde die Zusammenarbeit mit der Vernadsky-Stiftung, eine in der UNESCO organisierte Nicht-Regierungsorganisation (NGO), vertieft. Nach dem erfolgreichen Auftaktworkshop im April 2014 am GFZ wurde im November 2015 ein unter Federführung des GFZ ausgearbeitetes MoU zwischen der Helmholtz-Gemeinschaft und der Vernadsky-Stiftung unterzeichnet. Operativ soll das MoU durch gemeinsame Forschungsprojekte, bilaterale Sommerschulen und gemeinsame Konferenzen zur „Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung“ umgesetzt werden. Am 15. März 2016 fand am GFZ dazu ein Strategietreffen und die 1. Sitzung des gemeinsamen Steering Committees statt. Die 1. bilaterale Sommerschule ist für Oktober 2016 im russischen Sotchi geplant.

An den Küsten des Indischen Ozeans lebt heute ein Drittel der Weltbevölkerung. Das GFZ ist seit vielen Jahren in der Region tätig. Insbesondere mit



Der deutsche Botschafter in Indonesien, Dr. Georg Witschel und der indonesische Minister für Wissenschaft, Technologie und Höhere Bildung, Prof. Mohamad Nasir, eröffnen die Ausstellung „Fostering Ideas“, Jakarta. Im Hintergrund die „Potsdamer Schwerekartoffel“ des GFZ, das Leitbild der Ausstellung (Foto: Dt. Botschaft Jakarta)

Universitäten und Forschungseinrichtungen **Indonesiens** bestehen bilaterale Forschungskooperationen. Nach der Entwicklung des Tsunami-Frühwarnsystems GITEWS und den Forschungen am Hochrisikovulkan Merapi, ist das GFZ derzeit federführend an der Entwicklung eines geothermischen Niedertemperatur-Demonstrationskraftwerks beteiligt, das in den dort bestehenden geothermischen Standort Lahendong/Nord-Sulawesi eingebunden werden soll. Indonesien verfügt über rund 40% der weltweit ausgewiesenen Geothermie-Ressourcen. Die GFZ-Forschungsaktivitäten in Indonesien standen im Mittelpunkt der von der Deutschen Botschaft in Jakarta und dem dortigen Goethe-Institut organisierten Ausstellung „Fostering Ideas“, die vom 5. bis 15. Oktober 2015 im Neubau des Nationalmuseums in Jakarta gezeigt wurde.

Mit der am 29. September 2014 in Edmonton, **Kanada** unterzeichneten Folgevereinbarung setzen Helmholtz-Gemeinschaft und University of Alberta ihre fachübergreifende Zusammenarbeit in einer zweiten fünfjährigen Phase (2014-2019) fort. Ein wichtiges Abstimmungsgespräch der acht an der Helmholtz-Alberta-Initiative (HAI) beteiligten Helmholtz-Zentren fand dazu im Umfeld eines gemeinsam mit der kanadischen Botschaft in Berlin ausgerichteten HAI-Symposiums am 9. September 2015 statt. Im Gesundheitsbereich soll die wissenschaftliche Zusammenarbeit in den Themenfeldern Infektionskrank-



HAI-Symposium 2015, v.l.n.r.: Prof. L. Babiuk (Vice President Research Univ. Alberta), Prof. O. Wiestler (Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft), M. Gervais-Vidricaire (Botschafterin von Kanada), Prof. R. Hüttl (Wissenschaftlicher Vorstand GFZ; Foto: GFZ)

heiten, neurodegenerative Erkrankungen und Diabetesforschung fortgeführt werden. Zu den im Rahmen der Fortsetzung in den Forschungsbereichen Energie sowie Erde und Umwelt geplanten Clusterfeldern zählen die Themen Brennstoffveredlung, Analyse und Bewertung von Energiesystemen, die Membrantechnologien, die sichere Bewirtschaftung des geologischen Untergrunds (Geothermie, Speicherung und Nutzung von CO<sub>2</sub>, Erschließung unkonventioneller Gasschiefer) und die Ökosystemforschung mit den Themen Landschaftsentwicklung, Ökotoxikologie aquatischer Systeme sowie die Ökosystem-Fernerkundung.

Vom 10. August bis zum 4. September 2015 fand der **internationale Trainingskurs** „Seismologie, Datenanalyse und

Seismische Gefährdungseinschätzung“ am GFZ statt. Der vierwöchige Kurs vermittelte theoretisches Grundlagenwissen und praktisches Training in angewandter Seismologie insbesondere an Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftler sowie Ingenieurinnen und Ingenieure aus erdbebengefährdeten Entwicklungsländern: Afghanistan, Algerien, Aserbaidschan, Bangladesch, Bulgarien, Kambodscha, China, Ägypten, Ghana, Haiti, Indien, Iran, Jordanien, Mongolei, Myanmar, Pakistan, Palästina, Südafrika, Sudan, Türkei und Zimbabwe. Der seit der Gründung des GFZ im Jahr 1992 jährlich durchgeführte Trainingskurs findet abwechselnd in Potsdam und einem Veranstaltungsort im Ausland statt. Der Kurs wird finanziell durch das Auswärtige Amt unterstützt.



Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Internationalen Trainingskurses „Seismologie und seismische Gefährdung“ stammten aus 27 Ländern. (Foto: E. Gantz, GFZ)

Am 21. September 2015 fand anlässlich der Unterzeichnung eines Memorandums of Understanding zwischen dem GFZ und dem GNS (Institute of Geological and Natural Sciences), **Neuseeland**, ein gemeinsamer Workshop zur deutsch-neuseeländischen Forschungsk Kooperation statt. Das GNS hat großes Interesse daran, deutsche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für einen längerfristigen Forschungsaufenthalt am GNS zu gewinnen. Gemeinsame Forschungsthemen sind im Rahmen der GENESYS-Initiative (German-New Zealand Collaboration in Earth SYStems Reseach) formuliert: Gashydrate, tiefe Biosphäre, globaler Kohlenstoffkreislauf, Wissenschaftliches Bohren, Paläoklima, Kohlenstoffspeichermöglichkeiten, Geothermie und Modellierung von Naturgefahren.



V.l.n.r.: Dr. L. Stroink (GFZ), Deutscher Botschafter H.-C. Freiherr von Reibnitz, Prof. R. Hüttl (Wissenschaftlicher Vorstand des GFZ), Dr. F. Schütz (GeoSolCool; Foto: GFZ)

Für das Jahr 2024 wird sich Deutschland mit der Region Berlin/Potsdam um die Ausrichtung des 37. International Geological Congress (IGC) bewerben. Der Kongress findet alle vier Jahre mit rund 8000 Teilnehmerinnen und Teilnehmern statt. Das GFZ hat die Koordination des Bewerbungsverfahrens übernommen, an dem eine Vielzahl geowissenschaftlicher Einrichtungen aus Deutschland und der Region Potsdam/Berlin (Geo.X) beteiligt sind. Über die Bewerbung wird im Herbst 2016 auf dem 35. IGC in Kapstadt, Südafrika entschieden. Deutschland war zuletzt 1885 Gastgeber dieser weltweit wichtigsten geowissenschaftlichen Fachveranstaltung. ■

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

### Weitere Besuche am GFZ

Am 5. Januar 2016 besuchte der deutsche Botschafter in Oman, Hans-Christian Freiherr von Reibnitz das GFZ. Anlass war der Start der Forschungsk Kooperation „GeoSolCool“ zwischen dem Nationalen Forschungsrat (TRC) des Sultanats Oman und dem GFZ. Der Botschafter ließ sich ausführlich über die Forschungsarbeiten am GFZ und die Oman-Kooperationen informieren. Neben GeoSolCool ist das GFZ auch im Rahmen des Internationalen Kontinentalen Tiefbohrprogramms ICDP und beim Aufbau eines Tsunami-Frühwarnsystems in Oman engagiert. Der Botschafter zeigte sich von der Forschungsvielfalt am GFZ beeindruckt und sagte zu, das Engagement des GFZ und anderer Helmholtz-Einrichtungen in Oman bestmöglich zu unterstützen.

ling Programme (ICDP) mit indischen Forschungseinrichtungen. In 2015 wurde ein Memorandum of Understanding zwischen der Helmholtz-Gemeinschaft und dem indischen Ministry of Earth Sciences unterzeichnet, an dessen Entstehen das GFZ maßgeblich beteiligt war. ■



Mitte links: Prof. R. Hüttl (Wissenschaftlicher Vorstand des GFZ); rechts daneben: Botschaftsrat R. Madhan (Indische Botschaft, Berlin; Foto: GFZ)

Am 23. März 2016 besuchte der neue Botschaftsrat für Wissenschaft und Technik in der Indischen Botschaft in Berlin, Rajachandran Madhan, das GFZ. Der Botschaftsrat informierte sich über bestehende Aktivitäten des GFZ auf dem indischen Subkontinent. Das GFZ kooperiert insbesondere in den Bereichen Gashydrat-Forschung, Erforschung des Erdmagnetfelds und im Rahmen des International Continental Scientific Drill-

# Ausgezeichnet

## Zweite Departmentdirektorin nimmt Amt auf



Zum 1. März 2016 übernahm **Prof. Charlotte Krawczyk** das Amt der Direktorin des GFZ-Departments „Geophysik“. **Prof. Michael Weber** übergab nach einer sechsjährigen Tätigkeit seit 2010 im Amt des Direktors die Geschäfte an Charlotte Krawczyk. Neben Prof. Magdalena Scheck-Wenderoth ist nunmehr eine zweite Frau Direktorin eines GFZ-Departments.

Seit Januar 2016 leitet Charlotte Krawczyk die GFZ-Sektion „Oberflächennahe Geophysik“. Die neu eingerichtete Sektion ist unmittelbar an die Sektion „Geophysikalische Tiefensondierung“ gekoppelt und befasst sich mit der grundlagenorientierten Forschung in der oberflächennahen und angewandten Geophysik.

Charlotte Krawczyk beschäftigt sich seit über 20 Jahren schwerpunktmäßig mit der Geophysik, insbesondere mit Verfahren der Seismik und deren Interpretation. Sie arbeitete zunächst im marinen Bereich, danach amphibisch und beschäftigt sich nun hauptsächlich mit Fragestellungen zum Untergrund an Land. Nach einem Studium der Physik und Geophysik und einer Dissertation an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel war Charlotte Krawczyk von 1995 bis 2007 am GFZ im Bereich der geodynamischen Erforschung von Subduktionszonen und Sedimentbecken tätig. Im Jahr 2007 wechselte sie ans Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover und folgte einem Ruf auf eine Professur an der TU Berlin im Fachgebiet Angewandte Geophysik. ■

## Wechsel in der Leitung des Departments „Geoarchive“



Zum 1. September 2015 übernahm **apl. Prof. Achim Brauer** das Direktorenmandat des GFZ-Departments „Geoarchive“ von **Prof. Bruno Merz**.

Achim Brauer ist seit 2007 Leiter der GFZ-Sektion „Klimadynamik und Landschaftsentwicklung“ im Department „Geoarchive“. Bruno Merz, der das Amt des Direktors acht Jahre seit 2007 innehatte, ist Leiter der Sektion „Hydrologie“ und des am GFZ koordinierten Observatoriums Nordostdeutsches Tiefland (TERENO-Nordost) der Helmholtz-Gemeinschaft.

Achim Brauer wurde im Jahr 2010 zum außerplanmäßigen Professor (apl.) im Fach Geologie an der Universität Potsdam ernannt. Seine Forschungsinteressen sind hochauflösende Untersuchungen von Seesedimenten für ein besseres Verständnis von natürlichen Klimaschwankungen und deren Auswirkungen auf die Landschaftsentwicklung. ■

## Neue Sektionsleitung



**apl. Prof. Monika Koch-Müller** übernahm zum 1. Oktober 2015, als vorgezogene Nachfolge von **Prof. Wilhelm Heinrich**, die Leitung der GFZ-Sektion „Chemie und Physik der Geomaterialien“.

Prof. Koch-Müller wurde im Jahr 2007 zur außerplanmäßigen Professorin (apl.) für das Fach Mineralogie an der TU Berlin ernannt. Bisher war sie am GFZ als Senior Scientist verantwortlich für das FTIR-Spektrometer-Labor (FTIR = Fourier Transform Infrarot) und das Multi-Anvil-Pressen-Labor der Sektion. Ihre Forschungsinteressen liegen in der ex-

perimentellen Simulation des Erdinnern und der Charakterisierung der dort auftretenden Geomaterialien durch spektroskopische und Röntgenverfahren. Prof. Heinrich wird bis zu seiner Pensionierung im September 2016 weiterhin als Senior Scientist in der Sektion tätig bleiben. ■

## Neue Berufungen



**Prof. Liane G. Benning**, Leiterin der GFZ-Sektion „Grenzflächen-Geochemie“, trat zum 1. April 2016 ihre W3-Professur für das Fachgebiet „Interface

Geochemie“ im Fachbereich Geowissenschaften in gemeinsamer Berufung mit der FU Berlin an. Prof. Benning konnte im Rahmen der Helmholtz-Rekrutierungsinitiative für das GFZ gewonnen werden und ist seit Oktober 2014 am GFZ tätig. Hier beschäftigt sie sich mit geochemischen Reaktionsmechanismen unter niedrigen bis hydrothermalen Temperaturen in anorganischen und biologischen Systemen. Nach ihrer Promotion an der ETH Zürich, Schweiz, im Jahr 1995 ging Liane Benning als Postdoktorandin an die Pennsylvania State University, USA. Ab 1999 war sie Wissenschaftliche Mitarbeiterin und später Dozentin an der University of Leeds, GB, wo sie 2007 zur Professorin für Experimentelle Biogeochemie ernannt wurde.



**Prof. Jens Wickert**, Senior Scientist in der GFZ-Sektion „Geodätische Weltraumverfahren“ und Sprecher des Helmholtz-Topics GPS-Atmosphären-

sondierung, trat zum 1. März 2016 seine Professur „GNSS-Fernerkundung, Navigation und Positionierung“ in gemeinsamer Berufung mit der TU Berlin an. Jens Wickert leitet verschiedene nationale und internationale Forschungsprojekte. Er ist für ein neues Experiment der Europäischen Weltraumbehörde (ESA) an Bord der Internationalen Weltraumstati-



on ISS verantwortlich, bei dem die Höhe von Ozeanoberflächen mit reflektierten GNSS-Signalen (GNSS = Global Navigation Satellite System) bestimmt wird.



**Prof. Stephan Sobolev**, Leiter der Sektion „Geodynamische Modellierung“, hat im August 2015 den Ruf auf eine W3-Professur als gemeinsame Berufung von Universität Potsdam und GFZ angenommen.

Stephan Sobolev unterrichtet an der Universität das Fach „Fortgeschrittene Geodynamik“. Seit 1997 ist Stephan Sobolev am GFZ tätig, seit 2007 ist er Sektionsleiter. Prof. Sobolev ist ein international führender Forscher auf dem Gebiet der Modellierung von geologischen Prozessen. Das Hauptmerkmal seines wissenschaftlichen Ansatzes ist eine multidisziplinäre Kombination aus Geophysik, Geochemie und Geodynamik mit innovativen physikalischen und mathematischen Modellierungstechniken.



**Prof. Joachim Wächter**, Leiter des „Zentrums für GeoInformationstechnologie CeGIT“ am GFZ, ist im Dezember 2015 als Honorarprofessor an

das Institut für Informatik und Computational Science der Universität Potsdam bestellt worden. Joachim Wächter ist promovierter Geologe und beschäftigt sich seit 1988 mit dem geowissenschaftlichen Daten- und Informationsmanagement, beispielsweise baute er das Informationssystem für die Daten des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB) auf. Seit 1992 ist Joachim Wächter in unterschiedlichen Positionen für die IT-Entwicklung am GFZ zuständig. In seiner Forschungsarbeit an der Universität Potsdam vertritt Prof. Wächter die Fachrichtung „Geodateninfrastrukturen“.

**Prof. Torsten Sachs**, Leiter der Helmholtz-Nachwuchsgruppe TEAM, trat im Januar



2016 in einer gemeinsamen Berufung von TU Braunschweig und GFZ eine Stelle als Juniorprofessur für Atmosphärenphysik an. Die Forschung von

Torsten Sachs befasst sich mit klimarelevanten Wechselwirkungen zwischen Erde und Atmosphäre. Mit seiner Helmholtz-Nachwuchsgruppe konzentriert er sich dabei auf den Austausch von Wärme, Wasser(dampf) und Treibhausgasen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) an der Schnittstelle der Atmosphäre mit Hydro-, Bio-, und Lithosphäre. ■

### Yuri Shprits übernimmt Arbeitsgruppenleitung am GFZ



Zum 1. März 2016 übernahm **Prof. Yuri Shprits** in der GFZ-Sektion „Erdmagnetfeld“ die Leitung einer Arbeitsgruppe zur Magnetosphärenphysik.

Prof. Shprits konnte im Rahmen der Helmholtz-Rekrutierungsinitiative für das GFZ gewonnen werden. Eine gemeinsame Berufung mit der Universität Potsdam wird realisiert.

Sein wissenschaftliches Interesse liegt auf der Dynamik der Population energetischer Partikel im erdnahen Weltraum, die auch ein Risiko für Satelliten und die bemannte Raumfahrt darstellen. Er bearbeitet am GFZ die Themen Weltraumwetter, Modellierung der Weltraumumgebung, Weltraumbeobachtung und Datenassimilation. Yuri Shprits erhielt seine Doktorwürde im Jahr 2005 an der University of California, Los Angeles (UCLA) und arbeitete dort sowie auch am Skoltech/Russland und am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Im Jahr 2012 wurde er von US-Präsident Barack Obama mit dem Presidential Early Career Award for Scientists and Engineers (PECASE) ausgezeichnet, der höchsten Auszeichnung, die die US-Regierung einem Wissenschaftler am Beginn seiner Karriere verleihen kann. ■

### Neuer Leiter der ÖA



Zum 1. April 2016 nahm **Josef Zens** seine Arbeit als Leiter der Öffentlichkeitsarbeit des GFZ und Pressesprecher auf. Der

aktuelle Leiter der GFZ-Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, **Franz Ossing**, scheidet nach 22 Jahren in dieser Position im Juli 2016 altersbedingt aus. In dieser Übergangszeit bis zum Sommer wird die GFZ-Öffentlichkeitsarbeit von beiden verantwortet. ■

### EGU ehrt GFZ-Wissenschaftler

Auf der Jahresversammlung der Europäischen Geowissenschaftlichen Vereinigung EGU in Wien wurden am 20. April 2016 fünf GFZ-Wissenschaftler geehrt.



**Prof. Niels Hovius**, Leiter der GFZ-Sektion „Geomorphologie“, erhielt die *Ralph Alger Bagnold-Medaille*. Die Ehrung würdigt seine herausragenden

Leistungen im Feld der Geomorphologie. Niels Hovius gilt als einer der weltweit führenden Erdoberflächen-Wissenschaftler. Mit der Medaille sollen neben seiner geowissenschaftlichen Arbeit auch seine besonderen Leistungen in den Bereichen Wissenschaftskommunikation und interdisziplinärer Austausch herausgestellt werden. Die EGU ehrt Hovius als eine „Schlüsselfigur der europäischen Geomorphologie“. Nach einem Studium der Physischen Geographie und Geowissenschaften in Utrecht, Niederlande, promovierte er in Oxford, GB. Bevor er 2012 ans GFZ kam, lehrte er 13 Jahre an der University of Cambridge. Niels Hovius ist Gründungsherausgeber der open access Fachzeitschrift *Earth Surface Dynamics* und war Vorsitzender im Outreach Committee der EGU.

Die Nachwuchswissenschaftler **Dr. Animesh Kumar Gain**, Humboldt-Forschungsstipendiat in der GFZ-Sektion „Hydrologie“, und **Christopher Otto**, GFZ-Sektion „Fluidsystemmodellierung“, wurden als exzellente Nachwuchswissenschaftler ausgezeichnet. Animesh Kumar Gain wird der *Outstanding Young Scientist Award* der Natural Hazard Division für 2016 verliehen, Christopher Otto nahm den *Outstanding Student Poster Award* der EGU entgegen, der ihm auf der Jahresversammlung 2015 verliehen wurde. Ebenso erhielt **Janek Dreibrodt** den *Outstanding Student Poster Award* der EGU 2015. Zur Zeit der Preisverleihung war er Doktorand der GFZ-Sektion „Hydrologie“.

Zudem erhielt **Odin Marc**, Doktorand in der GFZ-Sektion „Geomorphologie“, auf der EGU den *Jean-Claude Flageollet Award 2016* für seine Forschungsarbeiten im Rahmen seiner Dissertation „Interactions between erosion and tectonics at the scale of the earthquake cycle“. Mit der in diesem Jahr erstmals verliehenen Auszeichnung würdigt das European Centre on Geomorphological Hazards (CERG) herausragende Forschungsarbeiten von Doktorandinnen und Doktoranden zu geomorphologischen Naturgefahren. ■

## Auszeichnungen für GFZ-Wissenschaftler auf der GeoBerlin 2015

Im Rahmen der Jahrestagung der Deutschen Geologischen Gesellschaft – Geologische Vereinigung V. (DGGV) während der GeoBerlin 2015, wurde **Prof. Onno Oncken** in Würdigung seiner exzellenten wissenschaftlichen Beiträge zur Geodynamik, zu globaltektonischen Prozessen und zur Quantifizierung geotektonischer Prozesse, am 6. Oktober 2015 in Berlin die Gustav-Steinmann-Medaille verliehen. Die Vereinigung hat zum Gedächtnis ihres Begründers die Gustav-Steinmann-Medaille gestiftet. Sie wird an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verliehen werden, die sich besondere Verdienste um die Ziele der Vereinigung erworben haben. Die Verleihung erfolgte auf einstimmigen Beschluss des Gesamtvorstandes der DGGV.

Ebenso wurden zwei GFZ-Nachwuchswissenschaftler, **Eleanor Berryman** und **Benedikt Soja**, auf der GeoBerlin 2015 am 6. Oktober 2015 geehrt. Sie erhielten den Bernd Rendel-Preis, mit dem die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG jährlich vielversprechende Nachwuchs-Geo-



Dr. H.-J. Franzke, Prof. R. Gaupp (DGGV-Vorsitzender), Prof. O. Oncken (v.l.n.r.), Foto: F. Alberg, GFZ)

wissenschaftlerinnen und -wissenschaftler ausgezeichnet, deren Forschung über internationales Potenzial verfügt und die noch nicht promoviert sind. Kriterien für die Auszeichnung sind die Qualität und Originalität einer Forschungsarbeit, die noch nicht abgeschlossen sein muss.

Eleanor Berryman, Doktorandin in der GFZ-Sektion „Chemie und Physik der Geomaterialien“, wird für ihre experimentellen Arbeiten zum Mineral Turmalin als einem Indikator der Gesteinsbildung ausgezeichnet. Der Doktorand Benedikt Soja, GFZ-Sektion „Geodätische Welt-raumverfahren“, erhält den Preis für seine Arbeit auf dem Gebiet der geodätischen Radiointerferometrie (Very Long Baseline Interferometry). ■

## Queen würdigt Jury des Queen Elizabeth Prize for Engineering

Am 26. Oktober 2015 wurde in London zum zweiten Mal der Queen Elizabeth Prize for Engineering (QE-Preis) vergeben. Der mit 1 Mio. britischen Pfund dotierte Preis würdigt unter Schirmherrschaft von Königin Elizabeth II weltweit herausragende Leistungen auf dem Feld der Ingenieurwissenschaften. Den QE-Preis 2015 gewann der US-amerikanische Chemieingenieur Prof. Robert S. Langer.

Eine international besetzte Jury trifft aus den Bewerbungen eine Auswahl und empfiehlt diese der Queen Elizabeth Prize for Engineering Foundation. HM Queen Elisabeth II würdigte **Prof. R. Hüttl**, wissenschaftlicher Vorstand des GFZ und



Links: HM Queen Elisabeth II und Jurymitglied Prof. R. Hüttl (Foto: HM The Queen and British Ceremonial Arts). Rechts: Vorder- und Rückseite der Jurorenmedaille (Fotos: E. Gantz, GFZ)



Präsident der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften acatech, als Mitglied der Jury auf dem Abendempfang im Buckingham Palace mit einer Medaille. ■

## DGG-Vortragspreis für GFZ-Doktoranden

Auf der 76. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft DGG in Münster erhielt **Ingo Dressel**, Doktorand in der GFZ-Sektion „Sedimentbeckenmodellierung“, am 14. April 2016 den Preis für den besten studentischen Vortrag. Der Titel seines Vortrags lautete: „Comparison between the post-rift subsidence evolution of the Colorado Basin, SE South America, and the Orange Basin, SW Africa“. ■

## Dr. Lauterjung in Beirat „Zivile Krisenprävention“ berufen

Auf Vorschlag des Staatsministers im Auswärtigen Amt, Michael Roth (MdB), wurde **Dr. Jörn Lauterjung**, Direktor des GFZ-Departments „Geoservices“ am GFZ, im September 2015 in den Beirat „Zivile Krisenprävention“ berufen. Der Beirat ist Teil der durch den Aktionsplan aus dem Jahr 2004 nach dem verheerenden Tsunami im Indischen Ozean geschaffenen nationalen Struktur der zivilen Krisenprävention und soll die Einbeziehung der zivilgesellschaftlichen Expertise in

die krisenpräventive Politik der Bundesregierung sichern. Mit seinem breiten Teilnehmerspektrum aus verschiedenen Bereichen spiegelt der Beirat die im Aktionsplan genannten Handlungsfelder ziviler Krisenprävention wider. ■

## Zwei GFZ-Wissenschaftlerinnen in Fachkollegien der DFG gewählt



In der DFG-Fachkollegienwahl 2015 wurden **Prof. Scheck-Wenderoth**, Direktorin des GFZ-Departments „Geotechnologien“, und **apl. Prof. Koch-Müller**, Leiterin der GFZ-Sektion „Chemie und Physik der Geomaterialien“, für vier Jahre in die Fachkollegien der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gewählt. Magdalena Scheck-Wenderoth ist mit 307 Stimmen auf Platz 1 in das Fachkollegium „Geologie und Paläontologie“ gewählt, das aus acht Mitgliedern besteht, Monika Koch-Müller mit 192 Stimmen auf Platz 4 des aus fünf Personen bestehen-

den Fachkollegiums „Geochemie, Mineralogie und Kristallographie“. Für Frau Koch-Müller ist es die zweite und damit letzte Amtszeit.

Die Fachkollegien der DFG bewerten eingehende Förderanträge von Forschungsvorhaben und kontrollieren die Wahrung einheitlicher Maßstäbe bei der Begutachtung. Außerdem beraten sie die Weiterentwicklung und Ausgestaltung der DFG-Förderprogramme. Insgesamt haben 48 604 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an der Wahl teilgenommen und ihre bis zu sechs Stimmen auf 1707 Kandidierende verteilt. ■

## Ausgezeichnete Ausbildungsförderung am GFZ



Die Industrie- und Handelskammer IHK Potsdam zeichnete am 7. April 2016 im Rahmen einer Festveranstaltung alle Ausbildungsbetriebe, die seit 2013 Jugendliche ins europäische Ausland entsendet haben, mit der „Euroapprenticeship“-Plakette aus. Schon seit 2009 entsendet das GFZ ausgewählte Auszubildende ins europäische Ausland.

Das GFZ engagiert sich seit vielen Jahren in besonderem Maß im Bereich der Berufsausbildung. Es wurden insgesamt neun verschiedene Ausbildungsberufe angeboten: Physikalaborant/in, Chemielaborant/in, Elektroniker/in für Geräte und Systeme, Fachinformatiker/in – Anwendungsentwicklung oder Systemintegration, Industriemechaniker/in, Fachangestellte/r für Medien- und Informationssysteme – Bibliothekar/in, Bürokauffrau/mann sowie Geomatiker/in. Im Rahmen des „Brandenburgischen Ausbildungskonsenses“ wurde das GFZ bereits im Jahr 2013 von der IHK Potsdam

als „Anerkannter Ausbildungsbetrieb“ ausgezeichnet und damit für seine überdurchschnittlichen Ausbildungsleistungen geehrt. ■



Auszubildende am GFZ (Foto: E. Gantz, GFZ)

# Bücher und Medien



## Grundlagen der Geophysik – Lecture Notes

Das Buchprojekt „Grundlagen der Geophysik – Lecture Notes“ wurde im Rahmen mehrjähriger Vorlesungen an den Universitäten Frankfurt, Hamburg und Potsdam entwickelt. In den Lecture Notes wird eine breite Einführung in die Grundlagen der Geophysik, von der großskaligen, globalen Geophysik bis zur kleinskaligen oberflächennahen und angewandten Geophysik gegeben.

Die ersten Kapitel umfassen die Entstehung der Erde und der Planeten, den inneren Aufbau und die Dynamik der Erde inklusive der modernen Sicht der globalen Plattentektonik, des Wärmehaushalts und des Geodynamos der Erde. Die klassischen Themen der Geophysik wie die angewandte Gravimetrie, Geomagnetik, elektrische, elektrodynamische und seismische Verfahren werden im zweiten Teil des Buchs in Theorie und Praxis eingeführt, ebenso wie die Seismologie und die Beschreibung von Erdbeben.

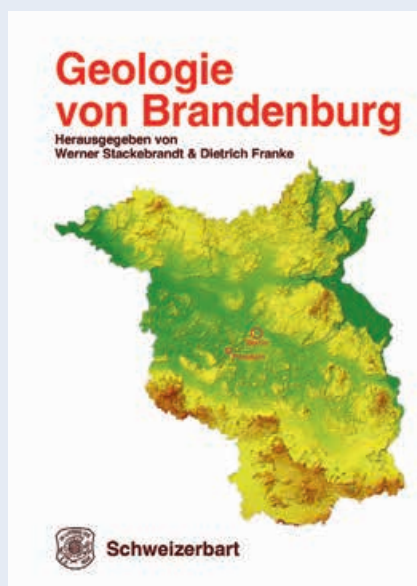
Das Lehrbuch richtet sich primär an Studierende der Geowissenschaften, Geophysik und Physik, ist aber auch für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie die interessierte Öffentlichkeit als Nachschlagewerk gedacht.

Die Veröffentlichung steht als frei verfügbare PDF-Datei unter der Creative Commons-Lizenz BY-SA zur Verfügung, ebenso wie Front und Rückseite für einen Print on Demand-Auftrag. ■

Dahm, T. (2015): Grundlagen der Geophysik – Lecture Notes, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 332 p., DOI: [doi.org/10.2312/GFZ.2.1.2015.001](https://doi.org/10.2312/GFZ.2.1.2015.001)

### Kontakt:

Prof. Dr. Torsten Dahm, Leiter der GFZ-Sektion „Erdbeben- und Vulkanphysik“  
E-Mail: [torsten.dahm@gfz-potsdam.de](mailto:torsten.dahm@gfz-potsdam.de)  
Tel. +49 331 288-1200



## Geologie von Brandenburg

Werner Stackebrandt, Dietrich Franke (Hrsg.)  
Schweizerbart, Stuttgart, 2015, 805 S.  
ISBN 978-3-510-65295-2  
Preis: 89.90 €

### Über das Buch schreibt der Verlag::

Das umfangreiche Werk beschreibt detailliert – auf neuestem Stand – Geologie, Tektonik und Rohstoffvorkommen (Wasser, Steine und Erden, Braunkohle, Erdwärme, Kohlenwasserstoffe, Stau- und Speicherpotenziale, Kupfer und Silber) des Landes Brandenburg. Es subsummiert wesentliche Forschungsergebnisse, die seit Erscheinen des gleichnamigen Buchs von Hücke (1922) gewonnen wurden, darunter auch die Ergebnisse tausender Bohrungen (bis zu 7000 m tief) und komplexer geophysikalischer Untersuchungen, die im Wesentlichen zu DDR-Zeiten durchgeführt (aber nicht veröffentlicht) wurden. Diese erbrachten nicht nur neue Daten über den Aufbau in der Tiefe, sondern tragen auch maßgeblich zur Bewertung oberflächennaher und tiefer Ressourcen bei.

Schwerpunkthemen des Buchs sind: Quartär, Tertiär, Strukturentwicklung des Norddeutschen Beckens und seines variszischen Unterbaus, Rohstoff- und Ressourcenpotenzial, die junge Landschaftsgenese und Verbreitung der Böden.

Die fünfzig Fachautoren dieses Bandes greifen den Kenntnisstand auf, führen ihn mit neuesten Forschungsergebnissen zusammen und integrieren ihn in die Geologie Mitteleuropas. Mehr als 250 meist farbige Abbildungen erleichtern das Verständnis und den schnellen Einstieg in die vielseitige und gleichzeitig komplexe Geologie Brandenburgs. Selbstverständlich wird hierbei die Geologie von Berlin nicht ausgespart. ■

## Aktuelle Scientific Technical Reports des GFZ

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

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

### Bibliothek des Wissenschaftsparks

#### Albert Einstein

Telegrafenberg A17  
14473 Potsdam  
Fax: 0049-0331-288-1914  
E-Mail: [bib@gfz-potsdam.de](mailto:bib@gfz-potsdam.de)

ISSN: 2190-7110

**Lott, F., Al-Qaryouti, M., Corsmeier, U., Ritter, J. (2016):**

**Dead Sea Seismic Array, Jordan for DESERVE Project (Feb. 2014 - Feb. 2015) – Report**

Scientific Technical Report STR – Data; 16/01; GIPP Experiment- and Data Archive, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, 10 p.

DOI: [doi.org/10.2312/GFZ.b103-16011](https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-16011)

**Ullah, S., Parolai, S., Pittore, M. (2016):**

**A report on site effects studies in Kyrgyzstan**

Scientific Technical Report STR; 16/02, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, 22 p., engl. Ausgabe

DOI: [doi.org/10.2312/GFZ.b103-1602en](https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-1602en)

**Pittore, M., Parolai, S. (2016):**

**Report on residential exposure and seismic vulnerability in Kyrgyzstan**

Scientific Technical Report; 16/03, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, 32 p.

DOI: [doi.org/10.2312/GFZ.b103-1603en](https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-1603en)

**Отчет исследований сайт-эффектов в Кыргызстане**

Scientific Technical Report STR; 16/02, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, 29 p., russ. Ausgabe

DOI: [doi.org/10.2312/GFZ.b103-1602ru](https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-1602ru) ■



## System Erde. GFZ-Journal (2016) Jahrgang 6, Heft 1

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

### Die vielfältigen Anwendungsfelder der Seismologie

*Frederik Tilmann 6-11*

### Seismisches Abbilden von Krustenstrukturen

*Klaus Bauer, Trond Ryberg, Benjamin Braeuer,  
Christian Haberland, Michael Weber 12-17*

### Die Streuung des globalen seismischen Wellenfelds

*Christoph Sens-Schönfelder und Roel Snieder 18-23*

### Neue Einsichten in den Ablauf großer Erdbeben

**Kombination innovativer Analyseverfahren erlaubt Rekonstruktion von Bruchverläufen**

*Frederik Tilmann, Bernd Schurr, Simone Cesca, Torsten Dahm,  
Joachim Saul, Mauro Palo, Marcos Moreno, Jonathan Bedford,  
Onno Oncken, Rongjiang Wang, Yong Zhang 24-31*

### Auf dem Weg zur Schadensabschätzung in Echtzeit

**Dezentralisierte regionale und Vor-Ort-Frühwarnung in ACROSS**

*Stefano Parolai, Tobias Boxberger, Marco Pilz, Dino Bindi,  
Massimiliano Pittore, Marc Wieland, Kevin Fleming,  
Michael Haas, Adrien Oth, Claus Milkereit, Torsten Dahm,  
Jörn Lauterjung 32-37*

### Dynamische und hochauflösende Aktivitätsvorhersagen und Folgenabschätzung von Erdbeben

*Danijel Schorlemmer, Sebastian Hainzl, Arno Zang,  
Fabrice Cotton 38-43*

### Historische Seismologie

**Schlüssel für verlässlichere Daten zur Abschätzung der Erdbebengefährdung**

*Konrad Schellbach und Gottfried Grünthal 44-49*

### Von der Gesteinsprobe bis zur Plattengrenze:

**Skalenübergreifende Analyse von Bruchprozessen**

*Marco Bohnhoff, Grzegorz Kwiatek, Georg Dresen 50-55*

### Vom Flüstern, Raunen und Grollen der Landschaft

**Seismische Methoden in der Geomorphologie**

*Jens M. Turowski, Michael Dietze, Anne Schöpa, Arnaud Burtin,  
Niels Hovius 56-61*

### Vulkaneismologie – ein Blick ins Innere der Vulkane

*Torsten Dahm, Eleonora Rivalta, Thomas R. Walter, Sebastian Heimann, Birger-Gottfried Lühr, Philippe Jousset 62-67*

### Trends in seismologischer Instrumentierung

*Christian Haberland, Rüdiger Giese, Jan Henninges,  
Karl-Heinz Jäckel, Philippe Jousset, Stefan Lüth,  
Thomas Reinsch, Trond Ryberg 68-73*

