

# System Erde

GFZ-Journal

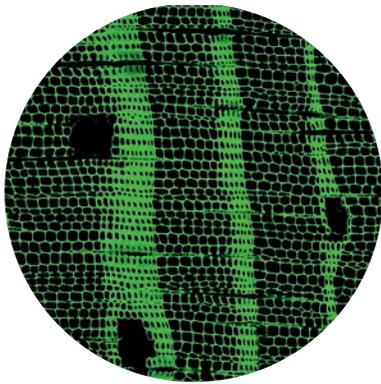
**GFZ**

Helmholtz-Zentrum  
**POTS DAM**

2019 – Heft 1

SCHWERPUNKT

Deutschland  
im Fokus



### **Titel:**

*Mikroskop-Foto vom Stammholz einer Kiefer aus NO-Deutschland. Der Ausschnitt zeigt die Jahrringe 1974 bis 1976 (von links nach rechts), wobei 1975 und besonders 1976 sehr schmal sind. Beides waren trockene Jahre ähnlich dem Extremjahr 2018. Das Foto wurde mit einem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop (CLSM) am GFZ erstellt und mit neuen Zellanalysemethoden untersucht, die im Rahmen von TERENO und ICLEA neu entwickelt wurden (siehe Beitrag von Heinrich et al. in diesem Heft).*

### **Über „System Erde“**

Mit dem Journal „System Erde“ berichtet das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ über die unterschiedlichen Facetten seiner Forschungsarbeiten. Die Reihe richtet sich vor allem an Entscheidungsträger in Wissenschaft, Gesellschaft und Politik, an interessierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie an die fachinteressierte Öffentlichkeit.

### **Impressum**

**Herausgeber:**

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

Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

**Redaktion:**

Dr. Dietlinde Friedrich (Koordination)  
Dr. Oliver Bens  
Josef Zens (V.i.S.d.P.)

**Layout:**

Grit Schwalbe, GFZ

**Druck:**

ARNOLD group, Großbeeren

Potsdam, Juni 2019  
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



Liebe Leserinnen und Leser,

in Deutschland macht man sich gemeinhin wenig Sorgen um Naturkatastrophen. Das hat mehrere Gründe: Zum einen liegt unser Land in einer gemäßigten Klimazone, es ist zum anderen geologisch gesehen recht ruhig. Drittens sind wir dank Wissenschaft und Forschung sowie unserer Wirtschaftskraft in der Lage, Krisen rasch zu bewältigen.

Der vierte Grund ist weniger erfreulich: Wir haben ein kurzes Gedächtnis. Anfang des 20. Jahrhunderts gab es ein schweres Erdbeben in der Nähe von Albstadt in Baden-Württemberg. Damals teilte man die Bebenstärke noch nicht in Skalenwerte ein, aber nach heutigen Schätzungen dürfte das 1911er Beben etwa die Magnitude 6,1 gehabt haben. Und 1951 bebte es bei Euskirchen mit einer Magnitude von 5,8 – Schornsteine und Dächer stürzten ein, in Köln flüchteten sich Menschen in Luftschutzbunker. Es gab mehrere Verletzte.

Was Wetterextreme betrifft, haben wir alle den Dürre- und Hitzesommer 2018 noch sehr gut im Gedächtnis. Aber wer erinnert sich an die Jahre 1975 und 1976, als zwei extreme Trockenjahre hintereinander auftraten und Landwirtschaft und Wälder massiv litten? Oder an die große Sturmflut von Hamburg im Jahr 1962 mit mehr als 300 Toten?

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Konsequenzen aus Naturgefahren zu mildern, unseren Lebensraum vor dem Hintergrund des globalen Wandels zu bewahren und Energie und Ressourcen für künftige Generationen zu sichern. Das sind große gesellschaftliche Herausforderungen weltweit, aber eben auch in Deutschland.

Wie etwa stellen wir unter den Bedingungen der Energiewende und des Ausstiegs aus der Atomenergie sicher, dass wir genügend Wärme und Strom zur Verfügung haben? Dass wir Energie aus „Erneuerbaren“ auch speichern können? Wie schützen wir unsere Bürgerinnen und Bürger vor Erdfällen und weisen sie auf die Erdbebengefährdung hin, die in einigen Regionen Deutschlands nicht unerheblich ist?

Antworten auf viele dieser Fragen finden Sie in der vorliegenden Ausgabe der Reihe „System Erde“ mit dem Fokus auf Deutschland. Hier finden Sie nacheinander Beiträge zur Energieversorgung über Geothermie, zur Nutzung des geologischen Untergrunds als Speicher für Stoffe, zur Erforschung von Salzkavernen, zur Erdbebengefährdung und zu Erdfällen sowie zum Extremjahr 2018. Aus den Beiträgen (und dem Titel unserer Journalreihe) wird deutlich, wie wir uns als Helmholtz-Zentrum mit der Erde als System befassen und wie wir nach Lösungen für die „Grand Challenges“ suchen.

Eine informative Lektüre wünschen Ihnen

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Reinhard F. Hüttl'.

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

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Stefan Schwartze'.

Dr. Stefan Schwartze  
Administrativer Vorstand



## Inhalt

6

### Geothermie in urbanen Räumen Thermische Untergrundspeicherung und Tiefe Geothermie in Deutschland

*Guido Blöcher, Thomas Reinsch, Simona Regenspurg, Jan Henniges, Maren Brehme, Ali Saadat, Stefan Kranz, Maximilian Frick, Angela Spalek, Ernst Huenges*

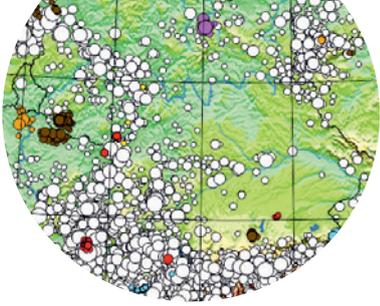
14

### Nutzung des geologischen Untergrunds zur stofflichen Speicherung

*Cornelia Schmidt-Hattenberger, Stefan Lüth, Dennis Rippe, Bernd Wiese, Peter Pilz, Johannes Hierold, Martin Zimmer, Michael Kühn*

## 48 Netzwerk

- |    |  |    |  |
|----|--|----|--|
| 48 | REKLIM-Regionalkonferenz am GFZ  | 54 | Satellitenumlaufbahnen per Laser bestimmen               |
| 50 | Mit MOSES auf der Spur von kurzzeitigen Ereignissen und langfristigen Trends | 54 | Warum sich Teheran gefährlich absenkt                    |
| 51 | Erster Nachweis von Regen über dem Ozean durch Navigationssatellitenx        | 56 | Wie viel Schutt liegt auf Gletschern?                    |
| 52 | Ein neuer Rahmen für den Himmel  | 57 | Gletschersee stürzt talwärts – und Seismometer hören mit |
| 53 | „Radiance Light Trends“ zeigt Veränderungen der Lichtemissionen weltweit     | 58 | Erdbeben in Superzeitlupe                                |



20

### Wo Salz, Wasser und Gas sich treffen – Kavernenrandbereiche unter Tage und unter der Lupe im Forschungsprojekt ProSalz

*Bettina Strauch, Julia Arndt, Johannes Barth, Rüdiger Giese, Michael Kühn, Anssi Myrntinen, Heike Richter, Svenja Steding, Martin Zimmer, Axel Zirkler*

26

### Erdbebengefährdung Deutschlands – neu bewertet für aktuelle Baunorm

*Gottfried Grünthal, Dietrich Sromeyer, Christian Bosse, Fabrice Cotton, Dino Bindi*

32

### Wenn Gesteine sich auflösen: Erdfallstrukturen in Deutschlands Untergrund

*Charlotte M. Krawczyk, Samira Maghsoudi, Djamil Al-Halbouni*

38

### Regionale Auswirkungen des Globalen Wandels: Der Extremsommer 2018 in Nordostdeutschland

*Ingo Heinrich, Daniel Balanzategui, Oliver Bens, Theresa Blume, Achim Brauer, Elisabeth Dietze, Pia Gottschalk, Andreas Güntner, Katharina Harfenmeister, Gerhard Helle, Christian Hohmann, Sibylle Itzerott, Knut Kaiser, Susanne Liebner, Bruno Merz, Sylvia Pinkerneil, Birgit Plessen, Torsten Sachs, Markus J. Schwab, Daniel Spengler, Claudia Vallentin, Christian Wille*

- 59 Tiefe Erdbeben weisen auf Aufstieg magmatischer Fluide unter dem Laacher See hin
- 60 Erdbebenwellen können Vulkane auch dämpfen
- 61 Spurensuche eines extremen Klimawandels
- 62 Natürliche „Batterien“ machten Mars organisch
- 63 Geothermisches Niedertemperatur-Demonstrationskraftwerk an indonesische Partner übergeben

- 63 Grundsteinlegung für Laborneubau
- 64 Bundesministerin Karliczek und Landesministerin Münch auf dem Telegrafenberg

### 65 **Ausgezeichnet**

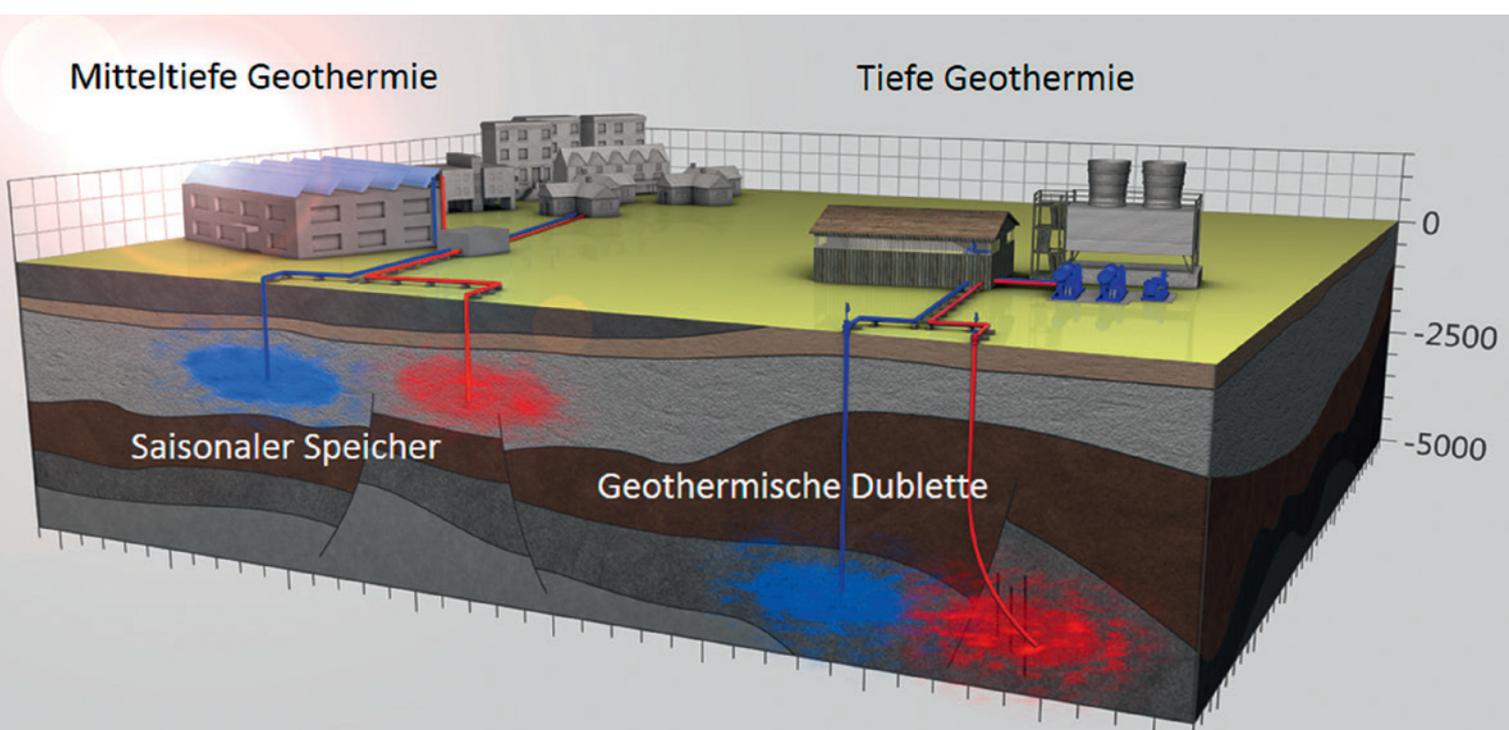
# Geothermie in urbanen Räumen

## Thermische Untergrundspeicherung und Tiefe Geothermie in Deutschland

Guido Blöcher, Thomas Reinsch, Simona Regenspurg, Jan Henniges, Maren Brehme, Ali Saadat, Stefan Kranz, Maximilian Frick, Angela Spalek, Ernst Huenges  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The demand for heat generation based on renewable energies has become increasingly important during the last decades, especially in urban areas. Geothermal energy, the heat stored in the upper part of the Earth's crust, offers a huge but largely untapped potential. Specifically, the use of near-surface geothermal energy increased significantly in Germany. Medium and deep geothermal energy systems provide a wide range of applications for environmentally friendly, large scale heat provision. Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems, for example, offer great potential for heat supply in major cities (Fig. below, left). A case study, led by GFZ, investigated the potential of an ATES system in the centre of Berlin. The research well Gt BCh 1/2015 on the campus of the Technical University of Berlin was established, geologically characterized, and hydraulically tested.*

*Deep geothermal systems play another important role within the future energy supply. In hydrothermal systems, direct use or conversion of extracted heat to electricity can be obtained at economically feasible costs (Fig. below, right). These resources, however, are limited in most countries due to local geological conditions. Nonetheless, sufficient heat in place is encountered in other geological settings such as the so called "petrothermal" systems, which could cover the heat demand for centuries. However, the initial productivity of these systems is often too low for an economically viable utilization. Further research and demonstrators are needed to improve the efficiency and sustainability of geothermal energy systems. Groß Schönebeck, the geothermal research site of the GFZ, has been established as a research platform for technology development and process understanding in order to achieve a broader spectrum of technical solutions for using this domestic form of energy.*



Der deutsche Wärmemarkt, der mehr als die Hälfte des Gesamtenergiebedarfs ausmacht, wird aktuell fast ausschließlich über fossile Energieträger bedient. Um die Treibhausgasemissionen weltweit bis 2050 um 40 % bis 70 % im Vergleich zum Jahr 2010 zu reduzieren (Vereinbarung des G7-Gipfels von 2015), müssen verlustreiche Energietransportwege vermieden werden. Die Nutzung innerstädtischer Wärmequellen, wie z. B. Erdwärme (Geothermie), wird daher zukünftig eine große Rolle spielen. Am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ werden Konzepte zur innerstädtischen Erkundung und Erschließung tiefer geothermischer Quellen bzw. potenzieller Räume zur saisonalen Speicherung thermischer Energie entwickelt.

Der geothermisch nutzbare Untergrund teilt sich in drei Bereiche: In den obersten Sedimentschichten werden Süß- bzw. Trinkwasserhorizonte angetroffen, die bis zu einer Temperatur von etwa 20 °C der oberflächennahen Geothermie zugeordnet werden. Ihre Nutzung für die Heizwärme- und Warmwasserversorgung ist Stand der Technik und in Deutschland weit verbreitet. Darunter folgen wasserführende Schichten mit Temperaturen bis 60 °C, die zur mitteltiefen Geothermie gehören. Über einen Thermalwasserkreislauf zwischen zwei Bohrungen kann ihnen Wärme entzogen und für die direkte Wärmebereitstellung genutzt werden. Die hier vorherrschenden Temperaturen können mit Hilfe von Wärmepumpen auf die erforderlichen Nutzungstemperaturen für Fernwärme (100 °C bis 110 °C) oder Niedertemperaturnetze (70 °C bis 90 °C) erhöht werden. Großes Potenzial bietet der mitteltiefe Untergrund auch für die saisonale Speicherung thermischer Energie. In porösen, tiefen Grundwasserschichten, sogenannten Aquiferen, kann Wärme vorübergehend gespeichert und bei Bedarf als Heizwärme wieder entnommen werden. Die tiefe Geothermie (ab etwa 60 °C) kann für große Wärmenetze oder für die Stromerzeugung genutzt werden. Unterschieden werden die hydrothermale Geothermie, die die Wärme über das im Untergrund vorhandene Thermalwasser erschließt und die petrothermale Geothermie, welche die in gering durchlässigen Tiefengesteinen gespeicherte Energie durch Injektion von Wasser in künstlich erzeugte Gesteinsrisse nutzt. Beide Teilgebiete zur Nutzung der tiefen Geothermie erfordern in der Regel mindestens eine Förder- und eine Schluckbohrung (geothermische Dublette), die

bedarfsgerecht Energie mit ausreichender Temperatur aus einer tiefen Erdwärmelagerstätte erschließen.

## Mitteltiefe Geothermie

### Saisonale Wärmespeicherung in Aquiferen

Aquiferspeicher bieten aufgrund ihrer großen Kapazität und Effizienz im saisonalen Betrieb (Abb. 1) bedarfsgerechte Lösungen für Stadtquartiere in Metropolregionen. Energieversorgungssysteme mit Aquiferspeichern bestehen aus verschiedenen Teilsystemen: dem Untergrund, dem anlagentechnischen Teil und den Nutzern, welche die Energiebedarfsstruktur bestimmen.

Die Machbarkeit der Energieversorgung unter Einbeziehung von Aquiferspeichern wird in Deutschland bereits an drei Standorten gezeigt (Berlin, Rostock, Neubrandenburg). Zum Beispiel erfolgt die Versorgung der Parlamentsbauten in Berlin mit Strom, Wärme und Kälte mit einem in seiner Art einzigartigen System. Dazu wurden saisonale Wärme- und Kältespeicher in Aquiferen unterhalb des Platzes der Republik vor dem Reichstagsgebäude eingerichtet und in Betrieb genommen. Das GFZ war federführend an dem Monitoringprojekt „Optimierung der Einbindung der Aquiferspeicher in die Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen“ beteiligt. Trotz des großen Potenzials und Bedarfs steht jedoch eine breite Nutzung noch aus. Vernetzte Projekte des GFZ mit Universitäten (z. B. Technische Universität Berlin, TUB), Standortbetreibern (z. B. Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Adlershof, WISTA) sowie Energieversorgern (z. B. GASAG) streben daher die Entwicklung von Demonstrationsprojekten im Raum Berlin an.

In den Stadtgebieten von Berlin und Potsdam eignen sich mehrere geologische Einheiten zwischen 200 m und 600 m Tiefe als potenzielle Speicher für ein ATEs-System (Aquifer Thermal Energy Storage). Dazu gehören das Hettang (unterer Jura), die Exter-Formation (oberer Keuper), die Stuttgart-Formation (mittlerer Keuper) und der Schaumkalk (unterer Muschelkalk). Jeder potenzielle ATEs-Standort erfordert ein standortangepasstes Speicherdesign, das mehrere Faktoren berücksichtigen muss. Zum einen ist die Beschaffenheit des Untergrunds (geologische Struktur, Geo- und Fluidchemie, Mikrobiologie, hydraulische und thermische Speichereigenschaften) bedeutend. Zum anderen müssen die aus der Einbindung des Speichers entstehenden Einflussfaktoren beachtet werden (ein- und ausgespeicherte Energiemengen, transportierte Fluidvolumina, Temperaturen sowie zeitliches Verhalten). Für eine effiziente, nachhaltige Nutzung sind vorhandene Methoden und Planungsansätze weiterzuentwickeln und neue methodische Ansätze zu testen.

### Fallstudie Campus der TUB

Mit diesem Fokus führten das GFZ, die Universität der Künste (UdK) und die TUB im Forschungsprojekt ATEs Berlin eine Fallstudie für ein

*Links: Saisonale Speicherung von Wärme (links) und Geothermische Dublette (rechts)*

*Left: Seasonal heat storage (left) and a geothermal doublet system (right)*



**Kontakt:** G. Blöcher  
(guido.bloecher@gfz-potsdam.de)

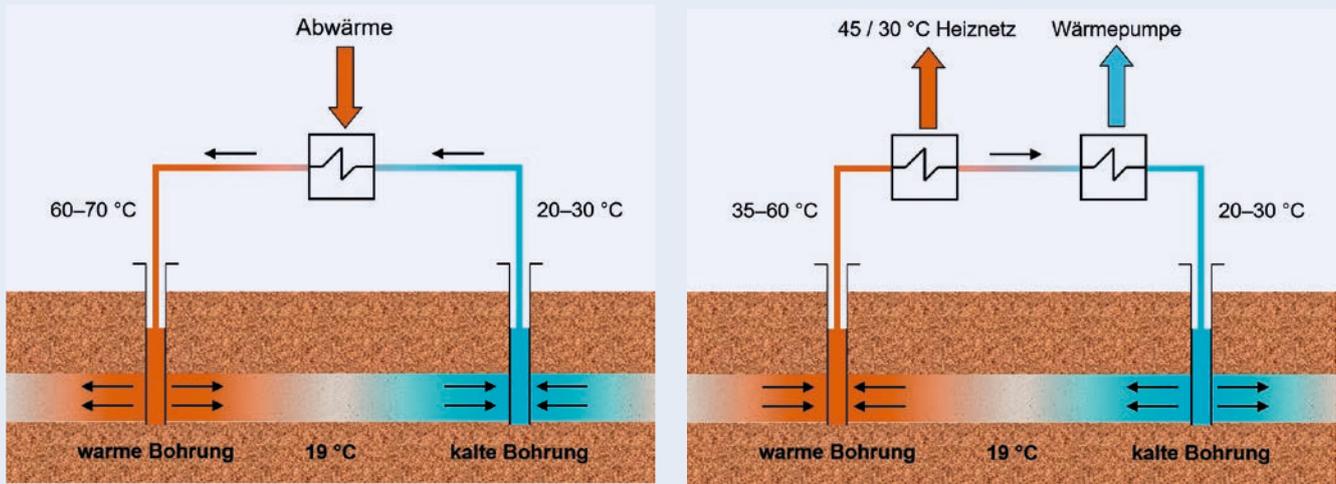


Abb. 1: Prinzip der saisonalen Wärmespeicherung in Aquiferen. Das im Sommer geförderte Grundwasser (links) wird durch überschüssige Wärme erwärmt. Es wird dann in den Aquifer zurückgepumpt und dort gespeichert. Im Winter (rechts) wird die Fließrichtung umgekehrt, so dass das erwärmte Grundwasser gefördert wird und zum Heizen verwendet werden kann (oft in Kombination mit einer Wärmepumpe). (Abb.: S. Kranz, GFZ)

Fig. 1: Concept of seasonal heat storage in aquifers. The groundwater extracted in summer (left) is heated by means of excess heat. It is then pumped back into the aquifer and stored there. In winter (right), the flow direction is reversed so that the heated groundwater is pumped and can be used for heating (often in combination with a heat pump).

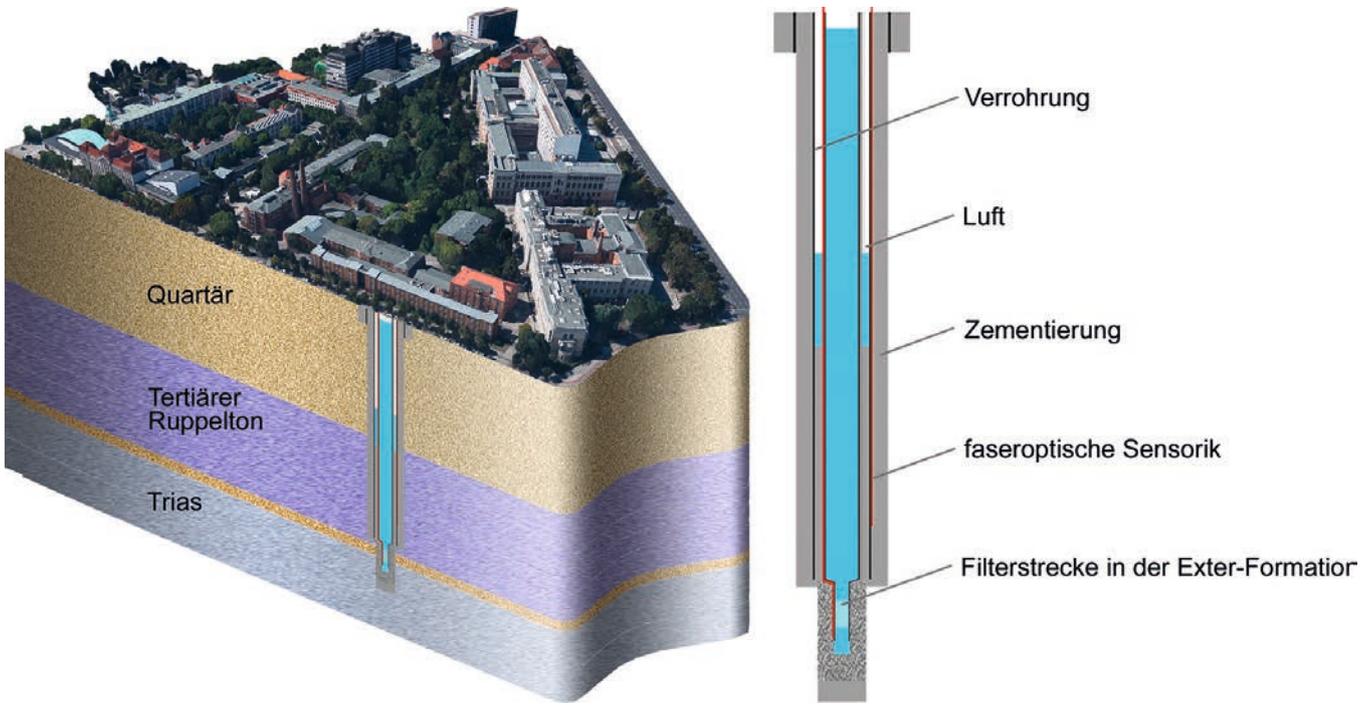


Abb. 2: ATES-Forschungsbohrung auf dem Campus der Technischen Universität Berlin (Quelle: G. Blöcher, GFZ, unter Verwendung von Google Earth)

Fig. 2: ATES research drill site at the campus of the Technical University Berlin

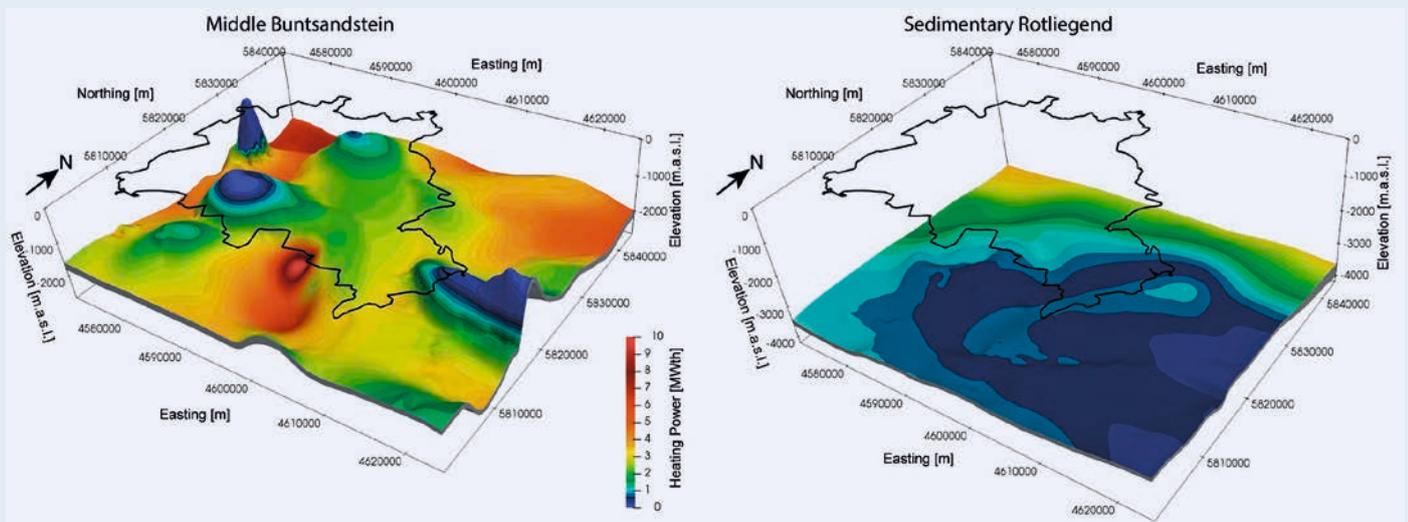


Abb. 3: Voraussichtliche Heizleistung einer virtuellen geothermischen Dublette für zwei Zielhorizonte unter Berlin. Links: Mittlerer Buntsandstein, rechts: Sedimentäres Rotliegend (Abb.: M. Frick, GFZ)

Fig. 3: Predicted Heating Power of a virtual geothermal doublet for two target horizons below Berlin. Left: Middle Buntsandstein, right: Sedimentary Rotliegend

ATES-System im Zentrum Berlins durch (Regensburg et al., 2018). Am Beispiel des Campus der TUB, mit seinem Mix aus altem und modernem Gebäudebestand und seiner vielseitigen Bedarfsstruktur aus Laboren, Büros und Lehrgebäuden, wurde ein energetisch und ökonomisch effizientes Energiekonzept entwickelt, für das u. a. die Einbindung saisonaler Unterspeicher in die Wärmeversorgung untersucht wurde. Im Rahmen des Projekts wurde eine 560 m tiefe Forschungsbohrung auf dem Universitätscampus Charlottenburg abgeteuft, die die geologische Datenbasis für die methodische Studie lieferte.

An der Bohrung (Abb. 2) wurden Tests und Temperaturmessungen durchgeführt, die Informationen über die physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Eigenschaften des Grundwasserleiters lieferten. Dabei zeigte sich, dass die Exter-Formation, obwohl nur 4 m mächtig (im Bereich zwischen 220 m bis 230 m Tiefe), generell als potenzieller Speicher genutzt werden kann.

Neben der geologischen Charakterisierung des Aquifers wurde durch die Untersuchungen ein Methodenkatalog zur hydraulischen, chemischen und thermischen Bewertung potenzieller ATES-Standorte entwickelt. Er soll im Rahmen zukünftiger Projekte in Berlin und an anderen Standorten in Deutschland verifiziert und weiterentwickelt werden.

#### Hydrothermale Geothermie in Berlin

Auch die Nutzung heißer Formationsfluide steht im Fokus der Forschung am GFZ. Anhand von Modellen des Untergrunds werden die

geothermischen Potenziale in mitteltiefen bis tiefen Reservoiren abgeschätzt. Durch die Kombination der Temperaturverteilungen mit den physikalischen Eigenschaften der Reservoirs können virtuelle geothermische Kraftwerke simuliert werden, die im Untergrund an geothermische Dubletten angeschlossen sind (Kastner et al., 2015). Für den Raum Berlin kann für den mittleren Buntsandstein (mitteltiefe Geothermie) bei einer Temperatur von 20 bis 100 °C und einer Tiefe von 200 m bis 2600 m unter Geländeoberkante ein durchschnittlicher Massenstrom von 35 kg/s und eine Wärmeleistung von bis zu 10 MW<sub>th</sub> (im Mittel 3,4 MW<sub>th</sub>) abgeschätzt werden (Abb. 3).

#### Tiefe Geothermie

Für das sedimentäre Rotliegend ergibt sich bei einem Massenstrom von 2 bis 14 kg/s, einer Temperatur von 95 bis 135 °C und einer Tiefe von 3000 m bis 4500 m unter Geländeoberkante eine Wärmeleistung von bis zu 4 MW<sub>th</sub>. Dabei handelt es sich um hydrothermale Wärmeleistung. Durch spezielle Maßnahmen, wie die hydraulische Stimulation, könnten für das sedimentäre Rotliegend noch höhere Wärmeleistungen erreicht werden.

#### Forschungsstandort Groß Schönebeck

Das GFZ hat für die Entwicklung von Technologien zur Nutzung geothermischer Energieressourcen aus einem tiefen Sedimentbecken im Norddeutschen Becken ein wissenschaftliches Untertagelabor im brandenburgischen Groß Schönebeck aufgebaut (Abb. 4). Es ermöglicht experimentelle Studien unter natürlichen Bedingungen, die Aufschluss über die geologischen und



Abb. 4: Infrastruktur am Standort Groß Schönebeck: 1–Injektionsbohrung, 2–Technikhalle, 3–Kühlturm, 4–Binärkraftwerkmodule und 5–Förderbohrung (Foto: GFZ)

Fig. 4: Infrastructure at the Groß Schönebeck site: 1–injection well, 2–technical facility, 3–cooling tower, 4–binary power plant modules, and 5–production well



Abb. 5: Ausfällungen und Sedimentation von Mineralien im Bohrloch (links); abgelöste und sedimentierte Innenbeschichtung (Mitte); Coiled-Tubing-Einheit mit Kupferschicht nach Einfahrt in den Reservoirbereich der Produktionsbohrung (rechts) (Fotos links und Mitte: S. Regenspurig, GFZ; rechts: T. Reinsch, GFZ)

Fig. 5: Precipitation and sedimentation of minerals in the borehole (left); detached and sedimented wellbore coating (middle); Coiled tubing unit with coating of copper after entering the reservoir area (right)

hydrogeologischen Verhältnisse in der Tiefe geben. Moderne Labor- und Messtechnik sowie tomographische Verfahren der geophysikalischen Tiefensondierung kommen zum Einsatz. Da Niedrigtemperatur-Reservoire den größten Teil des weltweiten tiefeothermischen Potenzials darstellen, können die Methoden auf andere Standorte übertragen werden.

In Groß Schönebeck erschließen zwei Bohrungen die Sediment- und Vulkanitschichten des unteren Perm (Rotliegend). Das geothermische Reservoir kann in zwei geologische Einheiten unterteilt werden: siliziklastische Gesteine (Oberes Rotliegend), die von Konglomeraten über feinkörnige Sandsteine, Schluff- und Siltsteine (Elbe-Untergruppe) in der Korngröße variieren, und Vulkanitgesteine (Unteres Rotliegend bzw. Permokarbon). Die Zielformation befindet sich in einer Tiefe von 3830 bis 4250 m bei Temperaturen um 150 °C (Zimmermann *et al.*, 2011).

Die Injektionsbohrung ist eine nichtfündige Gasexplorationsbohrung (EGrSk 3/90) mit einer Tiefe von 4309 m. Die Förderbohrung wurde im Jahr 2006 als Geothermiebohrung (Gt GrSk4/05) abgeteuft und erreicht eine Endteufe von 4404 m mit einer maximalen Ablenkung von 48° im Bohrlochtieftsten. In diesem Bereich sind die Bohrlöcher etwa 475 m voneinander entfernt.

In den Bohrungen wurden Experimentserien zur Reservoircharakterisierung sowie hydraulische Stimulationsexperimente zur Verbesserung der Thermalwasserproduktivität durchgeführt. Anhand von Bohrlochmessungen und 3D-Modellierungen wurde ein Abbild des geologischen Untergrunds erstellt. Zwischen 2012 und 2014 wurden Kommunikationsexperimente zwischen den Bohrungen durchgeführt, um die Nachhaltigkeit der Thermalwasserproduktivität zu testen. Während des Testzeitraums wurde an der Produktionsbohrung eine nichtlineare Verringerung der Produktivität beobachtet (Blöcher *et al.*, 2016). Die Injektivität an der Injektionsbohrung blieb nahezu konstant.

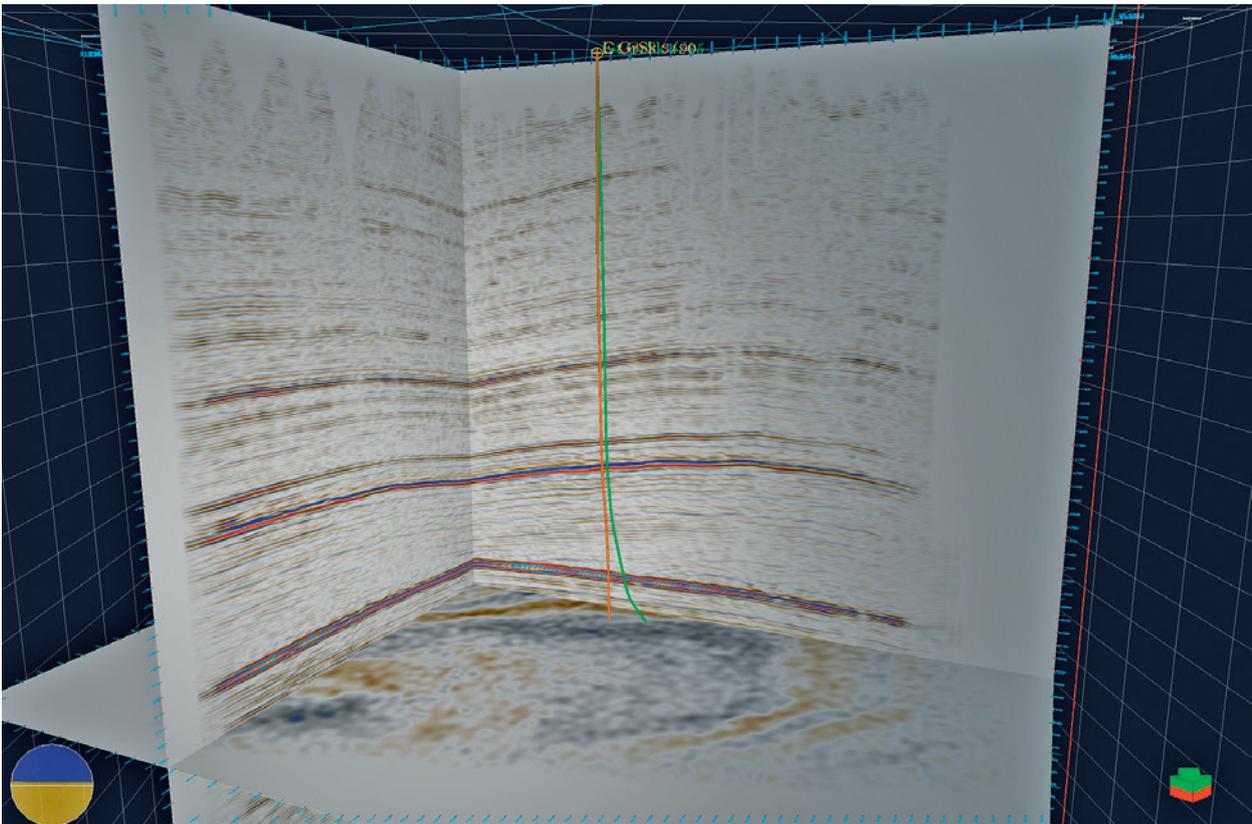


Abb. 6: Vertikal- und Horizontalschnitte durch das migrierte Datenvolumen und der Verlauf der beiden GFZ-Forschungsbohrungen E GrSk3/90 (orange) und Gt GrSk4/05 (grün) (Abb.: B. Norden, GFZ)

Fig. 6: Vertical and horizontal sections through the migrated data volume and the two GFZ research boreholes E GrSk3/90 (orange) and Gt GrSk4/05 (green) are shown

Es wurden fünf Prozesse identifiziert (Abb. 5), die die nachhaltige Thermalwasserzirkulation verhindern: (1) Mineralische Ausfällungen im Bohrloch, (2) die elektrochemische Reaktion und Ausfällungen im Bohrlochnahbereich, (3) die Nachhaltigkeit induzierter hydraulischer Risse, (4) die Zwei-Phasen-Strömung im Reservoir sowie (5) eine mögliche Reservoir-Kompartimentierung.

Um diese Prozesse zu quantifizieren, wurden Untersuchungen im Feld (einschließlich einer 3D-seismischen Messkampagne), im Labormaßstab sowie numerische Untersuchungen durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen werden Lösungen entwickelt, um den beobachteten Hindernissen in zukünftigen Projekten wirksam begegnen zu können.

### 3D-seismische Messkampagne

Im Februar/März 2017 wurde im Umfeld von Groß Schönebeck eine hochauflösende 3D-reflexionsseismische Vermessung durchgeführt. Vier je 22 Tonnen schwere Vibroseis-Fahrzeuge erzeugten an 1830 verschiedenen Quellpositionen seismische Wellen, die an 3240 in der Fläche verteilten Empfangspositionen registriert wurden. Es konnte ein seismisches Datenvolumen gewonnen

werden, dessen horizontale Abtastung 25 m x 25 m beträgt. Die Erkundungsdaten geben Aufschluss über die Lage und Struktur der Gesteinsschichten bis in eine Tiefe von rund 4 km und ermöglichen eine noch detailliertere geologische Charakterisierung des Standorts. Neue Erkenntnisse zur Tiefenlage der Vulkanite und zur Option ihrer Nutzung als Hot-Dry-Rock-System ermöglichen eine qualitative Weiterentwicklung von Erschließungskonzepten für das Norddeutsche Becken.

Im Rahmen der 3D-seismischen Messkampagne wurden auch VSP (Vertical Seismic Profiling)-Messungen in den Bohrungen durchgeführt. An 61 flächig um die Bohrungen herum verteilten Quellpunkten regten vier je 22 Tonnen schwere Vibrationsfahrzeuge seismische Wellen an. Die Messdaten wurden mit dem neuartigen Verfahren der ortsverteilten akustischen Messungen (Distributed Acoustic Sensing, DAS) in den Bohrlöchern aufgezeichnet. Dabei kam das hybride Bohrlochmesssystem des GFZ zum Einsatz, mit dem sowohl faseroptische Sensorik als auch elektrische Bohrlochsonden parallel betrieben werden können. Die DAS-Methode hat Messungen unter den Temperaturbedingungen von bis zu 150 °C in über 4 km Tiefe ermöglicht und zu einer

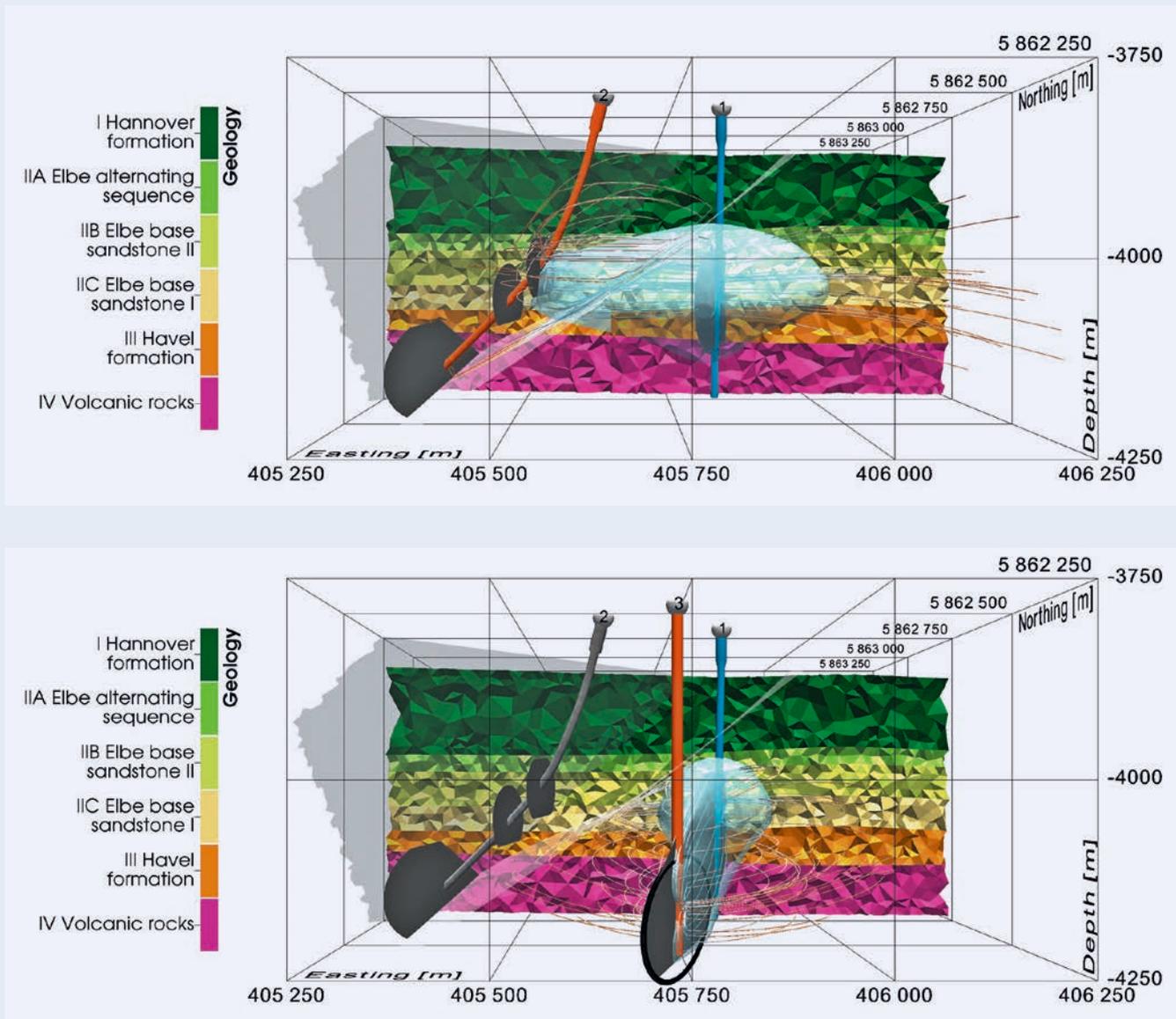


Abb. 7: Bei dem aktuellen Erschließungskonzept in Groß Schönebeck (oben) fungiert das Reservoirgestein als Wasserwegsamkeit; bei dem neuen Erschließungskonzept (unten) übernehmen diese Aufgabe künstlich erzeugte Risse. (Abb.: G. Blöcher, GFZ)

Fig. 7: Previous concept of exploitation in Groß Schönebeck (top) in which the reservoir rocks act as flow media and the new concept of exploitation (bottom) in which hydraulically induced fractures act as preferential flow paths.

deutlichen Zeit- und Kostenersparnis gegenüber der Verwendung konventioneller Geophone geführt. Anhand der Messdaten wurden genaue Zeit-Tiefen- und Geschwindigkeitsprofile ermittelt, die in die Auswertung der 3D-seismischen Erkundung einbezogen werden. Die seismischen Daten erlauben eine deutlich verbesserte Interpretation von Strukturen im dreidimensionalen Raum (Abb. 6).

#### Vom matrixdominierten zum rissdominierten Erschließungskonzept

Die Erkenntnisse fließen in eine alternative Erschließungsstrategie für den Standort Groß Schönebeck ein, mit dem Ziel, eine nachhaltige Nutzung tiefer geothermischer Ressourcen im Norddeutschen Becken zu demonstrieren. Bei dem bislang verfolgten Erschließungskonzept (Abb. 7 oben) fließt das geothermische Fluid durch die Gesteinsmatrix. Wie oben dargestellt, ergaben die Feldmessungen während der Kommunikationsexperimente, dass dieses Konzept nicht zu einer wirtschaftlichen Nutzung führt. Ein alternatives Erschließungskonzept sieht vor, das geothermische Fluid durch hydraulisch induzierte Risse strömen zu lassen (Abb. 7 unten). Für dieses „rissdominierte Erschließungskonzept“ werden die vulkanischen Gesteine des unteren Rotliegend untersucht.

#### Ausblick

Geothermische Wärmequellen und saisonale thermische Speicher können zu einem stabilen und flexiblen Strom-Wärme-System und zu einer treibhausgasarmen Wärmebereitstellung beitragen. Die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse aus dem Aquiferspeicher-Projekt Berlin erweitern die methodischen und technologischen Grundlagen für die effiziente Planung und Einbindung von Aquiferspeichern in Energieversorgungssysteme. Sie sind auch für andere Anwendungen, die die Charakterisierung und die Nutzung des unterirdischen Raums als Speicher (thermisch oder stofflich) zum Ziel haben, von Bedeutung.

Mit dem Ziel, eine nachhaltige Nutzung tiefer geothermischer Ressourcen im Norddeutschen Becken zu demonstrieren, soll am Forschungsstandort Groß Schönebeck ein rissdominiertes Erschließungskonzept umgesetzt werden. Dieses Konzept muss als Teil eines Multirissystems betrachtet werden, bei dem die beiden Bohrungen durch mehrere Rissysteme miteinander verbunden werden. In dieser Umsetzung können Umwelteinflüsse minimiert werden. Das Konzept kann auf andere Standorte im Norddeutschen Becken, wie z. B. Berlin, übertragen werden.

Das Forschungsvorhaben ATES Berlin und die Forschungsprojekte am Geothermieforschungsstandort Groß Schönebeck wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

#### Literatur

- Blöcher, G., Cacace, M., Reinsch, T., Watanabe, N. (2015): Evaluation of three exploitation concepts for a deep geothermal system in the North German Basin. - *Computers and Geosciences*, 82, pp. 120–129. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.06.005>
- Blöcher, G., Reinsch, T., Henniges, J., Milsch, H., Regenspurg, S., Kummerow, J., Francke, H., Kranz, S., Saadat, A., Zimmermann, G., Huenges, E. (2016): Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck. - *Geothermics*, 63, pp. 27–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.07.008>
- Kastner, O., Sippel, J., Zimmermann, G. (2015): Regional-scale assessment of hydrothermal heat plant capacities fed from deep sedimentary aquifers in Berlin/Germany. - *Geothermics*, 53, pp. 353–367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.06.002>
- Regenspurg, S., Alawi, M., Blöcher, G., Börger, M., Kranz, S., Norden, B., Saadat, A., Scheytt, T., Virchow, L., Vieth-Hillebrand, A. (2018): Impact of drilling mud on chemistry and microbiology of an Upper Triassic groundwater after drilling and testing an exploration well for aquifer thermal energy storage in Berlin (Germany). - *Environmental Earth Sciences*, 77, 516. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7696-8>
- Stillner, M., Krawczyk, C. M., Bauer, K., Henniges, J., Norden, B., Huenges, E., Spalek, A. (2018): 3D-Seismik am Geothermieforschungsstandort Groß Schönebeck. - *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*, 1, pp. 84–91
- Zimmermann, G., Blöcher, G., Reinicke, A., Brandt, W. (2011): Rock specific hydraulic fracturing and matrix acidizing to enhance a geothermal system - Concepts and field results. - *Tectonophysics*, 503, 1-2, pp. 146–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.026>

# Nutzung des geologischen Untergrunds zur stofflichen Speicherung

*Cornelia Schmidt-Hattenberger, Stefan Lüth, Dennis Rippe, Bernd Wiese, Peter Pilz, Johannes Hierold, Martin Zimmer, Michael Kühn  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

*In the course of converting the energy supply from fossil-based to more sustainable regenerative energy resources, the use of the geological underground for energy storage purposes is becoming increasingly important to achieve the national climate policy goals. The geological underground offers opportunities for the storage of hydrogen, CO<sub>2</sub> and synthetic gas as well as for the permanent storage of hazardous and environmentally harmful substances, e.g. radioactive waste. In the course of the energy transition and the discussion on climate change mitigation options, the demand for new storage technologies and corresponding scientific research is increasing. An indispensable prerequisite for the further development of new storage technologies are scientific pilot sites and underground research laboratories. Building on its expertise in geological storage, the GFZ is conducting projects for CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> storage as well as for nuclear waste disposal to study technological implementation and long-term safety. This research forms an indispensable contribution of the region Germany/Central Europe to the European climate and energy strategy.*



Bei der Umstellung von fossilen Energieträgern auf nachhaltige und regenerative Brennstoffe zur Erreichung der deutschen klimapolitischen Ziele gewinnt die Nutzung des geologischen Untergrunds zu Speicherezwecken zunehmend an Bedeutung. Der geologische Untergrund bietet hier u. a. Möglichkeiten zur stofflichen Speicherung von Wasserstoff und synthetischem Erdgas, aber auch zur dauerhaften Lagerung gesundheitsgefährdender und umweltschädigender Stoffe wie z. B. radioaktiver Abfälle und klimabeeinflussender Treibhausgase. Im Zuge der Energiewende und der damit verbundenen Diskussion zur Nutzung fluktuierender Energiequellen steigt der Bedarf an neuen Speichertechnologien und ihrer wissenschaftlichen Erforschung. Eine unabdingbare Voraussetzung zur weiteren Entwicklung von neuen Speichertechnologien sind wissenschaftlich ausgerichtete Pilotstandorte und Untergrundlaboratorien. Nur dort können die notwendigen Grundlagenkenntnisse gewonnen und die benötigten Untergrundtechnologien für den Betrieb und die Überwachung der Speicher auf einer praxisnahen Skala entwickelt und getestet werden (vgl. auch Beitrag von Strauch et al. in diesem Heft, S. 20). Integraler Bestandteil aller Speichertechnologien sind Bohrungen, zum einen für die geologische Exploration, Charakterisierung und Entwicklung der Speicher und zum anderen für die Überwachung der Speicher und der Speicheraktivitäten während und nach der aktiven Speicherphase. Bohrungen bieten eine Möglichkeit, Proben und Daten direkt aus dem Speicher und seinem Deckgestein zu gewinnen.

## CO<sub>2</sub>-Speicherung am Pilotstandort Ketzin/Havel

Im Rahmen der Klimapolitik ist die Abscheidung und dauerhafte Speicherung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in tiefen Gesteinsschichten eine potenzielle Maßnahme zur Verringerung anthropogener Treibhausgasemissionen. Das Deutsche Geoforschungszentrum GFZ erforschte in Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern von 2004 bis 2017 die CO<sub>2</sub>-Speicherung in tiefen geologischen Schichten an einem Pilotstandort nahe der Stadt Ketzin/Havel, etwa 25 km westlich von Berlin. Im Mittelpunkt stand dabei die Einschätzung der

Sicherheit dieser Technologie, welche bei großmaßstäblicher und damit klimarelevanter Umsetzung gewährleistet sein muss. Über fünf Jahre, von Juli 2008 bis August 2013, wurden am Pilotstandort etwas mehr als 67 kt CO<sub>2</sub> in Sandsteine der obertriassischen Stuttgart-Formation eingespeichert (Martens et al., 2015; Abb. 1). Danach erfolgte bis 2017 eine vierjährige Beobachtungsphase mit darauffolgendem Verschluss der Bohrungen und Rückbau des Standorts in seinen ursprünglichen Zustand. Die zentralen Ziele und wissenschaftlichen Aufgaben, die am CO<sub>2</sub>-Speicherstandort verfolgt und bearbeitet wurden, waren die Sicherstellung und Überwachung eines kontinuierlichen und störungsfreien Injektionsbetriebs im Hinblick auf Vermeidung von Gefahren für Bevölkerung und Umwelt, die Entwicklung und Erprobung geeigneter geochemischer und geophysikalischer Überwachungsmethoden für den Speicher sowie die Bestimmung ihrer Sensitivitäten, die langfristige Überwachung des Ausbreitungsverhaltens des injizierten CO<sub>2</sub> mit einem multi-disziplinären Überwachungskonzept sowie die Validierung der zur Prozessnachbildung und -prognose eingesetzten Modellierungswerkzeuge am realen Speicherstandort Ketzin.

Die in den intelligenten Bohrungen am Standort Ketzin eingebauten Messsysteme und Sensoren gehörten weltweit mit zu den umfangreichsten Installationen, die im Bereich des Monitorings von Untergrundspeichern eingesetzt wurden, und haben wesentliche Überwachungsdaten und Kenntnisse zum Speicherbetrieb sowie zu den im Speicher ablaufenden Prozessen geliefert. Das multi-disziplinäre Messkonzept und die damit erhobenen Daten haben maßgeblich zu methodischen Weiterentwicklungen geführt. In Zusammenarbeit mit dem Partnerinstitut Sintef (Norwegen) wurde eine gemeinsame tomographische Auswertung (joint inversion) von seismischen und geoelektrischen Daten entwickelt, mit welcher sich eine verbesserte Sicherheit für die Detektion geringer Mengen CO<sub>2</sub> erzielen lässt. Im Horizontalschnitt von Abb. 2a, der die Bohrung Ktzi201 schneidet, wird die Neigung der CO<sub>2</sub>-Signatur ersichtlich, welche der vorhandenen geologischen Schichtung des Speichers entspricht.

Die numerische Simulation zum zeitlichen und räumlichen Verhalten des injizierten CO<sub>2</sub> wurde auf verschiedene Typen von Beobachtungsdaten kalibriert (hydraulischer und CO<sub>2</sub>-Druck, CO<sub>2</sub>-Ankunftszeit, geophysikalische Daten; Abb. 2b) und als gekoppeltes multi-physikalisches Modell ausgeführt (Wiese et al., 2018), um alle verfügbaren Informationen einzuschließen und das Verhalten des Speichers möglichst realistisch zu beschreiben und zu prognostizieren.

Geochemische Untersuchungen an Kernmaterial, das aus der Ketzin-Bohrung Ktzi203 vor dem endgültigen Verschluss in 2017 entnommen wurde, zeigte eine stabile CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Sandsteinschicht des Speicherhorizonts (Abb. 2c) sowie keine In-

*Links: Rückbauarbeiten am Pilotstandort Ketzin nach erfolgreich abgeschlossener Einspeisung von 67 kt CO<sub>2</sub> in den geologischen Untergrund. Rechts liegen die rückgewonnenen Rohre des Injektionsstrangs. (Foto: C. Schmidt-Hattenberger, GFZ)*

*Left: Dismantling operations at the Ketzin pilot site after the successfully completed injection of 67 kt CO<sub>2</sub> into the geological underground. On the right side, the retrieved tubulars of the injection string are stored.*



**Kontakt:** C. Schmidt-Hattenberger  
(cornelia.schmidt-hattenberger@gfz-potsdam.de)

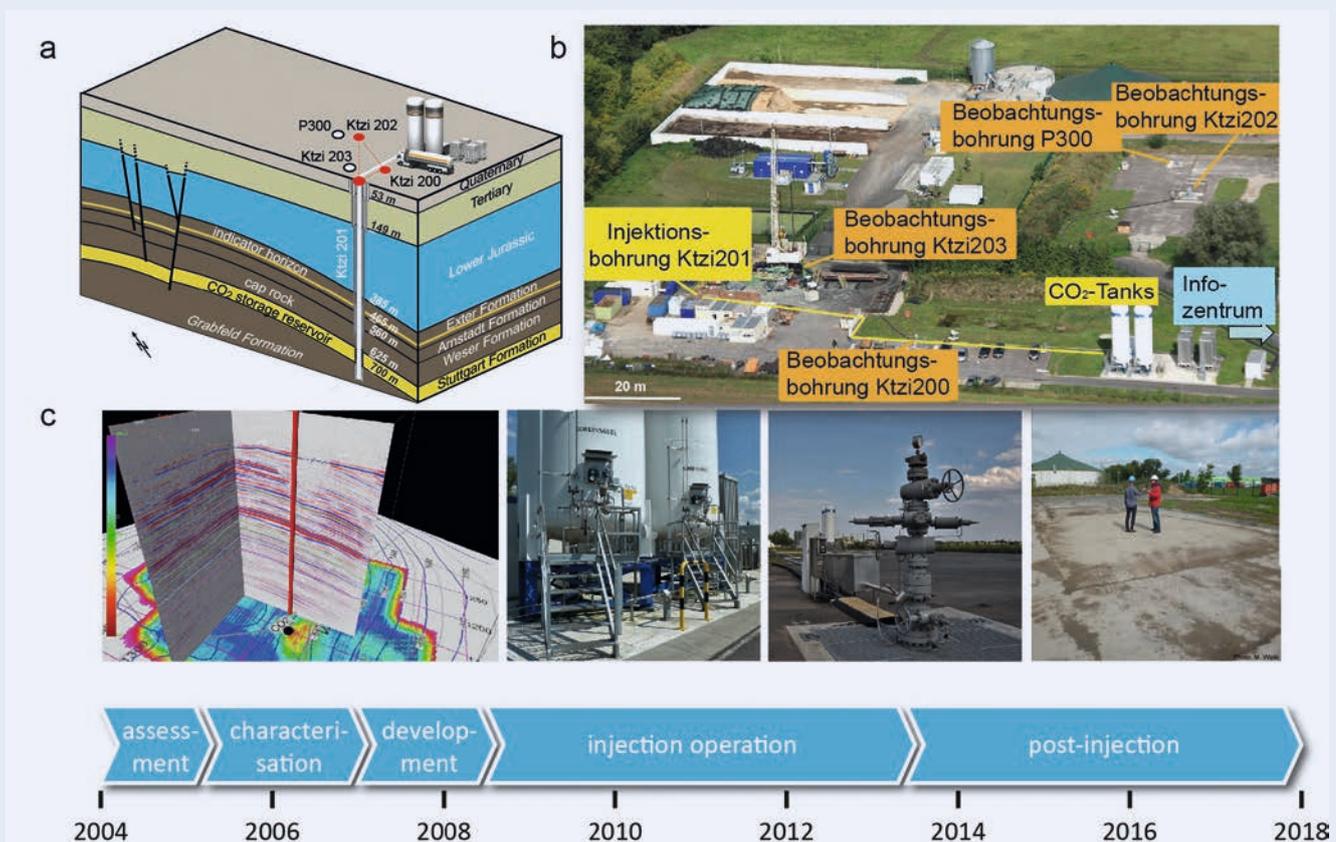


Abb. 1: (a) Schematische Darstellung des Speicherkomplexes am Pilotstandort Ketzin (Liebscher et al., 2013); (b) Luftbildaufnahme vom Gelände mit Bohrungen und Injektionsanlage; (c) durchlaufene Phasen eines CO<sub>2</sub>-Speichers (Fotos: GFZ)

Fig. 1: (a) Schematic drawing of the storage complex at the Ketzin pilot site (Liebscher et al., 2013); (b) aerial view of the location with boreholes and injection facility; (c) absolved phases of a CO<sub>2</sub> storage life-cycle

dikation auf CO<sub>2</sub>-Infiltration in die abdeckenden Gesteinsschichten (Zimmer et al., 2018). Das Resultat unterstützt die Feststellung einer Stabilisierung der CO<sub>2</sub>-Fahne im Untergrund.

Durch die Einbeziehung der Öffentlichkeit in den Stand der wissenschaftlichen Ergebnisse sowie eine transparente und sachliche Informationspolitik von Beginn an stieß das Vorhaben auf eine große Akzeptanz in der regionalen Bevölkerung und deren Interesse für die Forschungsarbeiten an geologischen Untergrundspeichern.

### H<sub>2</sub>\_React – Reaktionen und Transport von Wasserstoff bei der Untergrundspeicherung

In den nächsten Jahren soll der Anteil an erneuerbarer Energie in Deutschland erheblich zunehmen. Doch schon jetzt gibt es saisonal bedingte Stromüberkapazitäten, die aufgrund der ungünstigen Verteilung von Industrie und Windstromproduzenten sowie unterentwickelten Netzstrukturen nicht in die Bedarfsgebiete abfließen können und daher oft abgeregelt werden müssen. Das senkt die Wirtschaftlichkeit der erneuerbaren Energien erheblich. Dem kann mit der Bereitstellung von Energiespeichern wirksam begegnet werden. Da in Deutschland die größten Energiespeicherpotenziale bei der Speicherung chemischer Energie in Form von Wasserstoff und daraus synthetisiertem Methan (Syngas) in geologischen Speichern liegen (Sterner und Stadler, 2014), ist die Forschung zur Bereitstellung geeigneter Speichermedien von großem wirtschaftlichem sowie gesellschaftlichem Interesse.

Das durch das BMBF geförderte Forschungsprojekt H<sub>2</sub>\_React untersucht die Reaktionen und Wechselwirkungen sowie den Transport von Wasserstoff in porösem Gestein. Da Porenspeicher noch nicht für die Wasserstoffspeicherung genutzt werden, gibt es auf diesem Gebiet erheblichen Forschungsbedarf. Bisher gelten Porenspeicher aufgrund vermuteter Diffusionsverluste als unwirtschaftlich für die Wasserstoffspeicherung. Wie jedoch die Speicherung von Stadtgas (mit H<sub>2</sub>-Gehalten von 40 bis 67 Vol.%) in Ketzin ab 1985 zeigte, sind bei geeigneten Rahmenbedingungen die Gasverluste in einem Porenspeicher inklusive Wasserstoff so zu minimieren, dass ein wirtschaftlicher Speicherbetrieb möglich ist. Diffusionsprozesse spielen dabei zwar eine Rolle, sind im Umfang bisher aber überschätzt worden. Stattdessen dominieren – laut Aufzeichnungen des ehemaligen Speicherbetreibers – mikrobielle Gasumwandlungsprozesse.

Für die Simulation der Speicher- und Transporteigenschaften von Wasserstoff sowie für die Kalkulation möglicher Diffusionsverluste ist die Kenntnis der Wasserstofflöslichkeiten unter Reservoirbedingungen in den zumeist hochsalinaren Reservoirfluiden eine Grundvoraussetzung. Dies betrifft nicht nur Poren- sondern auch Kavernenspeicher. Experimentelle Daten für diesen Salinitäts-, Druck- und Temperaturbereich existierten bisher nicht. Im Projekt H<sub>2</sub>\_React werden deshalb die Wasserstofflöslichkeiten in verschiedenen Salz-Fluid-Systemen (NaCl, MgCl<sub>2</sub>, KCl) unter Reservoirbedingungen bestimmt und die dafür gültigen Zustandsgleichungen entwickelt. Erste Experimente zeigen, dass die Diffusionsverluste

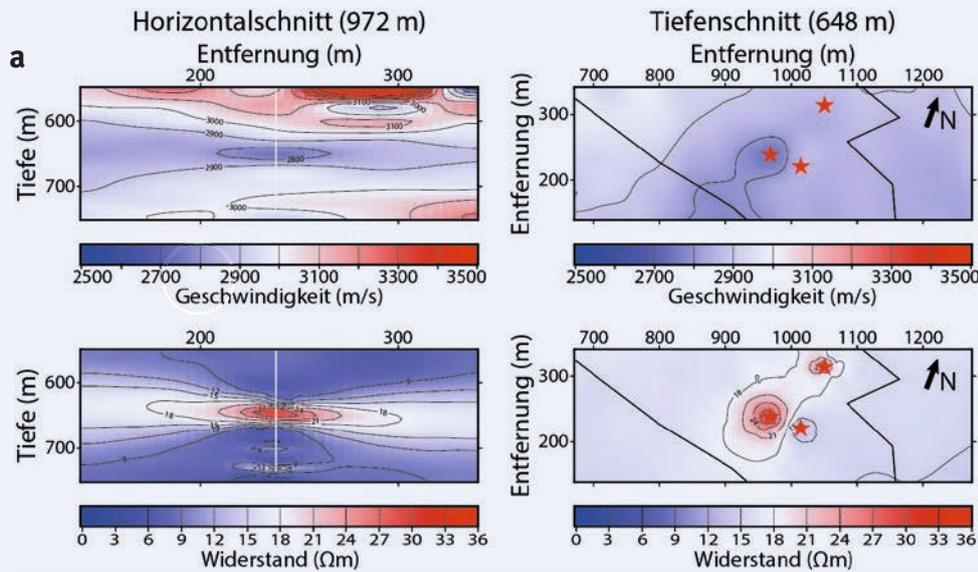


Abb. 2: Ergebnisse der multi-disziplinären Speicherüberwachung am CO<sub>2</sub>-Pilotstandort Ketzin:

a) Gemeinsame Inversion von seismischen und geoelektrischen Daten, durchgeführt mittels Wellenforminversion (FWI) und elektrischer Widerstandstomographie (ERT), am Querschnitt x = 972 m (Schnittpunkt mit der Injektionsbohrung Ktziz01) und am Tiefenschnitt z = 648 m (Speicherhorizont);

b) Schaubild für die in der multi-physikalischen Modellierung verwendeten Komponenten und Prozesse; c) lithologisches Profil und gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlammgas von Kernprobenmaterial aus Seitenkernbohrungen vor dem Bohrlochverschluss 2017

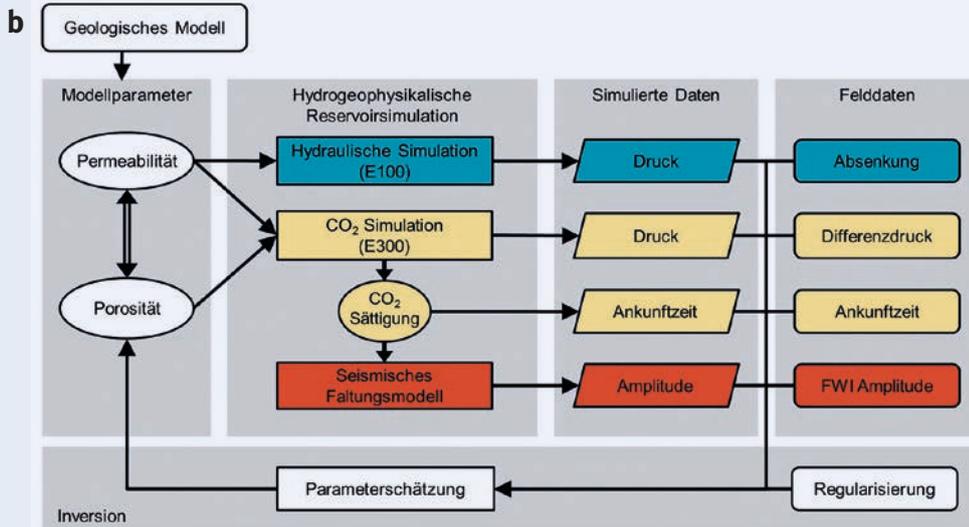
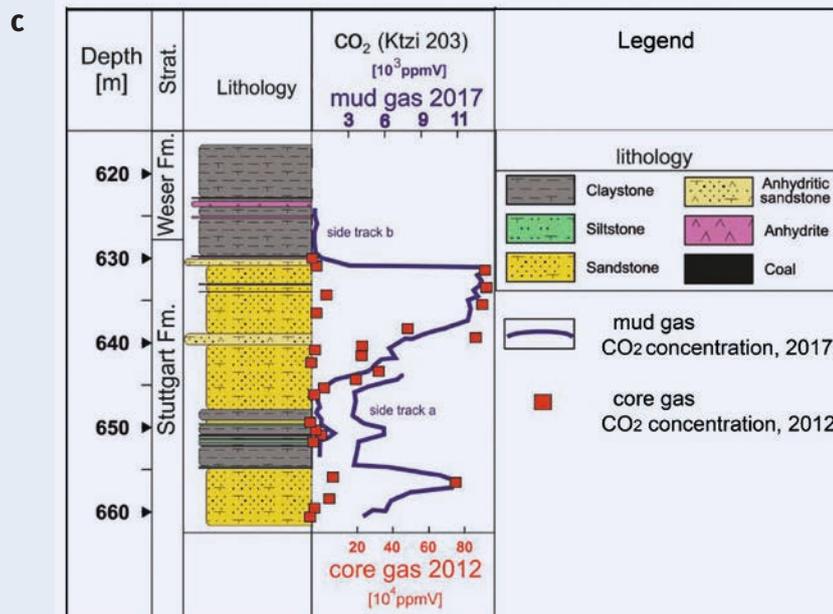


Fig. 2: Results of the multi-disciplinary storage surveillance at the Ketzin CO<sub>2</sub> pilot site: a) Joint inversion results based on seismic and geoelectric data, derived with full waveform inversion (FWI) and electrical resistivity tomography (ERT), at the cross-section x = 972 m (intersecting the injection well Ktziz01) and depth section z = 648 m (storage target zone);

b) Workflow of the components and processes used in the multi-physical modelling; c) Lithological profile and measured CO<sub>2</sub> concentration in the mud gas of core sample material from side-track coring before the well abandonment in 2017



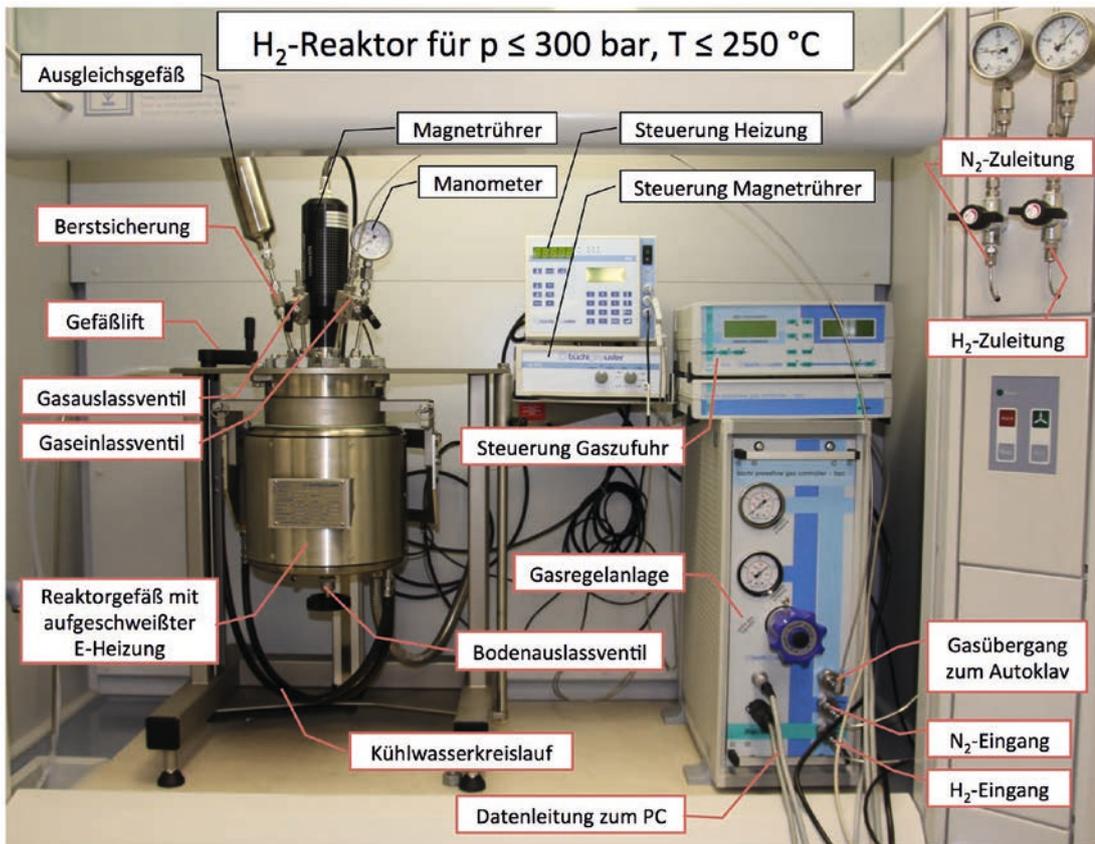


Abb. 3: Hochdruck-Hochtemperatur-Autoklav im GFZ-Wasserstofflabor (Foto: P. Pilz, GFZ)

Fig. 3: High-pressure high-temperature autoclave in the GFZ hydrogen laboratory

von Wasserstoff in Porenspeichern wahrscheinlich geringer sind, als bisher von numerischen Standardmodellen vorhergesagt.

Darüber hinaus soll der Einfluss von Wasserstoff auf die geochemischen, mineralogischen und petrophysikalischen Eigenschaften potenzieller Speichergesteine sowie auf reaktionskritische Begleitminerale wie Hämatit, Magnetit, Anhydrit und Pyrit untersucht werden. Dazu sind unter lagerstättenspezifischen Druck- und Temperaturbedingungen entsprechende Laborexperimente geplant. Von besonderem wissenschaftlichem Interesse sind dabei mögliche Lösungs- und Fällungsreaktionen von Mineralphasen und petrophysikalische Veränderungen der verschiedenen Gesteinstypen. Mögliche Reaktionen sollen qualitativ und idealerweise auch quantitativ bestimmt werden und als Grundlage für numerische Simulationen von komplexen reservoirspezifischen Prozessen dienen. Durchgeführt werden sämtliche Laborexperimente mit einem speziell für Hydrierungen ausgelegten und zertifizierten Hochdruck-Autoklaven bei Drücken bis zu 300 bar und Temperaturen bis zu 250 °C (Abb. 3).

Als mittelfristiges Ziel wird angestrebt, durch entsprechende Vorstudien und Vorarbeiten die Grundlagen für ein Pilotprojekt zur Wasserstoffspeicherung in einem geeigneten Porenspeicher in Brandenburg zu legen. In ein solches Großprojekt könnten Forschungseinrichtungen wie die BTU Cottbus-Senftenberg mit ihrer weiterentwickelten Druckelektrolyseanlage sowie verschiedene Partner aus der Wirtschaft (z. B. Windenergieerzeuger, Wasserstoffnutzer, Gasnetz- und Speicherbetreiber) eingebunden werden.

## Endlagerung

In Deutschland wird im Jahr 2022 das letzte Kernkraftwerk abgeschaltet und damit der Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie vollzogen sein. Es werden bis zu 1900 Behälter mit mehr als 27 000 m<sup>3</sup> hochradioaktivem Abfall zu erwarten sein (BfE, 2018), für die in Deutschland ein sicherer Endlagerstandort ausgewählt werden muss. Das im Juli 2017 vom Bundestag verabschiedete Standortauswahlgesetz (StandAG) sieht vor, Standorte und Endlagerkonzepte im Steinsalz, Kristallin und Tonstein mit dem Ziel bestmöglicher Sicherheit vergleichend zu untersuchen. Dieser Ansatz ist im internationalen Vergleich einmalig und stellt die wissenschaftlich-technischen und gesellschaftlichen Akteure vor große Herausforderungen, um ein partizipatives und transparentes Verfahren zu gewährleisten.

Die Endlagerforschung in Deutschland hatte ihren bisherigen Schwerpunkt in der Untersuchung von Steinsalz als Wirtsgestein. Ton und Kristallin standen nicht im Fokus. Um die langfristige Sicherheit eines Standorts zu gewährleisten, ist eine möglichst umfassende und hochauflösende Erkundung des Wirtsgesteins erforderlich. Dabei werden geophysikalische Messungen von der Erdoberfläche und Tiefbohrungen eingesetzt, die aber mögliche kritische Strukturen im direkten Umfeld eines untertägigen Endlagers übersehen können, so dass eine weitergehende Erkundung bedeutsam wird. Hier helfen Erfahrungen aus dem Tunnel- bzw. Bergbau, in dem ein am GFZ entwickeltes seismisches Erkundungssystem eingesetzt wird, um das Vor- bzw. Umfeld eines



Abb. 4: Das Mont-Terri-Felslabor im Schweizer Kanton Jura bietet eine erstklassige Infrastruktur zur Durchführung verschiedenster geowissenschaftlicher Experimente. Foto links oben: Einen direkten Zugang zum Opalinuston erlauben Fensteröffnungen in den mit Spritzbeton bewehrten Stollen. (Fotos: S. Lüth, GFZ)

Fig. 4: The Mont Terri Rock Laboratory, situated in the Swiss Canton Jura, is offering a excellent infrastructure for a multitude of geoscientific experiments. The surrounding Opalinus clay can be accessed through openings in the shotcrete support (inset photo).

Tunnelvortriebs zu untersuchen (Lüth et al., 2008; Krauß et al., 2014). Das Erkundungssystem besteht aus kompakten seismischen Quellen zur Erzeugung definierter hochfrequenter seismischer Signale und aus in Gebirgsankern integrierten seismischen Empfängern zur Aufzeichnung der seismischen Wellen (Giese und Kück, 2014). Dieses System wurde bisher im Kristallin und im Steinsalz erfolgreich angewendet. Tonstein ist häufig durch seine besonders ausgeprägte Heterogenität, seismische Anisotropie und Dämpfung gekennzeichnet, so dass hoch auflösende seismische Messungen bisher eher in sehr kleinen Maßstäben, vor allem konzentriert auf das unmittelbare Umfeld von Bohrungen und Stollenwänden (einige Dezimeter bis Meter) durchgeführt werden konnten (z. B. Schuster et al., 2017).

Seit dem 1. Juli 2018 ist die Helmholtz-Gemeinschaft, unter anderem vertreten durch das GFZ, Partner im Mont-Terri-Projekt, das unter der Leitung des Schweizer Geologischen Dienstes, Swisstopo, ein Felslabor im Opalinuston betreibt (Abb. 4). Der Opalinuston ist in der Schweiz als Wirtsgestein eines künftigen Endlagers bestimmt und weist vor allem in seiner „sandigen Fazies“ Ähnlichkeiten mit in Deutschland existierenden Tonsteinvorkommen auf. Somit bietet das Mont-Terri-Felslabor hervorragende Bedingungen, um geophysikalische Untersuchungsmethoden einer Tonformation zu testen und wertvolle Erfahrungen für mögliche weitergehende Erkundungen an einem deutschen Standort (Ton, Kristallin oder Steinsalz) zu sammeln.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Übertragung der am Standort Ketzin gewonnenen Erkenntnisse auf eine industrielle Speicherung, die Erschließung weiterer Nutzungen des Untergrunds für die stoffliche Speicherung, verbunden

mit der Weiterentwicklung von intelligenten Überwachungssystemen und deren effiziente Auswertung sind zentrale Herausforderungen, die das GFZ auch in Zukunft fokussiert verfolgen wird. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur Erreichung der Kernziele der Energiepolitik in Deutschland geleistet, zu denen u. a. die bis 2050 geplante Treibhausgasneutralität gehört sowie die Gewährleistung der langfristigen Verantwortung für eine sichere Entsorgung von Brennelementen und radioaktiven Abfälle mit einem Zeithorizont weit über den Betrieb der deutschen Kernkraftwerke hinaus.

## Literatur

- Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) (2018): Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle : Sicherheit bis zur Endlagerung, 55 p.
- Giese, R., Kück, J. (2014): Untertageexploration – Instrumente und Methodenentwicklung. - *System Erde*, 4, 1, pp. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.04.019>
- Krauß, F., Giese, R., Alexandrakis, C., Buske, S. (2014): Seismic travel-time and attenuation tomography to characterize the excavation damaged zone and the surrounding rock mass of a newly excavated ramp and chamber. - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 70, pp. 524–532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2014.06.010>
- Liebscher, A., Martens, S., Möller, F., Kühn, M. (2013): On-shore CO<sub>2</sub> storage at the Ketzin pilot site in Germany. - In: Gluyas, J., Mathias, S. (Eds.), *Geological storage of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>): Geoscience, technologies, environmental aspects and legal frameworks*, (Woodhead Publishing Series in Energy ; 54), Woodhead Publishing Limited, pp. 278–300. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097279.3.278>
- Lüth, S., Giese, R., Otto, P., Krüger, K., Mielitz, S., Bohlen, T., Dickmann, T. (2008): Seismic investigations of the Piora Basin using S-wave conversions at the tunnel face of the Piora adit (Gotthard Base Tunnel). - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45, 1, pp. 86–93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2007.03.003>
- Martens, S., Conze, R., De Lucia, M., Henniges, J., Kempka, T., Liebscher, A., Lueth, S., Moeller, F., Norden, B., Prevedel, B., Schmidt-Hattenberger, C., Szzybalski, A., Vieth-Hillebrand, A., Würdemann, H., Zemke, K., Zimmer, M. (2015): Joint Research Project CO<sub>2</sub>MAN (CO<sub>2</sub>MAN Reservoir Management): Continuation of Research and Development Work for CO<sub>2</sub> Storage at the Ketzin Pilot Site. - In: Liebscher, A., Münch, U. (Eds.), *Geological Storage of CO<sub>2</sub> – Long Term Security Aspects*, (GEOTECHNOLOGIEN Science Report ; 22) (Advanced Technologies in Earth Sciences), Cham : Springer International Publishing, pp. 1–32. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13930-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13930-2_1)
- Schuster, K., Amann, F., Yong, S., Bossart, P., Connolly, P. (2017): High-resolution mini-seismic methods applied in the Mont Terri rock laboratory (Switzerland). - In: *Swiss Journal of Geosciences*, 110, 1, pp. 213–231. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00015-016-0241-4>
- Sternner, M., Stadler, I. (2014): *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*, Berlin : Springer Vieweg, 748 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37380-0>
- Wiese, B., Wagner, F. M., Norden, B., Maurer, H., Schmidt-Hattenberger, C. (2018): Fully coupled inversion on a multi-physical reservoir model – Part I: Theory and concept. - *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 75, pp. 262–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.05.013>
- Zimmer, M., Szzybalski, A., Norden, B., Vieth-Hillebrand, A., Liebscher, A. (2018): Monitoring of the gas composition and stable carbon isotopes during side track drilling in Ktzi 203 at the Ketzin CO<sub>2</sub> storage pilot site, Germany. - *Advances in Geosciences*, 45, pp. 7–11. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-7-2018>

# Wo Salz, Wasser und Gas sich treffen – Kavernenrandbereiche unter Tage und un- ter der Lupe im Forschungsprojekt ProSalz

Bettina Strauch<sup>1</sup>, Julia Arndt<sup>2</sup>, Johannes Barth<sup>2</sup>, Rüdiger Giese<sup>1</sup>, Michael Kühn<sup>1</sup>, Anssi Myrntinen<sup>3</sup>, Heike Richter<sup>1</sup>, Svenja Steding<sup>1</sup>,  
Martin Zimmer<sup>1</sup>, Axel Zirkler<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<sup>3</sup> K+S Aktiengesellschaft, Kassel

*ProSalz is a BMBF-funded research project that aims for a better process understanding of geochemical and hydrodynamic interactions between different gases, inhomogeneous salts and moisture and their temporal and spatial dimensions in marginal areas of cavernous salt structures. Through the close cooperation of science and industry, issues of result scalability can be addressed because experiments are performed not only in the laboratory and on the computer but also in situ, in an underground mine. This validates the application of the results to real scenarios such as cavern storage facilities and natural cavernous structures in salt deposits.*



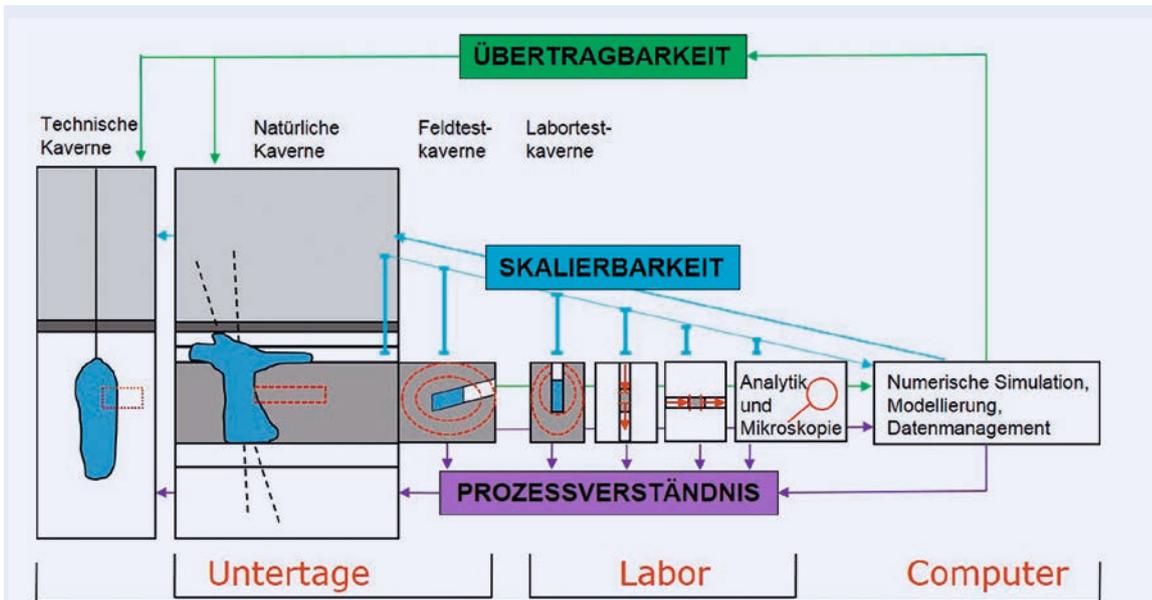


Abb. 1: Schematischer Überblick über die Arbeiten in ProSalz mit Bezug zu den übergeordneten Fragen zum Mehrphasensystem Salz-Wasser-Gas: Welche Prozesse laufen ab und wie? Sind experimentelle mit numerischen Simulationen auf verschiedenen Skalen vergleichbar und letzten Endes auf Speicherkavernen und Salzlösungsvorkommen im Untergrund übertragbar?

Fig. 1: Schematic overview of the work-flow in ProSalz with respect to the overall questions on the multiphase system salt-water-gas: Which processes take place and how? Are, on different scales, experimental and numerical simulations comparable and ultimately applicable to storage caverns and salt solution deposits in the subsurface?

Im Kontext der Energiewende ist die sichere und nachhaltige Nutzung von unterirdischen Kavernen im Salzgestein zur Zwischenspeicherung von Energiestoffen, wie z. B. Erdgas, von hoher gesellschaftlicher Relevanz. Speicherkavernen sind schon heute im konventionellen Betrieb, doch gilt es, bekanntes Wissen zu erweitern: denn zum einen ist es geplant, die Palette einzuspeichernder Stoffe zu vergrößern, zum anderen muss auf Grund des steigenden Bedarfs an Kavernenspeichern auch die Nutzung inhomogener Salzlager in Erwägung gezogen werden. Zunehmend in den Fokus rückt zudem die Fragestellung, mit welchen Konzepten ausgediente Speicherkavernen nachhaltig sicher verwahrt werden können. Zwar sind natürliche Gase und Salzlösungen

über geologische Zeiträume im Salzgestein gespeichert, gleichwohl können Fluide aber auch Migrationswege zu außerhalb der Salzlagerstätte liegenden Schichten öffnen, was eine Gefahr für Infrastrukturen darstellen kann.

Auch im untertägigen Kali- und Steinsalzabbau bestehen sicherheitstechnische und wirtschaftliche Risiken in Verbindung mit natürlichen Gas- und Salzlösungsvorkommen. Hier wird durch ein besseres Verständnis der natürlich ablaufenden Prozesse eine Optimierung der Prognosemöglichkeiten angestrebt (Strauch et al., 2018a).

Zum geomechanischen Verhalten und zur Integrität von Kavernenspeichern wurden umfangreiche Labor- und Feldtests durchgeführt sowie Modellierungsansätze geschaffen (z. B. Düsterloh und Lux, 2012; Bérest et al., 2007; Lux, 2009). Für das Mehrphasensystem Salz-Wasser-Gas fehlen jedoch Laborstudien hinsichtlich der komplexen geochemischen und hydrodynamischen Prozesse, und die Möglichkeiten der numerischen Simulation sind ohne experimentelle Grundlagen begrenzt.

Links: Blick ins Gestein – dieses 10 m tiefe Großbohrloch im Salz wird verschlossen und der Hohlraum als Feldtestkaverne genutzt. (Foto: M. Zimmer, GFZ)

Left: Deep insight into the rock – the 10 m drill hole will be closed and the cavity used to mimic cavern-like processes in salt



Kontakt: B. Strauch  
(bettina.strauch@gfz-potsdam.de)

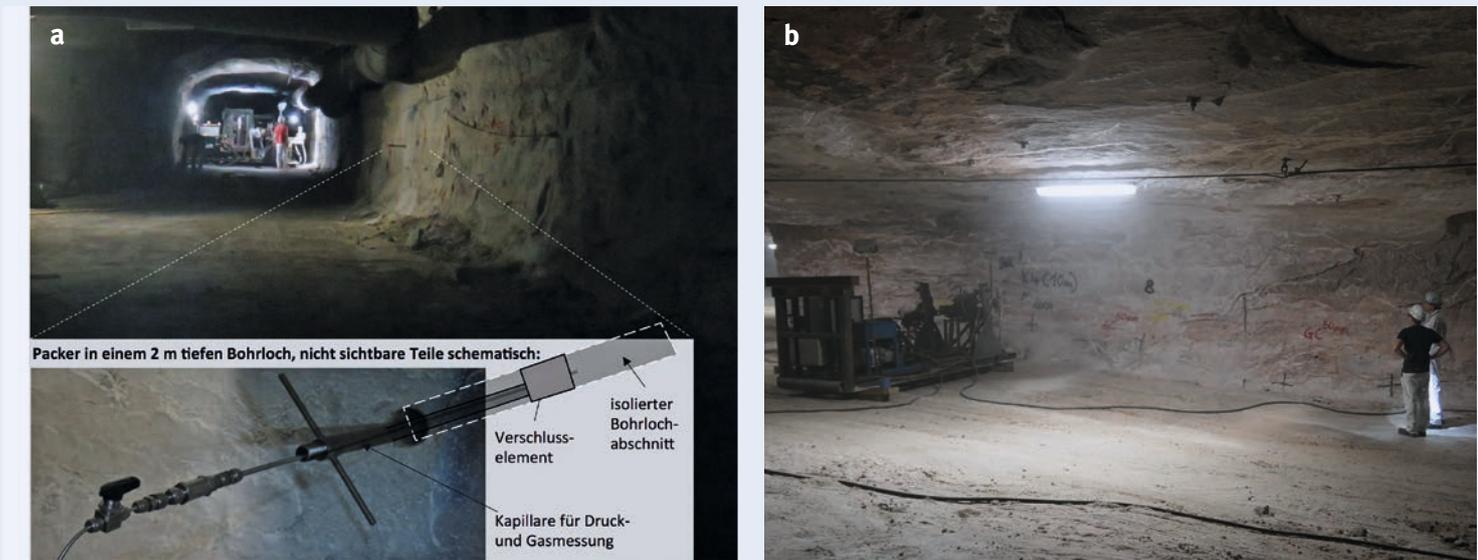


Abb. 2: a) Entlang einer 160 m langen Strecke wurden in regelmäßigen Abständen 2 m lange Bohrkern im Trockenbohrverfahren entnommen, um die Veränderungen von der kavernen Struktur zum unbeeinflussten Gestein im Labor untersuchen zu können. Die Bohrlöcher wurden anschließend mit Packern in 1 m Tiefe verschlossen. So wird im Bohrlochtieftsten ein abgetrennter Hohlraum erzeugt, in dem sich potenziell migrierende Gebirgs-gase sammeln können. In monatlichen Intervallen werden der Druckanstieg und die Gaszusammensetzung im Hohlraum ermittelt (Fotos: B. Strauch, GFZ). b) Vorbereitungen am Pfeiler: Rund um einen Salzpfiler, in dessen Mitte eine Feldtestkaverne hergestellt wird, werden Beobachtungsbohrungen für Seismik und Gasmonitoring abgeteuft. In umfangreichen Experimenten sollen hier Prozesse im Randbereich eines Kavernenhohlraums simuliert werden. (Foto: A. Jurczyk, GFZ)

Fig. 2: a) Drill cores of 2 m in length were taken at regular intervals along a 160 m transect in order to investigate geochemical gradients between the cavernous structure and the salt rock. The drill holes were then sealed with packers at a depth of 1 m. Thus, a separate cavity could be created at the deepest part of the borehole in which potentially migrating gases gather. The pressure increase and gas composition in the cavity are then determined on a monthly basis. b) Preparations at the salt pillar: In the middle of which an artificial test cavern will be constructed in addition to drilling of observation wells for seismic surveying and geochemical monitoring. In an extensive range of experiments, processes underway in marginal areas of cavernous salt structures can be simulated.

Im Fokus des Verbundprojekts ProSalz, welches im Fachprogramm „Geo:N – Geoforschung für Nachhaltigkeit“ durch das BMBF gefördert wird (FKZ 03Go873A), stehen deshalb die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Gasen, inhomogenen Salzen und Feuchte sowie die Quantifizierung von zeitlichen und räumlichen Dimensionen in Randbereichen kaverner Salzstrukturen. In ProSalz arbeiten Wirtschaft und Wissenschaft eng zusammen: Neben dem Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ, das die Projektleitung inne hat, sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg sowie die K+S Aktiengesellschaft und die Untergrundspeicher- und Geotechnologie-Systeme GmbH (UGS) beteiligt. Dieser Verbund ermöglicht es, Fragen der Skalierbarkeit von Untersuchungen anzugehen, indem Prozesse sowohl im Labor und am Rechner simuliert als auch im Untertagelabor, also am anstehenden Salzgestein, beobachtet werden können (Abb. 1). Nur in dieser Kombination ist es möglich, theoretische oder laborbasierte Resultate auf reale Szenarien wie Kavernenspeicherbetriebe und natürliche kavernöse Strukturen in Salzlagerstätten zu übertragen.

## Auf allen Skalen – geochemische Experimente unter Tage und im Labor

Die Durchführung und Bewertung vergleichbarer Experimente auf verschiedenen Skalen stellt die Grundlage für numerische Simulationen dar und bietet die Möglichkeit des „Upscalings“. Durch die Entwicklung übergeordneter Modelle soll die Prognostizierbarkeit von Prozessen verbessert werden, um auch komplexe technische Herausforderungen bewältigen zu können.

Als großskaliges Untersuchungsobjekt des Forschungsvorhabens dient eine in den späten 1950er Jahren entdeckte, natürliche kavernöse Struktur im Grubenfeld eines aktiven Bergwerksbetriebs in Osthessen. Der lösungsbeeinflusste Bereich ist etwa 140 m lang, 60 m breit und 120 m hoch. Die kavernöse Struktur ist ursächlich mit der Ausbildung einer Störungszone im Umfeld des Untersuchungsgebiets verknüpft. Es wird vermutet, dass durch diese Störung mit einem vertikalen Versatzbetrag von bis zu 60 m die salinaren Gesteine Kontakt zu an Stein- und Kalisalzen untersättigten Wässern erhielten und ein langsamer

Lösungsprozess in Gang gesetzt wurde. Mit den Wässern dringt gleichzeitig CO<sub>2</sub>-dominiertes Gas in die Lagerstätte ein, welches den magmatischen Prozessen des tertiären Basaltvulkanismus im Umfeld der Lagerstätte zugeordnet wird.

Dieses natürliche System bietet ideale Voraussetzungen, um Quelle, Dynamik und Mischungen von Fluiden im Salz besser zu verstehen. Hier kann die Übergangszone im Nahbereich einer kavernen Struktur direkt untersucht werden – eine Möglichkeit, die in technischen Speicherkavernen auf Grund ihrer Konstruktion nicht besteht. Zu diesem Zweck wurden in diesem Bereich entlang eines 160 m langen Transekts (Strecke mit Messpunkten in regelmäßigen Abständen) Bohrproben für weiterführende Laboruntersuchungen der Gesteins- und Fluidzusammensetzung entnommen und die 2 m langen Bohrlöcher im Anschluss mit sogenannten Packern verschlossen (Abb. 2a), um durch ein Langzeitmonitoring die Konzentrationen und Zusammensetzung migrierender Gase zu erfassen.

Zudem wird an einer anderen Stelle in einem rund 20 m x 20 m großen Hartsalzpfiler (Abb. 2b) eine Feldtestkaverne hergestellt. Hier werden durch ein variables Befüllen mit Fluiden kavernen-typische Prozesse auf kleinerem Maßstab in situ nachgestellt. Prozesse im Kavernenumfeld können dann mittels Gassensorik, Georadarmessungen und Seismik um den Pfeiler herum beobachtet werden, um die räumliche und zeitliche Fluidausbreitung zu bewerten sowie Rückschlüsse auf Migrationsprozesse im Salinargestein ziehen zu können.

Vergleichend und ergänzend zu den unter Tage durchgeführten Experimenten werden in Laboren des GFZ in klein- und großvolumigen Versuchsaufbauten Kavernenabläufe simuliert und geochemische Fluid-Gestein-Wechselwirkung beobachtet (Abb. 3).

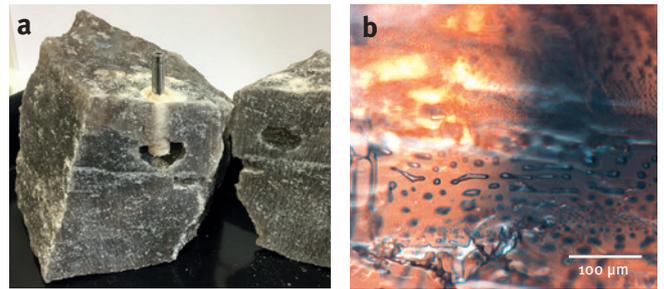


Abb. 3: a) In dezimetergroßen Salzblöcken verschiedener Zusammensetzung werden kavernöse Strukturen erzeugt und deren Randbereiche untersucht. b) Hohlräume auf mikroskopischer Skala: An den Fluideinschlüssen im Salz können die Druck- und Temperaturbedingungen während ihrer Entstehung sowie verschiedene Phasen von Fluidbewegungen rekonstruiert werden. (Fotos: B. Strauch, GFZ)

Fig. 3: a) Cavern-structures are created by leaching in decimeter-sized salt blocks of different composition. These structures are used to observe processes along the cavern rim on a small experimental scale. b) Cavens on a microscopic scale: The fluid inclusions in the salt can be used to reconstruct the pressure and temperature conditions during their formation and different phases of fluid movements.

Beispielsweise wird die Salzmineralogie unter den Einflüssen von Feuchtigkeit, Temperatur und Gas untersucht, um auf den zeitlichen Verlauf von Phasenumwandlungen und Lösungsprozesse der Salze zu schließen. Dazu wird die Probe in einer Feuchtechamber, welche an ein Röntgendiffraktometer gekoppelt ist, in situ analysiert (Abb. 4 rechts). In ersten Experimenten konnte hier die Umwandlung von Carnallit in Sylvin (Abb. 4 links) unter dem Einfluss von Feuchte und verschiedenen Gasen simuliert werden (Strauch et al., 2018b).

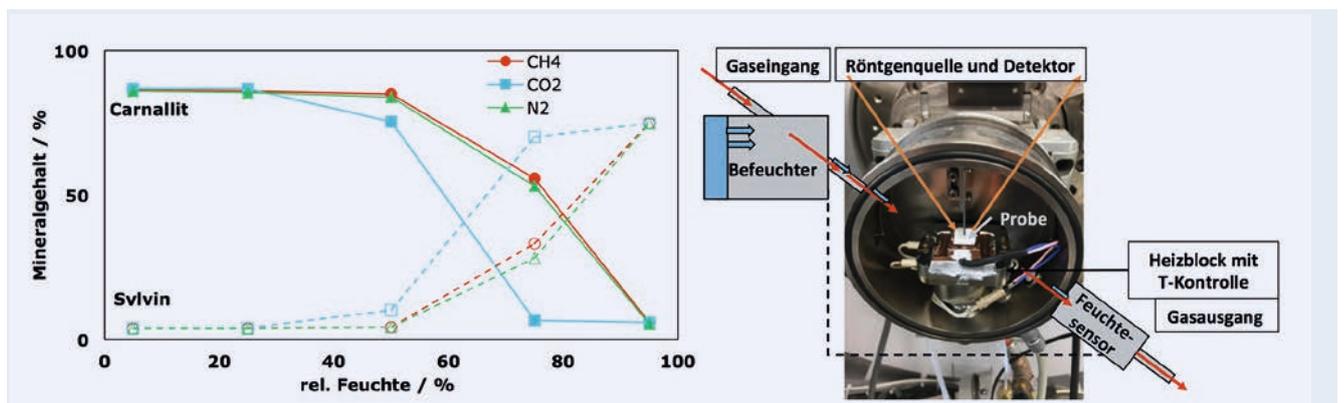


Abb. 4: Beobachtungen in einer Feuchtechamber mit Hilfe eines Röntgendiffraktometers: Eine carnallitreiche Salzprobe verändert ihre Mineralzusammensetzung zu Gunsten von Sylvin mit zunehmender Feuchte. Auffällig ist die schnellere Mineralumwandlung in Gegenwart von CO<sub>2</sub>.

Fig. 4: XRD observations in a humidity chamber: with increasing humidity, a carnallite-rich salt sample changes its mineral composition in favor of a sylvite. First results also show that this reaction is enhanced by the presence of CO<sub>2</sub>.



Abb. 5: DeltaRay-Infrarot-Spektrometer zur Messung von stabilen Isotopenverhältnissen an CO<sub>2</sub>. Hierbei können sowohl <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C- als auch <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O-Verhältnisse gemessen werden. (Foto: S. Meyer, Universität Erlangen-Nürnberg)

Fig. 5: DeltaRay Infrared Spectrometer for the measurement of stable isotope ratios of CO<sub>2</sub>. Both <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C and <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O ratios can be measured.

## Stabile Isotope als Tracer in Salzlagerstätten

Die chemische Zusammensetzung des Salzes gibt Informationen über Herkunft und Lagerungsbedingungen von Salzlagerstätten. Stabile Isotopenverhältnisse des Wassers, oder Isotopenverschiebungen von Gasen im Salz, können darüber hinaus wichtige Hinweise zu Schwächezonen und Interaktionen zwischen Lagerstätte, Gas und Wasser liefern.

Mit neu entwickelten Messinstrumenten (Abb. 5) können CO<sub>2</sub>- und Wasser-Isotopenverhältnisse bestimmt werden, um neben Konzentrationen auch Herkunft und Umsetzungen dieser Phasen näher einzugrenzen. Beispielsweise ist bekannt, dass CO<sub>2</sub> aus tieferen Schichten der Erdkruste und des Erdmantels einen eng vorgegebenen Bereich von <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C-Verhältnissen aufweist. Somit können Eindringstellen großer Mengen CO<sub>2</sub> in Minen frühzeitig erkannt werden. Wenn die isotopischen Endpunkte von unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Quellen (z. B. Mantel oder Umgebungsluft) gut charakterisiert sind, lassen sich zudem über Massenbilanzen die Mengen der verschiedenen CO<sub>2</sub>-Gase berechnen.



Abb. 6: Untertägiger seismischer Messeinsatz im Bergwerk. Die programmgesteuerte seismische Quelle überträgt elastische Wellen in den Untergrund, welche von Sensoren empfangen und über ein Datenakquisitionssystem (DAQLINK) registriert werden. (Fotos: R. Giese, GFZ)

Fig. 6: Seismic survey in the mine. The seismic source transmits elastic waves into the salt rocks which are received by sensors and transferred to the data acquisition system.

## Seismische Messungen bringen Licht ins Dunkel

Bei den großskaligen Untersuchungen unter Tage kommt auch Seismik zum Einsatz, wobei sowohl das intakte anstehende Salzgestein als auch Zonen mit natürlich induziertem Fluidtransport untersucht werden. Die Anregung der seismischen Wellen im Festgestein erfolgt über einen magnetostriktiven Vibrator. Über Geophone, die im Festgestein verankert sind, werden die Wellen empfangen, digitalisiert und gespeichert. Im Januar 2018 erfolgte ein zweiwöchiger Messeinsatz unter Tage entlang des oben beschriebenen Transekts zur Erkundung der Übergangszone zwischen ungestörtem Salzgestein und der natürlich gelösten kavernösen Struktur im Vorfeld der Strecken (Abb. 6).

Ein zweiter Versuchsaufbau wird derzeit am untertägigen Salzpfeiler realisiert, um die räumliche und zeitliche Fluidausbreitung um die Feldtestkaverne zu detektieren. Das seismische Monitoring beginnt mit einer Basismessung, gefolgt von mehreren Messungen nach dem Befüllen der Kaverne mit verschiedenen Fluiden. Bei der Größe des Salzpfeilers von etwa 20 m x 20 m werden seismische Wellen mit hohen Frequenzen (100 Hz bis 20 kHz) in das Salzgestein übertragen. Dies ermöglicht eine Auflösung von Strukturen im Zentimeterbereich. Der Einsatz eines ähnlichen seismischen Messsystems soll die Ergebnisse der Feldtestkaverne mit denen der natürlichen kavernösen Struktur vergleichbar machen und damit übertragbar auf verschiedenste lösungsbeeinflusste Randbereiche kavernöser Strukturen natürlichen und künstlichen Ursprungs.

## Simulationen – ein Blick zurück für den Blick nach vorn

Mithilfe numerischer Simulationen wird die Entstehung geogener Kavernen untersucht und gezeigt, was langfristig geschieht, wenn Grundwasser über hydraulische Wegsamkeiten in Kontakt mit Salzgestein kommt. Dabei wird aufgezeigt, welche geochemischen und hydrodynamischen Prozesse zu erwarten sind und in welchen Zeiträumen sie die Bildung kavernöser Strukturen beeinflussen. Um eine bessere Interpretation der anstehenden Salzzusammensetzung zu ermöglichen, werden Mineralumwandlungen im Einflussbereich geogener Salzlösungsvorkommen numerisch simuliert. Die verwendeten Modelle werden mit Labor- und Feld-

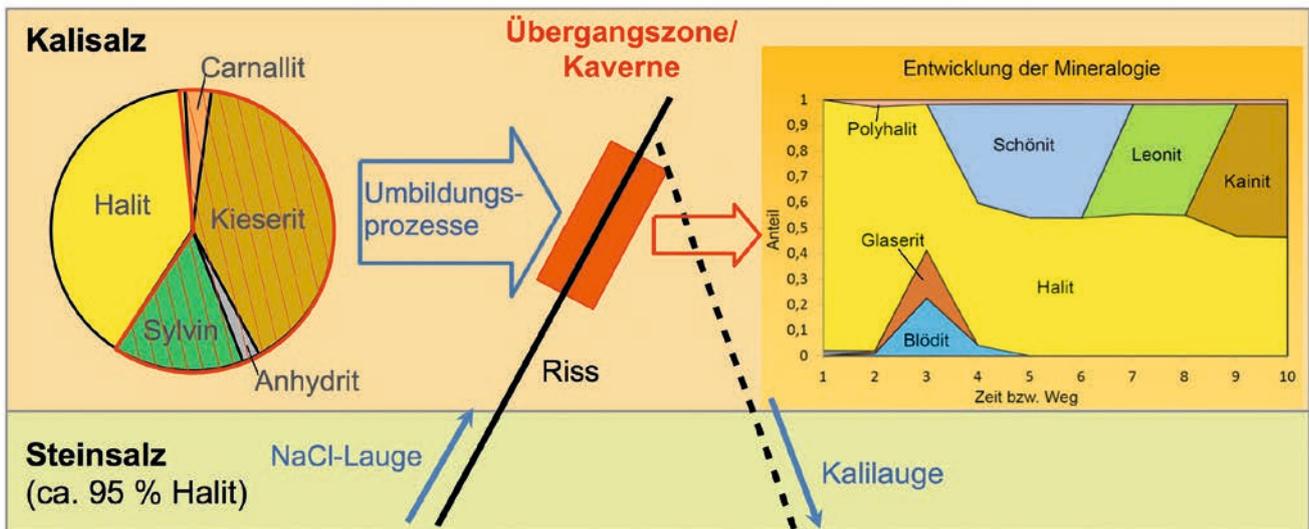


Abb. 7: Modellierung der Prozesse bei der Bildung von Lösungskommen entlang von Wegsamkeiten (z. B. Rissen) im Kalisalz.

Fig. 7: Modelling of the processes involved in the formation of saline solutions along pathways (e. g. cracks) within potash salt deposits.

experimenten kalibriert, validiert und so sukzessive in ihrer Komplexität erhöht, um sich den realen Prozessen anzunähern. Im Kaliflöz ist die Kavernenbildung auf Grund der hohen Löslichkeit der Mineralanteile oft ausgeprägter als im Steinsalz. Im Rahmen von ProSalz wird das Lösungsverhalten verschiedener Kalisalze sowohl numerisch als auch experimentell simuliert (Abb. 7). Die ersten Ergebnisse zeigen, dass einige Anteile des Kalisalzes beim Kontakt mit Sole in Lösung gehen, während andere kaum reagieren. Infolgedessen stellt eine Kaverne hier keinen klar abgegrenzten Hohlraum dar, sondern ist eher von einer porösen Schwammstruktur umrandet. Mithilfe der Modellierungsergebnisse können die Ausbildung und Beschaffenheit der Übergangszone sowie die Mineralogie des angrenzenden Gesteins dargestellt werden. Die Kopplung von Geochemie und Hydraulik des Stofftransports dient der räumlichen Auflösung der Prozesse in Übergangszonen zwischen Festgestein und Kaverne. Auf diese Weise werden die Entstehungsgeschichte der Kaverne qualitativ und quantitativ erfasst und Entwicklungsprognosen ermöglicht.

## Ausblick

Der interdisziplinäre Ansatz von ProSalz vereint die unterschiedlichen Herangehensweisen und Untersuchungskonzepte der Geophysik, Geochemie, Modellierung und der Salzindustrie. In ihrer Kombination können so Prozesse in Kavernenrandbereichen auf verschiedenen Skalen bestmöglich verstanden werden. Die Ergebnisse legen den Grundstein für eine faktenbasierte Bewertung von Salzlösungskommen natürlichen oder künstlichen Ursprungs und eine frühzeitige Abschätzung möglicher Gefährdungspotenziale wenn Salz, Wasser und Gas sich treffen. Darüber hinaus liefern die Daten einen wertvollen Beitrag zur Kavernenspeicherkonzeption, von der Standortsuche bis zur Stilllegung.

## Danksagung

Den Mitarbeitern der K+S KALI GmbH und dem technischen Personal am/des GFZ gebührt besonderer Dank für die Unterstützung bei der Probennahme und der technischen Umsetzung der Experimente unter Tage und im Labor.

## Literatur

- Bérest, P., Brouard, B., Karimi-Jafari, M., Van Sambeek, L. (2007): Transient behavior of salt caverns – interpretation of mechanical integrity tests. – In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 5, pp. 767–786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmm.2006.11.007>
- Lux, K.-H. (2009): Design of salt caverns for the storage of natural gas, crude oil and compressed air: geomechanical aspects of construction, operation and abandonment. – In: Evans, D. J., Chadwick, R. A. (Eds.), *Underground gas storage: worldwide experiences and future development in the UK and Europe*, (Geological Society special publications; 313), London: Geological Society, pp. 93–128. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP313.7>
- Lux, K.-H., Düsterloh, U. (2012): Mechanisches Verhalten von Steinsalz – Laborversuche und Modellierung. – In: Projektträger Karlsruhe Wasertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE (Hrsg.), *Entsorgung chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen: Abschlussveranstaltung des BMBF-Förderschwerpunktes*, 14. und 15. Februar 2012 am KIT Campus Nord, (Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE; 13), pp. 328–384.
- Strauch [Beeskow-Strauch], B., Zirkler, A., Myrntinen, A. (2018a): Das Forschungsprojekt ProSalz: Prozessverständnis, Skalierbarkeit und Übertragbarkeit von reaktivem Mehrphasentransport in Salzlagerstätten. - *Kali und Steinsalz*, 02/2018, pp. 18–29.
- Strauch [Beeskow-Strauch], B., Zimmer, M., Zirkler, A., Höntzsch, S., Schleicher, A. M. (2018b): The influence of gas and humidity on the mineralogy of various salt compositions – implications for natural and technical caverns. - *Advances in Geosciences*, 45, pp. 227–233. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-227-2018>

# Erdbebengefährdung Deutschlands – neu bewertet für aktuelle Baunorm

Gottfried Grünthal, Dietrich Sromeyer, Christian Bosse, Fabrice Cotton, Dino Bindi  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The basic seismic load parameters for the upcoming national design regulation for DIN EN 1998-1/NA result from the reassessment of the seismic hazard supported by the German Institution for Civil Engineering (DIBt). This study is based on a comprehensive involvement of accessible uncertainties in models and parameters. It includes the provision of a rational framework for integrating epistemic uncertainties and aleatory variabilities in a comprehensive way and incorporates significant improvements. It is based on updated and extended databases, robust methods to evolve sets of models representing epistemic uncertainties and a selection of latest : ground shaking prediction models. The output specifications were designed according to the user oriented needs: Seismic load parameters are calculated for rock conditions, mean return periods of 475, 975 and 2475 years and delivered as uniform hazard spectra, seismic hazard maps for peak ground acceleration, spectral response accelerations and macroseismic intensities as mean, median and 84 % quantile. Examples of some elements of the input and a few basis results are shown.*



Eine Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands wurde im vergangenen Jahr von einem Team der Sektion 2.6 „Erdbebengefährdung und dynamische Risiken“ des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ veröffentlicht. Die wissenschaftliche Herausforderung bestand darin, die Unsicherheiten in allen Ausgangsmodellen und Eingangsparametern in möglichst vollem Umfang in der Analyse zu berücksichtigen, um sie erstmals für eine regionale seismische Gefährdungseinschätzung in den berechneten Erschütterungsparametern gesichert quantifizieren zu können.

Hört man von schadenverursachenden Erdbeben, hat man diese für Deutschland eher nicht im Sinn. Diese werden richtigerweise eher mit Regionen in Italien, dem östlichen Mittelmeerraum oder dem Zirkumpazifik verbunden. Trotz der relativ geringen Seismizität in Deutschland können auch hier auftretende Erdbeben ein zerstörerisches Schadensausmaß annehmen und höhere Schäden als die wesentlich häufigeren Stürme und Überschwemmungen verursachen. Daher ist in Deutschland eine entsprechende Baunorm zum erdbebengerechten Konstruktionsentwurf mit der Zielstellung des Bevölkerungsschutzes auch für normale Bauten bereits 1981 eingeführt worden. Für Objekte, von denen ein erhöhtes Risiko ausgeht, wie Staudämme, chemische und kerntechnische Anlagen, gelten entsprechende offizielle Regelungen zum Nachweis der Erdbebensicherheit. Dem generell relativ seltenen Auftreten zerstörerischer Beben wird in entsprechenden Regelwerken im internationalen Maßstab dadurch Rechnung getragen, dass Sicherheiten zum Konstruktionsentwurf bereits für relativ kleine Eintreffens- und Überschreitenswahrscheinlichkeiten potenziell zerstörerischer Erschütterungen normungsrelevant sind, wie 10 % Wahrscheinlichkeit innerhalb von 50 Jahren (a) Standzeit, dem eine mittlere Wiederholungsperiode (Return Period RP) von 475 a entspricht. Für Bauten mit erhöhtem Risikopotenzial, wie z. B. größere Staudämme, gelten in Deutschland Vorschriften zu Sicherheitsnachweisen für erdbebenbedingte Erschütterungen mit  $RP = 2500 \text{ a}$  (2 % in 50 a bzw. 4 % in 100 a) sowie für Kernkraftwerke  $RP = 10^5 \text{ a}$ . Somit kommt dem Wissen zur Erdbebengefährdung eine besondere sicherheitsrelevante, ökonomische und versicherungswirtschaftliche Bedeutung zu mit einer großen gesellschaftlichen Verantwortung für die wissenschaftliche Erarbeitung seismischer Gefährdungsaussagen.

*Links: Durch das Albstadt-Erdbeben am 3. September 1978 beschädigte und gesicherte Gebäude im Ortsteil Tailfingen (Foto: Landesstelle für Bautechnik Baden-Württemberg)*

*Left: Damaged buildings in Tailfingen, secured to prevent them from further damage or collapsing due to the 3 September 1978 Albstadt earthquake*

Neueinschätzungen der Erdbebengefährdung werden notwendig, wenn sich signifikante Entwicklungen seitens der Methodik oder der Datenbasis ergeben haben. Da die bisherige normungsrelevante Erdbebenzonenkarte bereits 1995 seitens der zuständigen GFZ-Sektion (Grünthal und Bosse, 1996) an das Deutsche Institut für Normung (DIN) übergeben wurde, signalisierte der zuständige DIN-Normungsausschuss 2010, ein neues Projekt zu unterstützen. Finanzielle Förderung wurde, wie bei analogen früheren Projekten, vom Deutschen Institut für Bautechnik bereitgestellt. Von dort und dem Normungsausschuss wurden zwei Review-Teams erfahrener Bauingenieure als unmittelbare Nutzer unserer Arbeiten eingesetzt, die das Projekt permanent konstruktiv begleiteten. Die 2010 begonnenen Arbeiten wurden 2016 fertiggestellt und dem Normenausschuss zu Testzwecken übergeben. Eine ausführliche Dokumentation mit transparenter Bereitstellung des gesamten Inputs erfolgte in Grünthal et al. (2018a, b). Nach intensiver Diskussion im Normungsausschuss wurden die Resultate in der Entwurfsfassung des Nationalen Anhangs (NA) des europäischen Normungswerkes DIN EN 1998-1/NA:2018-10 veröffentlicht. Nach Durchlaufen des Normungsprozederes ist geplant, den NA 2019 bauaufsichtlich einzuführen.

Sämtliche normungsrelevanten seismischen Gefährdungskarten für die Bauindustrie und den Anlagenbau wurden somit vom GFZ bereitgestellt – mit der ersten derartigen Karte von 1992. Darüber hinaus bilden diese Karten und Modelle die entsprechende Grundlage für die Versicherungsindustrie anhand von Verträgen mit der Deutschen Rückversicherung AG und dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., denn Erdbeben gehören in den Hauptbebengebieten Deutschlands für kleine Eintreffenswahrscheinlichkeiten neben Überschwemmungen und Stürmen zu den größten Verursachern von Elementarschäden.

## Seismizität

Erdbebengefährdungseinschätzungen können nur so gut sein, wie die natürliche tektonische Seismizität des Untersuchungsgebiets bekannt ist mit möglichst weit in die Historie zurückreichenden und bezüglich der Magnitude harmonisierter Daten. In solche Analysen ist ein Gebiet einzubeziehen, das alle Erdbebenquellregionen umfasst, die Auswirkungen auf die Zielregion Deutschland haben, was mindestens zusätzliche 300 km ausmacht. Einen Teil des Untersuchungsgebiets zeigt die Epizentrenkarte der Abb. 1 mit einer größeren Umgebung Deutschlands (links). Diese Karte mit den katalogisierten Beben ab 1000 AD macht deutlich, dass die größte Bebenaktivität nördlich der tektonisch aktiven alpidischen Zone entlang der Rheinschiene nördlich von Basel beobachtet wird. Die rechte Karte zeigt das Zielgebiet in höherer Auflösung mit gut identifizierbaren Regionen erhöhter Bebenaktivität, wobei kein Teil als aseismisch anzusehen ist. Eine Auswahl stärkerer Beben in Deutschland samt unmittelbarer Umgebung seit 1910 wird in Tab. 1 gegeben.



**Kontakt:** G. Grünthal  
(ggrue@gfz-potsdam.de)

Tab. 1: Auswahl stärkerer Beben in Deutschland samt unmittelbarer Umgebung seit 1910

Tab. 1: Selection of stronger earthquakes in Germany including their immediate surroundings since 1910

Ort (Bundesland oder Land)	Jahr	Maximale Intensität	Magnituden		Tote, beschädigte Gebäude, Schadenhöhe*
			$M_l$	$M_w$	
Albstadt (BW)	1911	VIII	6,1	5,7	6250 beschädigte Gebäude; 0,75 Mio. RM
Bad Saulgau (BW)	1835	VII-VIII	5,8	5,4	
Albstadt (BW)	1943	VII	5,6	5,3	
Euskirchen (NRW)	1951	VII-VIII	5,7	5,1	
Albstadt (BW)	1978	VII-VIII	5,7	5,2	6850 beschädigte Gebäude; 275 Mio. DM
Liège (im Osten Belgiens)	1983	VII	5,0	4,6	2 Tote, 26 Verletzte, Hunderte beschädigte Gebäude, 100 Mio. DM
Roermond (NL) / Heinsberg (NRW)	1992	VII	5,9	5,3	1 Toter, 25 Verletzte, 7200 beschädigte Gebäude, 290 Mio. DM
Rambervillers (F, Vogesen)	2003	VI-VII	5,9	4,8	10,5 Mio. €
Waldkirch/Kandelwald (BW)	2004	VI	5,4	4,6	etwa 3 Mio. €

\* Schadenhöhe in jeweiliger Währung und nicht inflationsbereinigt

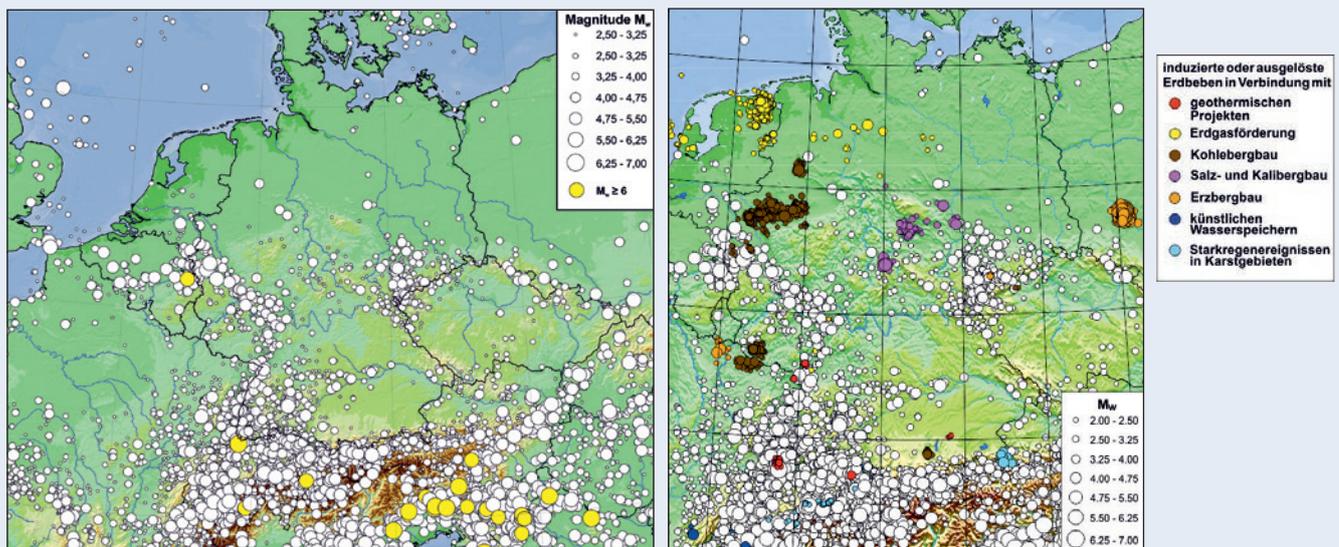


Abb. 1: Natürliche tektonische Erdbeben im Untersuchungsgebiet seit 1000 AD (links) mit gelb markierten Erdbeben für Momentmagnituden  $M_w \geq 6,0$ . Rechts ausschnittvergrößert mit zusätzlicher Darstellung induzierter seismischer Ereignisse nach Grünthal (2014). Datenbasis vom Europäischen-Mediterranen Erdbebenkatalog (Grünthal und Wahlström, 2012) erweitert und bis 2014 aktualisiert

Fig. 1: Natural tectonic earthquakes in the study area since 1000 AD (left) with highlighted earthquakes for moment magnitudes  $M_w \geq 6,0$ . Right: enlarged and with additionally depicted induced seismic events after Grünthal (2014). Database of the European-Mediterranean earthquake catalogue (Grünthal and Wahlström, 2012), updated and extended up to 2014

Zusätzlich zeigt die rechte Karte die durch menschliche Tätigkeit im Untergrund verursachte und ökonomisch hoch relevante induzierte Seismizität (Grünthal, 2014). Deren Typen werden innerhalb gut zu umreißender Zonen beobachtet. Ihre Aktivität korreliert unmittelbar mit der Intensität menschlicher Eingriffe in den Untergrund. Zudem gelingt es zunehmend, durch verbesserte Technologien die Magnituden solcher induzierter Ereignisse zu begrenzen. Diese somit stark zeitabhängige Aktivität induzierter Ereignisse ist nicht Gegenstand der Gefährdungsanalyse infolge tektonischer Beben für entsprechende Baunormen.

Anhand der beobachteten Anzahl von Erdbeben innerhalb von Klassen der Momentmagnituden  $M_w$  und der Zeitbereiche ihrer hinreichend vollständigen Katalogisierung lässt sich die jährliche Rate ihres Auftretens bestimmen. Der Reziprokwert der Rate ergibt deren mittlere RP. Abbildung 2 zeigt die kumulative Häufigkeit von Beben innerhalb von Magnitudenklassen in Deutschland inkl. eines Randsaums von etwa 10 km mit den Werten von RP für Beben der Klassenmitten von  $M_w=3,5$ , 4,5 und 5,5.

## Das Berechnungsmodell

Im Rahmen seismischer Gefährdungsabschätzungen werden für einen vorgegebenen Punkt die Wahrscheinlichkeiten berechnet, mit denen zu betrachtende Bodenerschütterungsparameter erreicht oder überschritten werden. Hierfür werden ineinandergreifende geologisch-tektonische, physikalische und mathematische Modelle für die Parameter mit epistemischen Unsicherheiten entwickelt. Bezüglich der prinzipiellen methodischen Grundlagen sei verwiesen auf einen früheren Beitrag in dieser Reihe (Grünthal *et al.*, 2013) sowie im Speziellen auf Grünthal *et al.* (2018a, b). Die gesamte physikalisch, geologisch-tektonisch und logisch begründete Bandbreite des Inputs (Modelle und Ausgangsparameter) kam zur Anwendung, um das Ziel der umfassenden Berücksichtigung der Unsicherheiten erfolgreich umzusetzen. Aufbauend auf dieser Prämisse wurden die epistemischen Modellunsicherheiten in einem aus zehn Knotenebenen bestehenden Logischen Baum berücksichtigt, welcher insgesamt 4040 Endzweige mit jeweiliger Gewichtung besitzt. Für jeden dieser Endzweige war das Totale Wahrscheinlichkeitsintegral über fünf zu betrachtende Parameter mit aleatorischer Variabilität zu lösen. Die Berechnungen erfolgten für Gitterpunkte im Abstand von  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  innerhalb Deutschlands samt Randsaum, für angenommenen Festgesteinsuntergrund, für 15 vorgegebene Werte von 19 Spektralstützstellen der Antwortbeschleunigungen, Spitzenbodenbeschleunigungen (PGA) sowie makroseismischen Intensitäten und für 394 seismische Quellen. Gefährdungskonsistente Antwortbeschleunigungsspektren im Periodenbereich von 0,01 bis 3,0 s dienen im Erdbebenbauingenieurwesen als Modell für die Schwingungsantwort von Gebäuden auf Erdbebenanregungen. Somit ergeben sich  $2,65 \times 10^{12}$  auszuführende Integrationen.

Eine maßgebliche Modellgruppe im Hinblick auf realistische Gefährdungsabschätzungen ist die zur Prognose magnituden- und entfernungsabhängiger Starkbodenbewegungen. Hierzu konnte auf eine neue Generation solcher Modelle zurückgegriffen werden, die zu deutlich besser abgesicherten Ergebnissen führt. Eine der vielfältigen Innovationen betraf die Entwicklung und den Einsatz einer neuen Methodik zur mathematisch korrekten Unsicherheitsmodellierung der kumulativen Raten der Magnitudenhäufigkeit in Abhängigkeit von der Diskretisierung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion maximaler Magnituden  $M_{max}$  einer seismischen Quelle (Stromeyer und Grünthal, 2015). Diese stellt *de facto* das Rückgrat probabilistischer seismischer Gefährdungsabschätzung dar. Abbildung 3 zeigt am Beispiel einer der 394 seismischen Quellen der fünf Quellenmodelle die gewichtete  $M_{max}$ -abhängige Unsicherheitsmodellierung – und zwar für die Quelle relativ geringer Aktivität „Thüringer Becken/Hessische Senke“ von einem der großräumigen Quellenmodelle.

## Auswahl von Resultaten

Die Berechnungsergebnisse der probabilistischen Neueinschätzung der Erdbebengefährdung wurden in enger Abstimmung mit den Review-Teams gemäß den Erfordernissen des NA der neuen Baunorm parametrisiert. Diese Parametrisierungen lassen sich

aus den primären Resultaten für jeden Gitterpunkt in Form von Gefährdungskurven ableiten. Abbildung 4 zeigt eine typische Gefährdungskurve (am Beispiel von Köln) mit erwarteten jährlichen Auftretensraten der PGA bis  $10^{-5}$  p. a. für alle Quantile von 1% bis 99% mit hervorgehobenen Kurven für die Median- und Mittelwerte sowie den 16%- und 84%-Quantilen.

Aus den Berechnungen der betrachteten Antwortbeschleunigungen werden gefährdungskonsistente Antwortspektren (Uniform Hazard Spectra UHS) erstellt, die in verallgemeinerter Form unmittelbar in Baunormen einfließen und den Standsicherheitsnachweisen des Erdbebeningenieurwesens zugrunde liegen. Abbildung 5 zeigt solche UHS für die drei betrachteten Gefährdungsniveaus, die für den NA gefordert sind (10%, 5% und 2% Überschreitungswahrscheinlichkeit in 50 a Standzeit, denen RP von 475, 975 und 2475 a entsprechen) am Beispiel von Aachen für Median- und Mittelwerte sowie die 16%- und 84%-Quantile. Der zuständige Normenausschuss hat die Mittelwerte anhand der Berechnungen gemäß dem Logischen Baum als normungsrelevant bestimmt.

Aus den Mittelwerten der größten Amplituden in den UHS bei Perioden von 0,1, 0,15 und 2 s folgen die Erdbebengefährdungskarten, die direkt in den NA der Norm einfließen und das Plateau der UHS repräsentieren. Abbildung 6 zeigt eine dieser Plateaukarten für  $RP = 475$  a. Zur Verdeutlichung des Unsicherheitsbereichs sind die Karten für den Median und für das 84%-Quantil zusätzlich dargestellt. Die neuen UHS und Erdbebengefährdungskarten zeigen eine hohe Persistenz zu den früheren Resultaten.

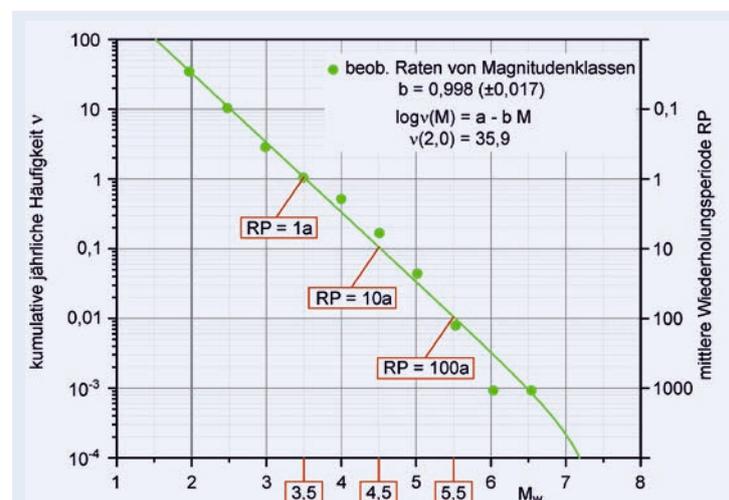


Abb. 2: Kumulative Häufigkeitsverteilung beobachteter jährlicher Raten von Erdbeben in Magnitudenklassen in Deutschland samt einem Randsaum von etwa 10 km mit den Parametern der Magnitudenhäufigkeitsverteilung sowie den mittleren Wiederholungsperioden (RP) von Beben

Fig. 2: Cumulative frequency relation of observed yearly rates of earthquakes within magnitude classes inside Germany plus a margin of about 10 km with the parameters of the frequency-magnitude relation as well as the mean return periods RP of earthquakes

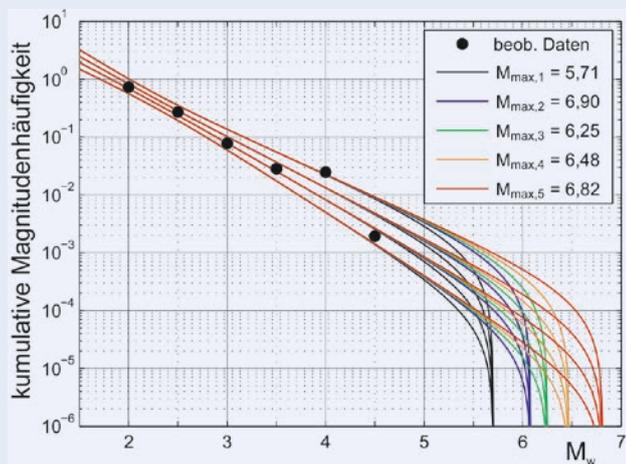


Abb. 3: Unsicherheitsmodellierung der kumulativen Raten der Magnitudenhäufigkeit in Form von vier Verteilungen in Abhängigkeit von diskretisierten Werten maximaler Magnituden  $M_{max}$  am Beispiel der seismischen Quelle „Thüringer Becken/Hessische Senke“. Beide innere Verteilungen haben das Gewicht von 0,45 und die äußeren von 0,05. Die Gewichte der  $M_{max,i}$  sind gleich.

Fig. 3: Modelling of the uncertainty of cumulative rates of frequency magnitudes as four distributions depending on discretized values of maximum magnitudes  $M_{max}$  for the seismic source Thuringian basin/Hessian depression". Both inner distributions have a weight of 0.45 and both outer ones of 0.05. The weights of the  $M_{max,i}$  are the same.

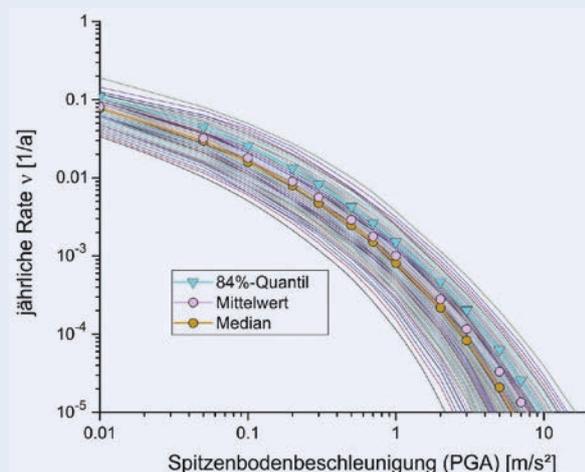


Abb. 4: Typische Gefährdungskurve, hier für Köln für PGA und alle Quantile von 1% bis 99%. Median, Mittelwerte und das 84 %-Quantil sind hervorgehoben.

Fig. 4: Typical hazard curve, here for the location Cologne for PGA for all quantiles from the 1% to 99%. Median, mean and the 84 % quantile are highlighted.

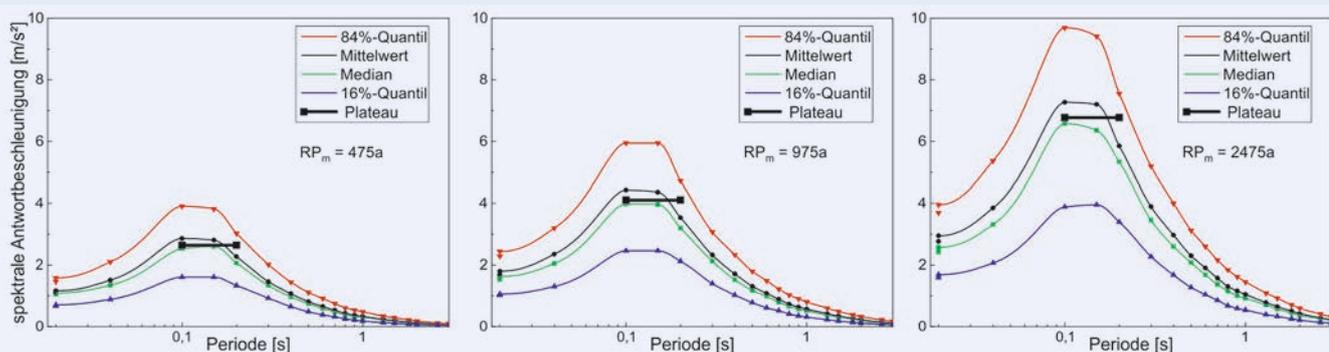


Abb. 5: UHS für Aachen für mittlere Wiederholungsperioden  $RP = 475, 975$  und  $2475$  a für die Quantile von 16%, 50% und 84% sowie Mittelwerten. Der Periodenbereich, aus dem ein Plateaubereich für die Kartengenerierung gebildet wird, ist gekennzeichnet.

Fig. 5: UHS for the city of Aachen for mean return periods  $RP = 475, 975$  and  $2475$  a respectively for quantiles of 16%, 50% and 84% and for mean values. The period range from which a plateau level for map generation is formed is marked.

## Fazit und Ausblick

Der Fokus der hier vorgestellten Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands liegt auf einer möglichst vollständigen Einbeziehung von Unsicherheiten in allen Modellen und Ausgangsparametern. Das gestattet nicht nur die Gefährdung gesicherter einzuschätzen, sondern auch deren Unsicherheiten zu quantifizieren. Anhand der methodischen Innovationen liegen Ergebnisse vor, die dem neuesten Stand der Forschung nicht nur entsprechen, sondern ihn für schwach bis mittelstark seismisch aktive Gebiete mitbestimmen. Die Resultate bilden das ingenieurseismologische Rückgrat der neuen Baunorm zum erdbebengerechten Konstruktionsentwurf und fließen direkt in Modellierungen des Erdbebenrisikos der Versicherungswirtschaft ein. Mit diesen direkten Beiträgen der Forschungsergebnisse zur Langfristvorsorge vor einer Naturgefahr wird die unmittelbare gesellschaftliche und ökonomische Relevanz deutlich.

Die künftigen Arbeiten zu Erdbebengefährdungseinschätzungen werden sich neben permanenter Aktualisierung der Ausgangsdaten auch der Einengung der nicht unerheblichen Unsicherheiten in den Resultaten widmen. Dazu wäre die teils beträchtliche Variabilität in Ausgangsmodellen zu verringern, was anhand verbesserter Erkenntnisse z. B. zu Starkbodenbewegungen bei verschiedenen Untergrundbedingungen oder zum räumlichen Auftreten von Beben möglich wird. Zu letzterem tragen u. a. vertiefende neotektonische Untersuchungen bei.

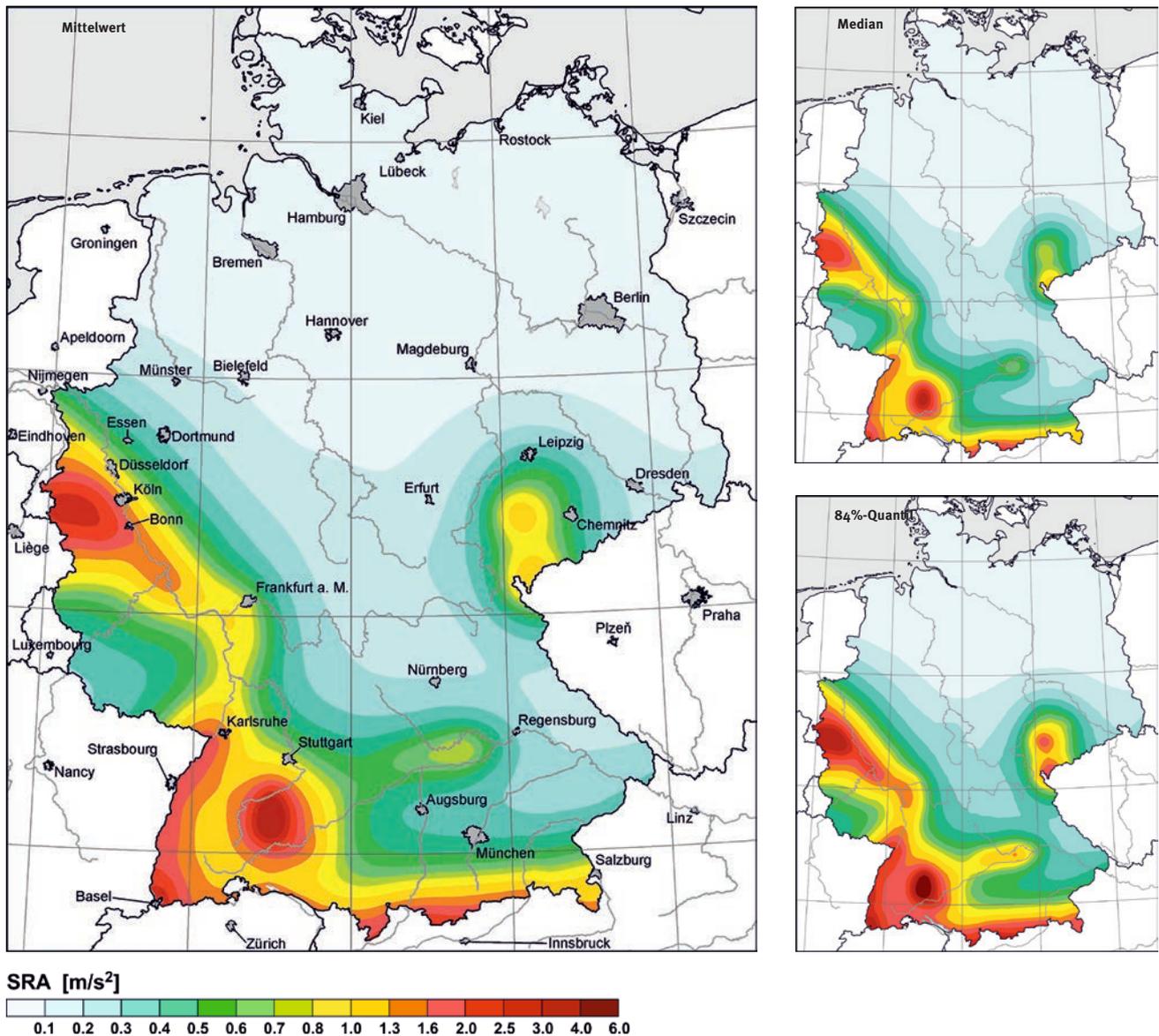


Abb. 6: Seismische Gefährdungskarten für Mittelwerte von Antwortbeschleunigungen von 0,1, 0,15 und 0,2 s (mean SRA) für die mittlere Wiederholungsperiode  $RP = 475$  a; Mittelwerte aus Logischem Baum (links), Median (rechts oben) mit zugehörigem 84%-Quantil (rechts unten). Normungsrelevant ist die Karte der Mittelwerte.

Fig. 6: Seismic hazard maps for the mean values of the response acceleration amplitudes at the spectral periods of 0.1, 0.15 and 0.2 s (mean SRA) for the mean return period  $RP = 475$  a; mean values according to the Logic Tree (left), median (top right) with the related 84% quantile (bottom right). The map of mean values is relevant for the building code.

## Literatur

- Grünthal, G. (2014): Induced seismicity related to geothermal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe. - *Geothermics*, 52, pp. 22–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.009>
- Grünthal, G., Bosse, C. (1996): Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland - Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8: Forschungsbericht, (Scientific Technical Report ; 96/10), Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 24 p. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-96103>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018a): The probabilistic seismic hazard assessment of Germany—version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. - *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 10, pp. 4339–4395. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10518-018-0315-y>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018b): Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands - Version 2016 - für DIN EN 1998-1/NA. - *Bautechnik*, 95, 5, pp. 371–384. DOI: <https://doi.org/10.1002/bate.201700098>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Heidbach, O. (2013): Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen. - *System Erde*, 3, 1, pp. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.03.01.8>
- Grünthal, G., Wahlström, R. (2012): The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. - *Journal of Seismology*, 16, 3, pp. 535–570. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9302-y>
- Stromeyer, D., Grünthal, G. (2015): Capturing the Uncertainty of Seismic Activity Rates in Probabilistic Seismic-Hazard Assessments. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 2A, pp. 580–589. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120140185>

# Wenn Gesteine sich auflösen: Erdfallstrukturen in Deutschlands Untergrund

Charlotte M. Krawczyk, Samira Maghsoudi, Djamil Al-Halbouni  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Sinkholes are circular to elliptical depression or collapse structures in the Earth's surface, caused by dissolution and subsurface erosion of soluble rocks such as salt, sulfate and carbonate in the presence of groundwater. Depending on the subsoil structure and generation process, sinkholes may form continuously growing depressions at the surface or collapse abruptly into deep holes with diameters up to several tens of meters. Individual process components may be simple and can easily be understood, but the interaction of different processes ahead of a collapse and precursor phenomena with different rates and dimensions impede full process understanding. The joint project SIMULTAN develops and applies an early recognition system of sinkhole instability, unrest, and collapse, with combining structural, geodetic, geophysical, petrophysical, and hydrogeological mapping methods, accompanied by sensor development, multi-scale monitoring, modelling, and an information platform. Sinkhole-affected areas in Germany are based generally on salt highs (e.g., northern Germany), sulfate karst or carbonate karst (mainly southern Germany). The investigations focus in two areas (Hamburg, Thuringia), for which sinkhole unrest has been identified. While local authorities provide individual information and maps about areas of potential sinkhole hazard, a standardized and collective recognition system does not exist, relevant for especially urbanized areas.*



Erdfälle erscheinen oft als kreisförmige oder elliptische Absenkungen der Erdoberfläche oder Kollapsstrukturen, ihr Durchmesser variiert von wenigen Metern bis zu einigen 100 Metern für große Erdfälle. Sie können eine ernsthafte Gefährdung für die Bevölkerung und die Infrastruktur in dem betroffenen Areal darstellen (Abbildung links). Erdfälle sind der Oberflächenausdruck von Karst oder Subrosionssystemen (unterirdische Auslaugung leicht löslicher Gesteine) in den obersten, wenige hundert Meter tiefen Bereichen des Untergrunds. Mit Ausnahme von Kollapsstrukturen, die sich innerhalb von Minuten bilden können, finden in Deutschland die Absenkung (Subsidenz) sowie die damit verbundene Deformation in den Erdfallgebieten kontinuierlich und mit kleinen Raten von mm/Jahr über Jahre bis Dekaden hinweg statt (Krawczyk, 2015). Erdfälle stellen eine Naturgefahr dar, insbesondere dann, wenn sie in urbanen oder bebauten Gebieten auftreten. Sie können die Infrastruktur, Gebäude, Dämme und das tägliche Leben betreffen. Auch global sind Erdfälle eine ernstzunehmende Naturgefahr. So hatte z. B. die größte Versicherungsgesellschaft Floridas, USA, im Jahr 2009 etwa 200 Erdfallmeldungen pro Monat bearbeiten und dabei eine Summe von rund 93 Mio. USD auszahlen müssen (Krawczyk, 2018).

In Deutschland kommt es zu mehreren Hundert Erdfallereignissen pro Jahr, in einzelnen Bundesländern sind jährlich 20 bis 30 dieser Ereignisse dokumentiert. Meist handelt es sich dabei um kleinere Landabsenkungen mit nur wenigen Metern Durchmesser. Auch erfolgt der Einbruch oft nicht besonders tief und die Schadensintensität ist zumeist nicht sehr hoch. Die Erdfallgebiete liegen generell auf Salz-Hochlagen (z. B. Norddeutschland) oder im Sulfat- oder Karbonatkarst (vor allem Süddeutschland, Abb. 1). Großräumige Absenkungen sind für Deutschland nicht ausgeschlossen. So gab es in jüngerer Vergangenheit größere Erdfälle mit einem Durchmesser von 10 bis 20 m und einer Tiefe von 20 bis 30 m (siehe Abbildung links zum Ereignis in Schmalkalden). Das am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ koordinierte

*Links: Erdfall in Schmalkalden/Thüringen. Über Nacht kam es zu einem Kollaps der oberen Erdschichten, sodass sich ein Loch von etwa 30 m Durchmesser und 20 m Tiefe öffnete. Dies entspricht der Bewegung von rund 12 000 m<sup>3</sup> Gestein. Die Versorgungsleitungen, die normalerweise in der Straße verborgen sind, sind nun sichtbar und hängen über dem Einsturzbereich. (Foto: picture alliance/AP Images)*

*Left: Sinkhole in Schmalkalden/Thuringia. Overnight, a collapse opened a hole of ca. 30 m diameter and 20 m depth, moving 12 000 m<sup>3</sup> of material. The supply circuit, usually buried in the street, is now visible and hangs across the collapse structure.*

Verbundprojekt SIMULTAN soll durch Integration verschiedener Methoden die Früherkennung solcher Ereignisse voranbringen. Erste Forschungsergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

## Lösungsvorgänge im Untergrund

Erdfälle entstehen infolge unterirdischer Auslaugung (Subrosion) von wasserlöslichen Gesteinen wie Salz, Kalkstein, Kreide oder Gips. Grundwasser spielt bei subrosiven Vorgängen eine dominierende Rolle. Durch Lösungsvorgänge werden an bestehenden Klüften oder Schichtfugen Hohlräume neu geschaffen und/oder erweitert. Die Beschaffenheit des Grundwassers bestimmt die Lösungsvorgänge, die z. B. intensiver sind, wenn mehr Säure enthalten ist. In der Folge entstehen poröse Formationen oder Hohlräume, die mit der Zeit instabiler werden können, sodass sich Schwächezonen und Höhlen bilden.

Wenn nun von oben Wasser in diese Hohlräume einfließt, bilden sich an der Oberfläche Trichter im Boden, und zwar dort, wo das Wasser über vorhandene Risse und Klüfte besonders schnell in die darunterliegenden Hohlräume abläuft. Es entstehen allmählich an der Erdoberfläche Senken. Entlang der Trichterstrukturen vergrößern sich mit der Zeit vorhandene Risse im Boden und verwitterte Partikel werden schneller ausgeschwemmt. Nach und nach füllen diese Partikel die unterirdischen Hohlräume und der Boden sackt an der Oberfläche schleichend ein. Im Endstadium der Erdfallbildung stürzt die Höhlendecke plötzlich in die oft Wasser führende Höhle. Es wird außerdem vermutet, dass Erschütterung oder Mikroerdbeben Vorläufer von Einbrüchen sein können (Krawczyk et al., 2015). Neben natürlichen Auslösern können auch Eingriffe des Menschen Bodenabsenkungen verursachen. Ein Beispiel dafür sind die Tagesbrüche oberhalb alter Bergbaustollen.

In Deutschland weisen die Bundesländer Karten mit Gebieten von Erdfallpotenzial aus, eine komplette Gefährdungskarte liegt aber nicht vor. Aktuell senken sich in Deutschland einige Gebiete langsam ab, die sich künftig zu Erdfällen entwickeln könnten. Das Projekt SIMULTAN legt seinen Fokus auf zwei der betroffenen Regionen: Im thüringischen Bad Frankenhausen hat sich der 56 m hohe Turm der ehemaligen Oberkirche bereits stärker geneigt als der berühmte Schiefe Turm von Pisa. In Flottbek, einem Stadtteil von Hamburg, sinkt der Boden jedes Jahr um mehrere Millimeter.

## Früherkennung von Erdfällen

Da die urbane Besiedlung wächst und sich auch in Gebiete mit Erdfallgefährdung hinein bewegt, wird es zukünftig z. B. für städtische Behörden noch wichtiger, ein Früherkennungssystem für Erdfälle zur Verfügung zu haben.



**Kontakt:** C. M. Krawczyk  
(charlotte.krawczyk@gfz-potsdam.de)

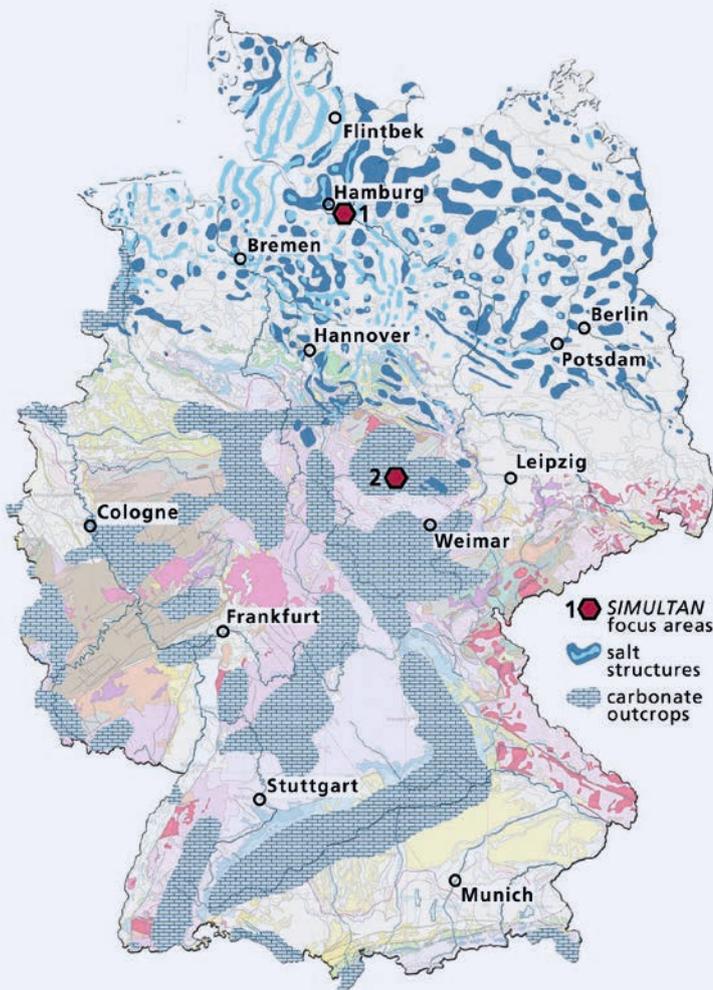
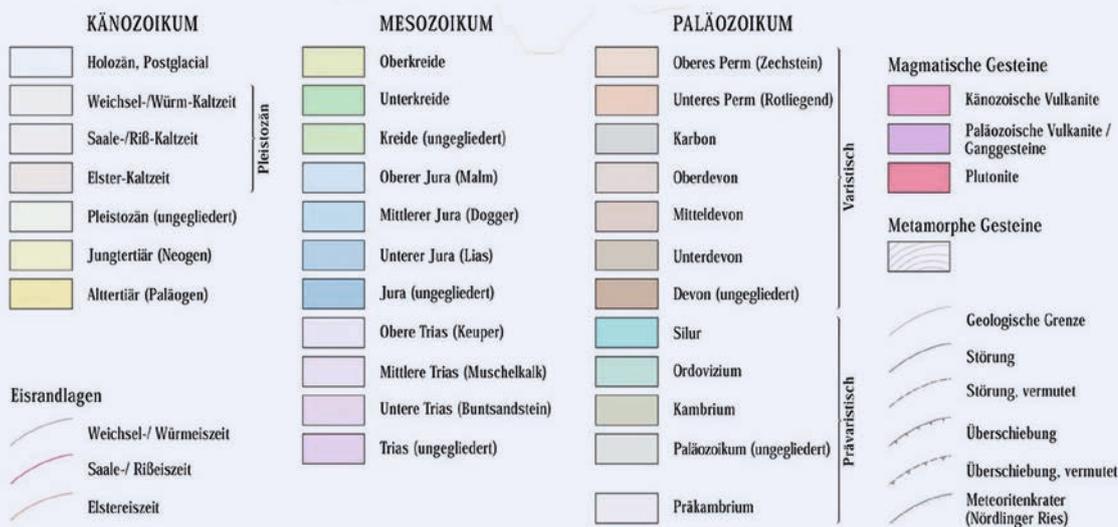


Abb. 1: Vereinfachte Karte zur schematischen Illustration der Gebiete in Deutschland, die prinzipiell durch Erdfälle beeinträchtigt werden können. Im Norden ist Salz dominant, während im Süden Karbonat-/Karstgebiete verbreitet sind. Die Sechsecke 1 und 2 markieren die Arbeitsgebiete innerhalb des Projekts SIMULTAN in Hamburg und Thüringen (Krawczyk et al., 2015).

Fig. 1: Simplified map illustrating schematically the main areas in Germany that can be principally affected by sinkhole hazard. In the north, salt dominates, while Carbonate and karst areas are more widespread in the south. Hexagons 1 and 2 mark the SIMULTAN target areas in Hamburg and Thuringia (Krawczyk et al., 2015).



Die flächendeckende Beobachtung des Untergrunds, durch die man langsame Bodenabsenkungen entdecken könnte, ist beispielsweise mittels Abweichungsmessung per Satellit technisch möglich, jedoch aufgrund der groben Rasterung dieser Daten noch nicht genau genug. Es ist aber möglich, kritische Regionen, in denen bereits Erdfallereignisse stattgefunden haben, zu identifizieren und wissenschaftlich genauer zu untersuchen. Das Ziel ist dabei, besser einschätzen zu können, welche Folgen eine Grundwasserentnahme haben könnte, ob Baugebiete auf einem kritischen Untergrund liegen oder Infrastrukturen verändert werden müssen, weil sie sich über einem gefährlichen Hohlraum befinden.

Im Anschluss an Ereignisse in Hamburg und Schmalkalden wurde das Forschungsprojekt SIMULTAN (Sinkhole Instability: integrated MULTI-scale monitoring and Analysis) ins Leben gerufen. Der vom BMBF für drei Jahre geförderte Verbund hat zum Ziel, ein Früherkennungssystem für Instabilität, Unruhe und Kollaps des Untergrunds für Erdfall gefährdete Regionen zu entwickeln. Der neuartige Forschungsansatz vereint strukturelle, geophysikalische, petrophysikalische und hydro(geo)logische Methoden, die von Sensorentwicklung und Überwachung über verschiedene Skalen flankiert werden. Darauf aufbauend sollen die folgenden wissenschaftlichen Fragen beantwortet werden: (1) Was sind

die strukturellen Charakteristika von Subrosionsbereichen und ihrer unmittelbaren Umgebung? (2) Welche geophysikalischen Parameter eignen sich zur Identifizierung von instabilen Zonen? (3) Wie groß sind die räumlichen und zeitlichen Variationen, und wie genau lassen sich diese bestimmen?

### Bestimmung von Strukturen im Untergrund

Bevor eine Prozess- und Modellvorstellung für ein Gebiet entwickelt werden kann, müssen zunächst die strukturellen Charakteristika von Erdfällen und Subrosionssenken bestimmt werden. Die Seismik, insbesondere die Scherwellen-Reflexionsseismik, ist für diesen Zweck sehr gut geeignet, da sie oberflächennahe Subrosionsstrukturen und ihre räumlichen Variationen hochauflösend abbilden kann. Das daraus bestimmte Strukturmodell kann außerdem mit seismischen Geschwindigkeiten (siehe Referenzen in *Krawczyk, 2018*) oder elastischen Kenngrößen wie dem Schermodul parametrisiert werden (*Wadas et al., 2016*).

Der Untergrund Thüringens ist von Ablagerungen des Zechsteins wie Gips und Anhydrit, die von Auslaugung betroffen sein können, dominiert. Am Kirchturm von Bad Frankenhausen wurde vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) und der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) eine 457 m tiefe Forschungsbohrung abgeteuft, die u. a. zur Kalibrierung der vorher gemessenen seismischen Sektionen diente (*Wadas et al., 2016*). Insbesondere der Bereich bis 100 m Tiefe wird detailliert abgebildet, sodass sowohl die Existenz älterer und heute überdeckter als auch rezenter oberflächennaher Subrosionsstrukturen nachgewiesen wird (Abb. 2). Das zeigt, dass die Auslaugungsprozesse, die vermutlich während des Tertiärs begannen, bis heute andauern. In den betroffenen Bereichen wurden oberflächennahe Störungen identifiziert, die vermutlich Wegsamkeiten für ungesättigte Wässer bieten, die die Zechsteinablagerungen auslaugen. Aus den gesammelten Daten werden Attribute und elastische Parameter ermittelt, um Subrosionsbereiche identifizieren und die Untergrundstabilität quantifizieren zu können.

### Überwachung von Massenumlagerung und Deformation

Deformation kann in reflexionsseismischen Profilen als Versatz an Störungen abgelesen werden (Abb. 2). Um die unterschiedlich stark ausgeprägte und unterschiedlich schnell ablaufende Deformation von Oberfläche und Untergrund sowie Massenumlagerungen zu überwachen, müssen entweder reflexionsseismische Messungen wiederholt oder mit hochauflösenden Verfahren ergänzt werden.

### Massenumlagerungen

Erdfallbedingte Massendefizite entwickeln sich kontinuierlich, oftmals begleitet von Subsidenz. Daher können zeitabhängige Schweremessungen, verknüpft mit räumlichen geodätischen Überwachungsmethoden, Informationen über zugrundeliegende Prozesse liefern. Bad Frankenhausen ist geologisch durch die Auslaugung der Zechstein-Evaporite gekennzeichnet. Das Ziel dort ist, mittels Gravimetrie und Präzisionsnivellements die räumlich-zeitliche Entwicklung von Erdfällen zu beobachten.

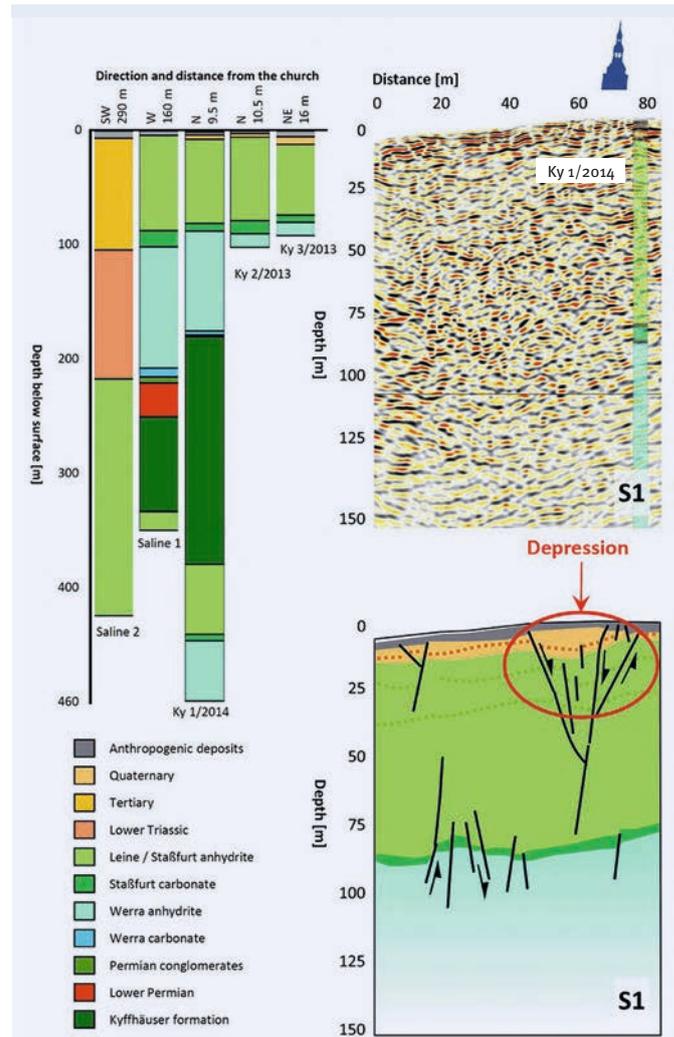


Abb. 2: Einblicke in den Untergrund von Bad Frankenhausen. Bohrlochdaten (links) erlauben die Kalibrierung des seismischen Profils (S1) und dessen Interpretation (rechts). Die Scherwellen-Reflexionsseismik am schiefen Turm zeigt im oberflächennahen Bereich eine Subrosionssenke (verändert nach Wadas et al., 2016; gestrichelte Linie: interne Schichtung von Gesteinspaketen).

Fig. 2: Insights into the subsurface of Bad Frankenhausen. Borehole data (left) allow calibrating the seismic profile (S1) and its interpretation (right). The shear-wave reflection seismics at the leaning church tower reveal a subsrosion depression close to surface (after Wadas et al., 2016; dashed line: internal sequence layering).

Dazu wurden 15 Gravimetrie- und etwa 130 Nivellementpunkte angelegt, welche sich über die Hauptsenkungsgebiete im Stadtzentrum verteilen. Seit den Basismessungen im März 2014 erfolgen quartalsweise Messkampagnen. Die gravimetrischen Messungen werden jeweils mit vier verschiedenen Gravimetern im sogenannten Step-Verfahren realisiert. Erste Auswertungen zeigen, dass an einzelnen Messpunkten bei den höhenkorrigierten Schwerewerten Variationen von 15 µGal über den Beobachtungs-

zeitraum von drei Jahren auftreten. Gleichzeitig senkte sich die Oberfläche innerhalb des Stadtgebiets von Bad Frankenhausen, hauptsächlich in der Umgebung des schiefen Kirchturms, um bis zu 15 mm (Kersten et al., 2017).

### Wechselwirkung von Gestein, Boden und Wasser

Bei der Lösung von Gesteinen ist Wasser eine treibende Kraft. Darauf reagieren elektrische/elektromagnetische Verfahren besonders gut, sodass eine Erkundungsstrategie aus kombiniertem Einsatz von 3-D elektrischer und elektromagnetischer Tomografie, geringinvasiven In-situ-Messungen („Direct Push“) und petrophysikalischen Untersuchungen in Schleswig-Holstein entwickelt wird. Erste Messungen von TU Berlin und UFZ Leipzig zeigen eine 2 m dicke Schicht mit erhöhter Leitfähigkeit in einer Tiefe von etwa 10 m entlang eines Profils über einen aktiven Erdfall. Diese kompakte Tonschicht markiert den Übergang von Sand zu Geschiebe. Innerhalb des Erdfallbereichs wird – gemessen per Direct Push – Material mit höherer hydraulischer Leitfähigkeit oberhalb der Kreide beobachtet (Werban, pers. Mitt. 2018).

### Mikroseismische Ereignisse

Mikroseismische Ereignisse in Erdfallgebieten können Vorläufer von Massenumlagerungen oder Bruchprozessen sein, die wahrnehmbare Erschütterungen oder Gebäudeschäden verursachen. Zur Identifikation dieser Ereignisse ist ein lokales seismisches Netzwerk nötig, das im urbanen Umfeld allerdings starken anthropogenen Störsignalen ausgesetzt ist. Das SIMULTAN-Netzwerk in Hamburg besteht aus sechs Stationen, die deshalb in unterirdischen Einrichtungen installiert wurden. Bisher konnte in der seit 2015 laufenden Überwachungskampagne kein Ereignis identifiziert werden, das zweifelsfrei dem vermessenen Erdfall in Hamburg Flottbek zuzuordnen ist. Um die Detektionsfähigkeit von mikroseismischen Ereignissen zu überprüfen, wurden synthetische Wellenformen von potenziellen Ereignissen mit im Feld aufgezeichnetem Rauschen kombiniert. Als Detektionsalgorithmus wurden ein einfacher STA/LTA-Detektor und ein Phasendetektor verwendet, um schließlich ein Hybrid zu entwickeln, das kleine Ereignisse bei schlechten Signalverhältnissen robust korrelieren kann (Li et al., 2018).

### Vom Prozessverständnis zur Prognose

Um die Dynamik eines Erdfallprozesses zu verstehen und Prognosen zum weiteren Verlauf abgeben zu können, muss die Frage beantwortet werden, wie ein Hohlraum nach oben wächst und wodurch das Wachstum beeinflusst wird. Ebenso ist wichtig, welche charakteristischen Veränderungen an der Oberfläche und in der Gesteinssäule über einem Lösungszentrum erwartet werden können. Mit diesem Ziel wurden numerische Simulationen von Erdfällen mit der Diskrete-Elemente-Methode durchgeführt, die zum einen Szenarien, also Möglichkeiten einer Entwicklung abbilden, zum anderen mit gemessenen Daten bestückt wurden, um realistische Aussagen machen zu können.

Kollapsmodelle können mit Stabilitätswerten der Deckschichten für typische Tiefenlagen der Lösungszentren simuliert werden

(z. B. aus den o. g. seismischen Messungen zu entnehmen). Wenn diese mit Messdaten von Erdfällen verglichen werden, können z. B. aus dem Durchmesser und der Tiefe des Erdfalls oder aus der Lage von Oberflächenrissen Rückschlüsse auf die Tiefe und die Ausbreitung des Hohlraums darunter gezogen werden. Ebenso kann die Verteilung von mikroakustischen Ereignissen zur Einschätzung der Prozesse im Untergrund herangezogen werden.

Als Ansatz für die inkrementelle Entwicklung eines Hohlraums wurde das Wachstum einer Lösungszone in heterogenem Untergrund angenommen (Abb. 3; nach Al-Halbouni et al., 2018). Für verschiedene lösliche Gesteine (Abb. 3, obere Zeile) lässt sich diese Lösungszone in einen beliebigen Bereich des Modells legen, dessen Geometrie und Schichtung frei anpassbar an individuelle Fallstudien sind. Ebenso frei definierbar ist die Geschwindigkeit des simulierten Prozesses, der für verschiedene zeitliche Stadien dargestellt werden kann (Abb. 3, Zeilen 2, 3, 4). Wenn das Material im Modell mit den Materialien einer Fallstudie kalibriert wird, lässt sich eine realistische Simulation erstellen, bis hin zum Kollaps der Struktur. Die entsprechende Volumenabnahme im Untergrund wird für jedes Stadium angegeben (siehe sich verändernde weiße Bereiche in Abb. 3). In Materialien mit geringer Festigkeit, wie Tonschlamm, bildet sich durch ein eher brüchig-duktiler Verhalten eine graduelle Subsidenz oder Suffosion aus, die zu weiten und flachen Erdfällen führt. In Materialien mit mittlerer bis hoher Festigkeit, wie verfestigte Kiessande oder Steinsalz, führt das brüchige Verhalten zum Kollaps mit typischen schmalen und tiefen Erdfällen. In Abhängigkeit von der Festigkeit kann sich ein teilweise stabiler, großer Hohlraum in der Tiefe mit überhängenden Seiten ausbilden.

### Fazit und Ausblick

Absenkung und Kollaps in einem Gebiet entwickeln sich mit unterschiedlichen Raten und unter verschiedensten Randbedingungen. Die auszuwertenden Skalen liegen zwischen 100 m bis Zentimeter sowie Jahrzehnten und Sekunden. Während geophysikalische Oberflächenmessungen den strukturellen Aufbau des Untergrunds bestimmen und petrophysikalische Parameter liefern, können Überwachungswerkzeuge über Hohlräumen helfen, Änderungen im Untergrund und an der Oberfläche zu analysieren. Die Kalibrierung von Daten und die Ableitung geotechnischer Parameter sind für die Entwicklung von Überwachungskonzepten von invasiven Studien hin zu nichtinvasiven Instrumenten unerlässlich.

Die hier gezeigte Kombination unterschiedlicher Messmethoden ist ein erster Schritt in diese Richtung. An den Untersuchungsstandorten in Thüringen und Hamburg wurden über zwei Jahre Wiederholungs- und Überwachungsmessungen durchgeführt. Diese sollten fortgeführt werden, um die Empfindlichkeit der festgestellten Attribute zu untersuchen. Radarinterferometrie sollte dabei geodätisches Monitoring ergänzen, um Erdfallprozesse und deren Stadien in einem Gebiet besser einschätzen zu können. Experimente für Feldmessungen mit Kampagnen- oder Überwachungskomponenten sollten mindestens fünf

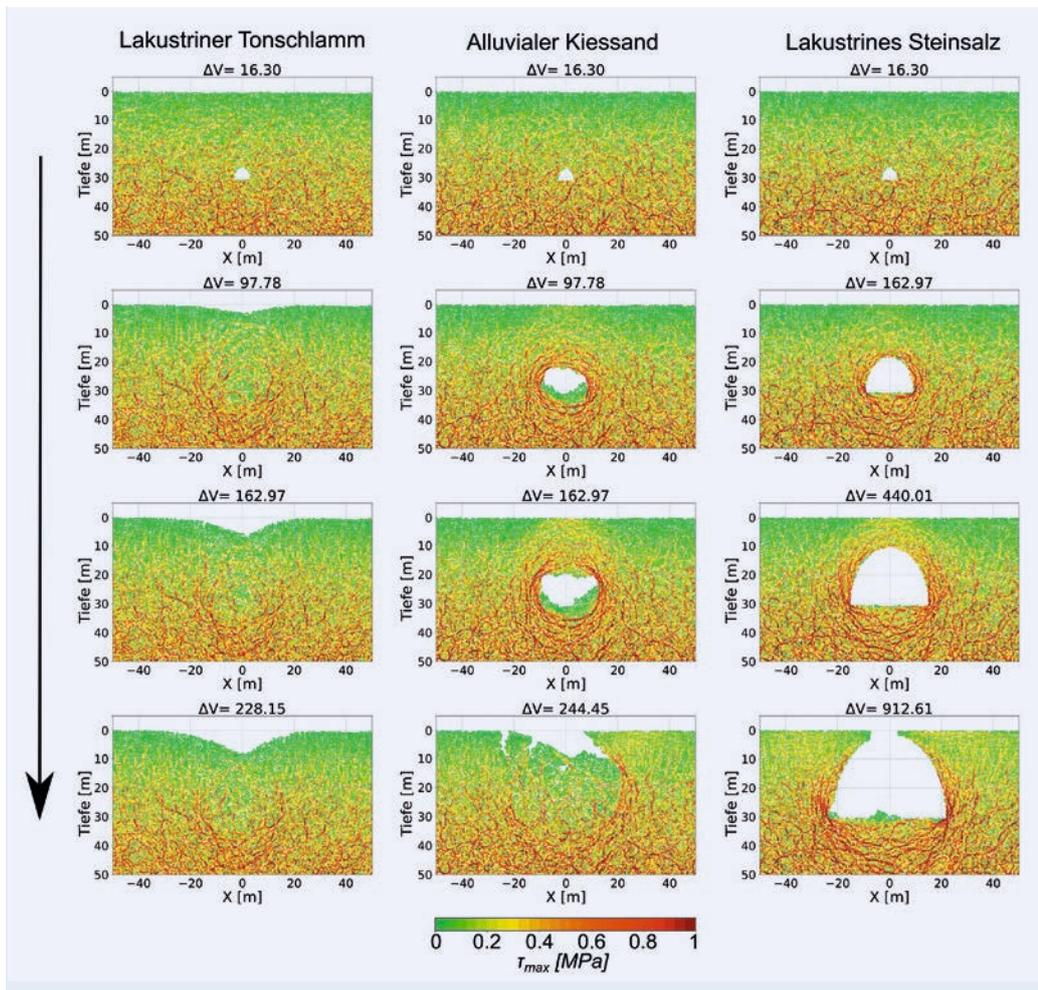


Abb. 3: Simulation der Hohlraumbildung im Untergrund für verschiedene Gesteinstypen (Spalten) mit der Zeit (Zeilen, ausgewählte Stadien). Je nach Gesteinstyp entwickelt sich die Festigkeit im Untergrund unterschiedlich (Farbkodierung: maximale Scherspannung), und es bilden sich unterschiedliche Hohlraum- und Kollapsformen aus. Der damit einhergehende Materialverlust ist als Volumenabnahme  $\Delta V$  angegeben (nach Al-Halbouni et al., 2018).

Fig. 3: Simulation of void development in the subsurface for different rock types (columns) over time (rows, selected stages). Depending on rock type, maximum shear stress and thereby stability of the subsurface varies (colour coded), as void and collapse shapes. Volumetric material loss is given as  $\Delta V$  (after Al-Halbouni et al., 2018).

Jahre bestehen, um Vorhersagepotenzial und Zuverlässigkeit von Trends zu stabilisieren.

Schließlich liefert die Kombination von Feldmessungen mit Szenario-Modellierungen die benötigten Informationen für Entscheidungsträger. Werden solche Daten in eine Datenbank, die auch die Qualitätskontrolle bestimmter Methoden und Angaben umfasst, eingespeist, scheint die Frühwarnung in Bereichen, in denen ein erhöhtes Erdfallrisiko besteht, mittelfristig machbar. Weitere, ausführliche Erläuterungen zum Thema Erdfälle können auch aus Datenbanken und Mediatheken abgerufen werden, z. B. über die Wissensplattform „Erde und Umwelt“ (<http://www.ESKP.de>; Beitrag: Erdfälle: Auf einmal ist da ein Loch) oder die Internetseite des hier vorgestellten Projekts (<http://simultan.gfz-potsdam.de/>).

## Literatur

Al-Halbouni, D., Holohan, E. P., Taheri, A., Schöpfer, M. P. J., Emam, S., Dahm, T. (2018): Geomechanical modelling of sinkhole development using distinct elements: model verification for a single void space and application to the Dead Sea area. - *Solid Earth*, 9, pp. 1341–1373. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-9-1341-2018>

- Keusten, T., Kobe, M., Gabriel, G., Timmen, L., Schön, S., Vogel, D. (2017): Geodetic monitoring of subsidence-induced subsidence processes in urban areas : concept and status report. – In: *Journal of Applied Geodesy*, 11, 1, pp. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0029>
- Krawczyk, C. M., Polom, U., Buness, H. (2015): Geophysikalische Schlüsselparameter zur Überwachung von Erdfällen – Stand und Ziele der aktiven Seismik. – In: Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (Ed.), *DGG-Kolloquium Geohazards - Sinkholes, Georisiken - Erdfälle: 75. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft e. V., Hannover, 25. März 2015*, (Deutsche Geophysikalische Gesellschaft: Mitteilungen / Sonderband; 2015,1), pp. 19–30.
- Krawczyk, C. M., SIMULTAN Research Group (2018): Joint project SIMULTAN - Sinkhole characterization and monitoring with supplementing geophysical methods - *Proceedings, 15th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst and the 3rd Appalachian Karst Symposium* (Shepherdstown, West Virginia, USA 2018), pp. 315–322.
- Li, L., Becker, D., Chen, H., Wang, X., Gajewski, D. (2018): A systematic analysis of correlation-based seismic location methods. – In: *Geophysical Journal International*, 212, 1, pp. 659–678. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggx436>
- Wadas, S. H., Polom, U., Krawczyk, C. (2016): High-resolution shear-wave seismic reflection as a tool to image near-surface subsidence structures – a case study in Bad Frankenhausen, Germany. - *Solid Earth*, 7, pp. 1491–1508. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-7-1491-2016>

# Regionale Auswirkungen des Globalen Wandels: Der Extremsommer 2018 in Nordostdeutschland

*Ingo Heinrich, Daniel Balanzategui, Oliver Bens, Theresa Blume, Achim Brauer, Elisabeth Dietze, Pia Gottschalk, Andreas Güntner, Katharina Harfenmeister, Gerhard Helle, Christian Hohmann, Sibylle Itzerott, Knut Kaiser, Susanne Liebner, Bruno Merz, Sylvia Pinkerneil, Birgit Plessen, Torsten Sachs, Markus J. Schwab, Daniel Spengler, Claudia Vallentin, Christian Wille*

*Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam*

*The main focus of the TERENO Northeastern German Lowland Observatory (TERENO-Northeast) is the regional impact of Global Change. Since 2011, the observatory has recorded changes in the geo-, hydro-, bio- and atmosphere at six main study sites. The year 2018, particularly in northeast Germany, was record-breaking in regard to dryness and heat. The mean temperature in Mecklenburg-Vorpommern was 2 °C above the long-term average and precipitation was very low at 440 mm (normally around 600 mm). The extreme summer of 2018 was a special opportunity for TERENO-Northeast to measure the regional effects of climate change. One of the consequences was the large number of forest fires, with one major fire destroying around 400 hectares. Other extreme reactions of the ecosystems were shown in TERENO-Northeast. For example, for the first time since its rewetting, Polder Zarnekov fell dry, with unpredictable consequences for the greenhouse gas exchanges. The forest ecosystems of Müritz National Park, on the other hand, survived the extreme summer surprisingly well, partly because the months before the drought were relatively damp. The research activities of TERENO-Northeast form an important basis to develop realistic options for improved adaptation strategies to the ongoing global change with its particular region-specific effects and challenges.*



Welche regionalen Auswirkungen hat der Globale Wandel? Diese Frage steht im Fokus des TERENO-Observatoriums Nordostdeutsches Tiefland (TERENO-Nordost). TERENO steht für Terrestrial Environmental Observatories, einem Verbund aus vier Observatorien im Rahmen einer Langzeitaktivität der Helmholtz-Gemeinschaft. Das Nordostdeutsche Tiefland wurde als eine für Deutschland repräsentative Region ausgewählt, die sich durch eine hohe Vulnerabilität durch den Globalen Wandel auszeichnet. Seit 2011 werden in TERENO-Nordost, das vom Deutschen GeoForschungs-Zentrum GFZ betrieben wird, zeitlich hochaufgelöste Messdaten gesammelt, um Veränderungen in der Geo-, Hydro-, Bio- und unteren Atmosphäre an ausgesuchten Standorten in enger Kooperation mit regionalen Partnern in Nordostdeutschland zu erfassen (Bens *et al.*, 2012). Dies ermöglicht es, anstelle von Modelldaten reale Daten zu nutzen, um Wirkungszusammenhänge besser zu verstehen. TERENO-Nordost leistet so einen wichtigen Beitrag, um wissenschaftliche Entscheidungsfindungen für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen an die Auswirkungen des Klima- und Landschaftswandels auf regionaler Ebene zu ermöglichen. Das Nordostdeutsche Tiefland ist eine gewässerreiche Region, die aber im nationalen Vergleich wenig Niederschlag erhält und oft in weiten Gebieten eine negative Wasserbilanz aufweist. Es zählt zu den am stärksten vom Klimawandel betroffenen Regionen Deutschlands. So wurden in Nordostdeutschland seit den 1980er Jahren großflächig sinkende Grundwasser- und Seespiegel registriert (Germer *et al.*, 2011). Dieser Abwärtstrend dauerte bis 2009 an, um sich dann durch sehr hohe Niederschlagssummen in den zwei Folgejahren scheinbar umzukehren (Kaiser *et al.*, 2014). Die bisher im Observatorium bemessenen Jahre von 2012 bis 2017 erwiesen sich meteorologisch eher als durchschnittlich. Das Jahr 2018 brach dann hinsichtlich Trockenheit, Temperaturen und Bewölkungsgrad alle bisherigen Rekorde. Mit 10,2 °C lag die Jahresmitteltemperatur in Mecklenburg-Vorpommern 2 °C über dem langjährigen Mittel und in Brandenburg mit 10,9 °C sogar um 2,2 °C darüber. Und während die Jahresniederschlagssumme in Mecklenburg-Vorpommern mit 440 mm (Langjähriges Mittel: 595 mm) schon sehr niedrig lag, waren es in Brandenburg weniger als 390 mm (Langjähriges Mittel: 557 mm). Außerdem meldete Mecklenburg-Vorpommern mit beinahe 2085 Stunden (Langjähriges Mittel: 1648 Stunden) einen neuen Sonnenscheinrekord. Brandenburg war mit über 2180 Stunden (Langjähriges Mittel:

1634 Stunden) bundesweit sogar Spitzenreiter. Das Jahr 2018 begann mit einem ungewöhnlich milden und sehr niederschlagsreichen Januar. Im Februar und März zeigte sich der Winter noch einmal kurz mit zwei markanten Kaltlufteinbrüchen. Anfang April schaltete das Wetter dann aber innerhalb weniger Tage von Winter auf Sommer um (DWD, 2018).

Für die Land- und Forstwirtschaft in der Region wird das Jahr 2018 wohl als „katastrophal“ in Erinnerung bleiben. Die extreme Dürre wird auch in den Beobachtungsdaten von TERENO-Nordost deutlich. Die Beobachtungen stammen von den sechs Hauptstandorten des Observatoriums in Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg (Heinrich *et al.*, 2018). An diesen Standorten wird der Einfluss des Klima- und Landnutzungswandels auf terrestrische und aquatische Ökosysteme untersucht. TERENO-Nordost dient dem Monitoring, der Analyse und der Vorhersage von sich ändernden Umweltbedingungen. Die komplexen Zusammenhänge und Rückkopplungsmechanismen innerhalb und zwischen den verschiedenen Teilen der terrestrischen und aquatischen Systeme erfordern einen interdisziplinären Forschungsansatz. Wichtige Systemvariablen, die im Rahmen von TERENO-Nordost observiert werden, sind u. a. Transport- und Austauschprozesse von Wasser und Materie im System Grundwasser-Boden-Vegetation-Atmosphäre, Einflüsse auf das Baumwachstum und langfristige Veränderungen des Aufbaus und der Arbeitsweise von Mikroorganismen. In diesem Zusammenhang ist die Kombination aus Monitoring von aktuellen Prozessen und der Prozessrekonstruktion aus Geoarchiven als ein besonderes Merkmal von TERENO-Nordost hervorzuheben (Heinrich *et al.*, 2018).

## Der Blick auf den Sommer 2018 aus dem All

Satellitenbilddaten ermöglichen es, die starke Trockenheit des Sommers 2018 flächenhaft in Bezug zu vorherigen Jahren zu setzen. Für die Analysen werden die Daten des europäischen Sentinel-2-Satellitensystems genutzt. Sentinel-2 besteht aus einer Konstellation zweier baugleicher Erdbeobachtungssatelliten, welche die Erdoberfläche in elf spektralen Kanälen mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 10 m alle fünf Tage aufnehmen. Zur Veranschaulichung der meteorologisch bedingten Unterschiede der Jahre 2015 bis 2018 werden die flächenhaften Bilddaten für Anfang Juli mit am Boden gemessenen Daten des Klima- und Umweltmessnetzes am TERENO-Messnetz DEMMIN (Durable Environmental Multidisciplinary Monitoring Information Network) in Verbindung gesetzt.

Die gemittelten Klimadaten aus 43 Messstationen zu Temperatur, Niederschlag, modellierter Evapotranspiration (ETp) und Temperatursummen der phänologischen Entwicklung (Wachstumsgradtage) zeigen für die Zeitreihe seit 2005 deutliche Unterschiede (Abb. 1).

Links: Polder Zarnekow im Sommer 2018 (Aufnahmedatum: 29. August 2018), Foto während einer Drohnenüberfliegung durch Mathias Zöllner

Left: Polder Zarnekow in the summer of 2018 (date of picture taken: 29 August 2018), picture from drone flight by Mathias Zöllner



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

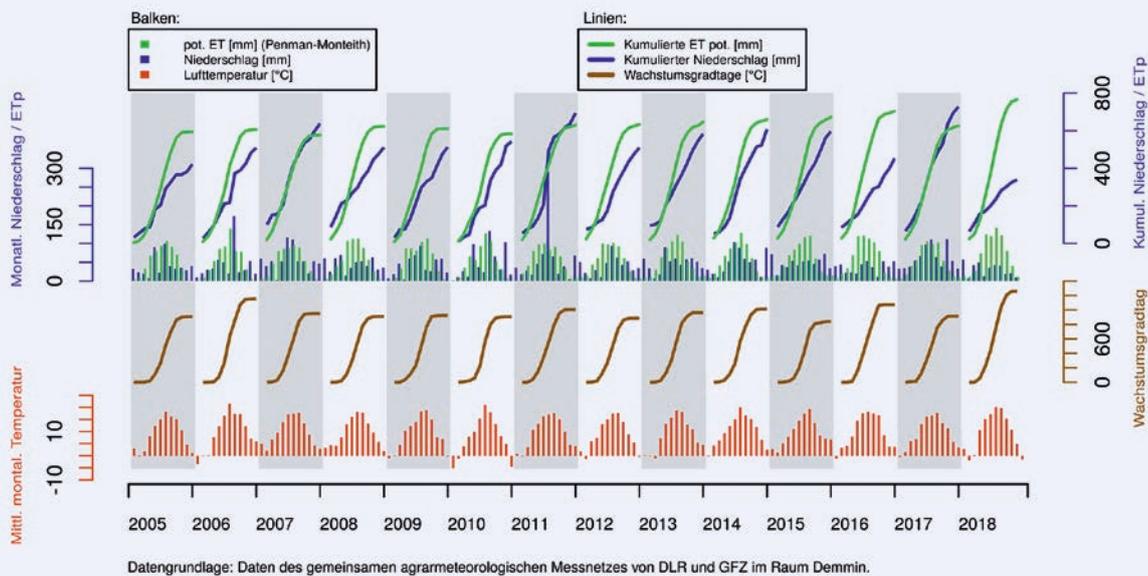


Abb. 1: Mittlere Temperatur-, Niederschlags-, Evaporations- und Temperatursummendaten des Messnetzes DEMMIN der Jahre 2005 bis 2018

Fig. 1: Mean values of temperature, evaporation and growing degree days at TERENO site DEMMIN for the years 2005 to 2018

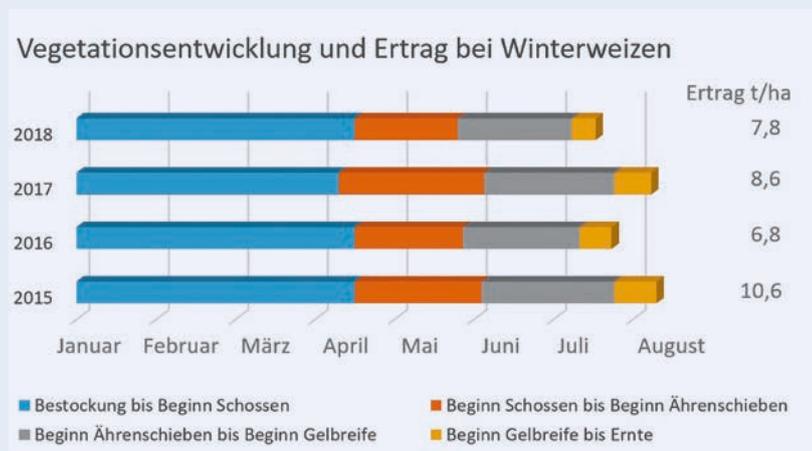


Abb. 2: Phänologische Entwicklung von Winterweizen der Jahre 2015 bis 2018 der Beobachtungsstation Dargun im Messnetz DEMMIN

Fig. 2: Phenological development of winter wheat for the years 2015 to 2018 at observation site Dargun at TERENO site DEMMIN

Die Jahre 2011 und 2017 fallen durch deutlich überdurchschnittliche Niederschlagssummen auf (698 und 712 mm im Vergleich zum langjährigen Mittel der nächstgelegenen Wetterstation Greifswald mit 601 mm), für 2017 erreicht der Niederschlag sogar die Summe der potenziellen Verdunstung. 2006 und 2016 sind durch sehr hohe Temperatursummen gekennzeichnet (1164 und 1073 °C). Besonders wenig Niederschlag fällt in den Jahren 2012 und 2016 (464 bzw. 425 mm) sowie 2018 (380 mm). Der geringe Niederschlag ist 2018 mit der im Vergleich höchsten Temperatursumme (1263 °C) verknüpft. Dagegen wurde im Jahr 2015 mit 852 °C der niedrigste Wert ermittelt.

Während 2018 bis Ende April die Niederschläge noch dem langjährigen Mittel (Station Greifswald) entsprachen, lagen sie Ende Juni mit 198 mm bereits 80 mm darunter. Die Temperatursumme hatte sich von Januar bis März normal entwickelt, aber dann im Verlauf von April, Mai und Juni auf stark überdurchschnittliche 432 °C gesteigert. Eine vergleichbare Entwicklung ist auch für das Jahr 2016 zu beobachten (189 mm und 378 °C für Ende Juni). Im Gegensatz dazu stehen die Jahre 2015 und 2017, welche sich durch wesentlich höhere Niederschlagssummen auszeichneten (258 mm in 2015 und 310 mm in 2017, jeweils bis Ende Juni). Diese Differenzen der Witterungsbedingungen führen zu deutlichen Unterschieden in der phänologischen Entwicklung der Pflanzen.

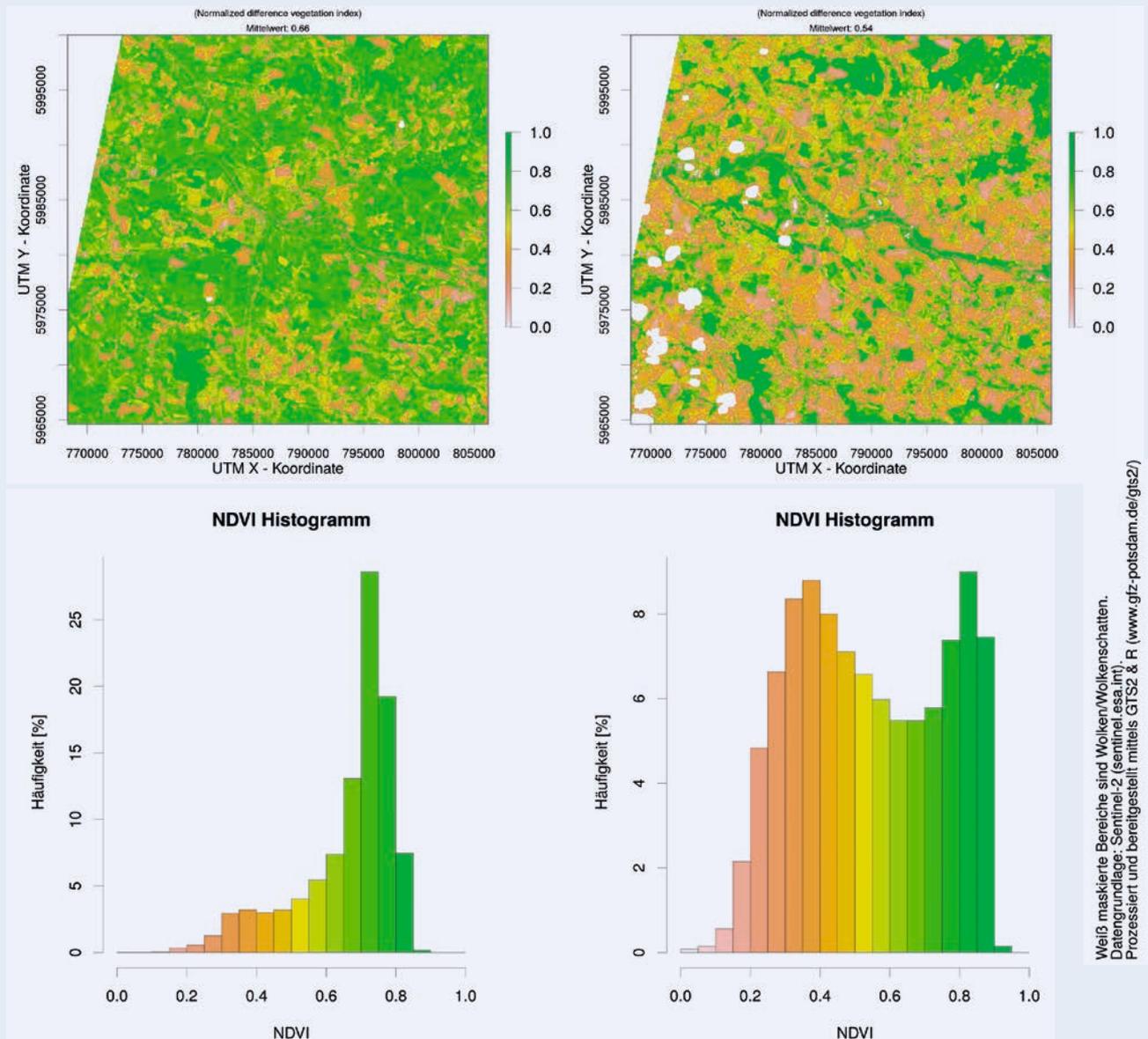


Abb. 3: NDVI-Karten (oben) und NDVI-Balkendiagramme (unten) des östlichen Bereichs des TERENO-Standorts DEMMIN für die Aufnahmezeitpunkte 3. Juli 2015 (links) und 4. Juli 2018 (rechts)

Fig. 3: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) map (top) und NDVI column chart (bottom) of the eastern part of TERENO site DEMMIN at acquisition dates 3 July 2015 (left) and 4 July 2018 (right)

Beispielsweise beginnt das Schossen des Winterweizens (Abb. 2) jeweils Mitte April nahezu zeitgleich. Bereits zum Zeitpunkt des Ährenschiebens sind jedoch zwischen den Jahren 2016/2018 (Ende Mai) und 2015/2017 (Anfang Juni) Entwicklungsunterschiede von bis zu einer Woche erkennbar, weil die Temperatursummen (Wachstumsgradtage) um 100 °C und die Niederschlagssummen in dem Zeitraum um 70 mm differieren. Bis zur Ernte wächst diese Diskrepanz auf rund zwei Wochen an. Die unterschiedlichen Wachstumsbedingungen für landwirtschaftliche Kulturen zeigen sich für die vier Jahre auch im Ertrag bei Winterweizen in der Region. Während 2015 mit 10,6 t/ha eine Rekordernte erzielt wurde, fällt sie mit 8,6 t/ha für 2017 wegen der hohen Niederschläge und

7,8 t/ha für 2018 wegen der geringen Niederschläge etwas (2017) bzw. deutlich (2018) unterdurchschnittlich aus. Bemerkenswert ist, dass 2016 noch erheblich weniger Weizen geerntet werden konnte (6,8 t/ha), ein Zeichen dafür, dass damals die Feldfrüchte nicht wie 2018 von einem überdurchschnittlich feuchten Vorjahr profitieren konnten.

Die Satellitenbilddaten des Sentinel-2-Systems zeigen in einem Landschaftsausschnitt des TERENO-Messnetzes DEMMIN den starken Unterschied der Vegetationsentwicklung der Jahre 2015 und 2018 flächenhaft jeweils für Anfang Juli (Abb. 3). Der aus den Daten abgeleitete Vegetationsindex „Normalized Difference

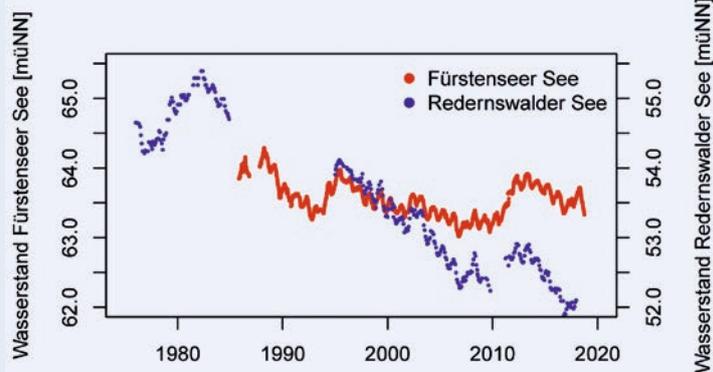


Abb. 4: Seespiegelschwankungen in den letzten Jahrzehnten für den Großen Füstensee im Müritz-Nationalpark und für den Redernswalder See im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin

Fig. 4: Lake level dynamics for Lake Großer Füstensee (Müritz National Park) and Lake Redernswalder See (Biosphere Reserve Schorfheide-Chorin)

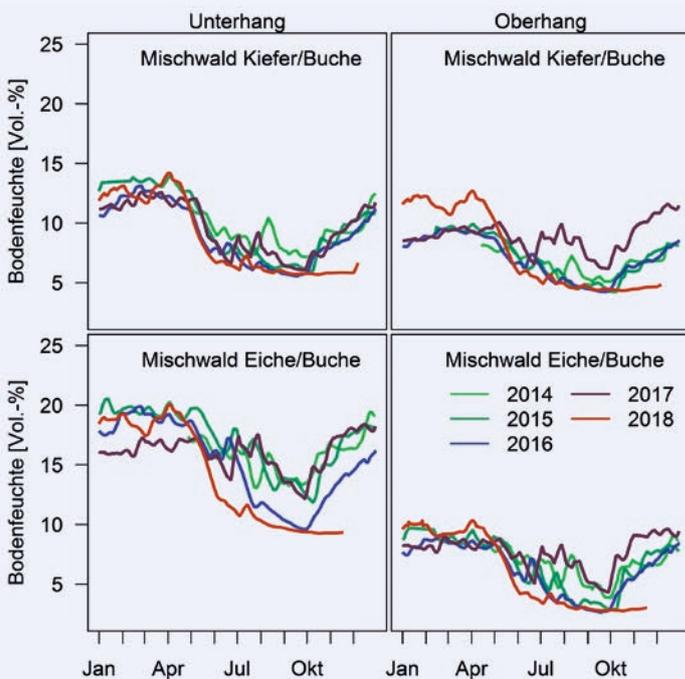


Abb. 5: Jährlicher Verlauf der mittleren Bodenfeuchte an vier Messpunkten am Standort Hinnensee im Müritz-Nationalpark (2014 bis 2018)

Fig. 5: Annual mean soil moisture dynamics for the years 2014-2018 at four monitoring locations around Lake Hinnensee, Müritz National Park

Vegetation Index“ (NDVI), welcher ein Maß für die Vitalität von Vegetationsbeständen ist, verdeutlicht flächenhaft die phänologischen Entwicklungsunterschiede im gesamten Gebiet. Die grünen Farbtöne zeigen vitale Vegetation an, wohingegen braune Bereiche bereits in der Reife und damit trockenere Vegetationsbestände repräsentieren. Die Daten zeigen für das Jahr 2015 größtenteils noch sehr vitale Vegetation, wobei die Ernte der Gerste bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht begonnen hat. Im Gegensatz dazu sind große Flächen des Datensatzes des Jahres 2018 bereits durch trockene Vegetation geprägt, hervorgerufen durch geringere Niederschläge und höhere Temperatursummen. Nur die Grünländer der Auen und Felder mit Sommerfrüchten, wie Zuckerrüben und Mais, sind noch vital. Zudem sind bereits viele Schläge abgeerntet. Der Unterschied zwischen den Jahren wird auch durch die Balkendiagramme verdeutlicht. Im Jahr 2015 dominieren bei einem Mittelwert von 0,66 grüne Farbtöne (einpipfliges Balkendiagramm), während in 2018 Gelb und Orange die Darstellung des NDVI (Mittelwert 0,54) beherrschen. Das zweigipflige Balkendiagramm wird von dem Gipfel bei niedrigen Werten dominiert.

## Veränderungen im Wasserhaushalt und Baumwachstum

Ein periodisch defizitärer Landschaftswasserhaushalt in Nordostdeutschland war für das GFZ der Anlass, 2009/2010 am Großen Füstensee-See-Hinnensee hydrologische, dendroökologische und seegeschichtliche Untersuchungen im Rahmen von TERENO-Nordost zu beginnen (Kaiser et al., 2012). Der Wasserspiegel des Füstenseer Sees wird aber bereits seit längerem gemessen. Auffällig ist von 1995 bis 2010 ein negativer Seespiegeltrend mit einer maximalen Seespiegelabsenkung von etwa 1 m, was Uferlinienverschiebungen und Strandbildungen zur Folge hatte. Diese führten zu einer starken (Naturschutz-)behördlichen, öffentlichen und wissenschaftlichen Wahrnehmung. Ab dem Herbst 2010 stieg der Wasserspiegel wieder an, um dann seit 2013 wieder zu fallen. Er lag im Herbst 2018 bei nur 28 cm über dem historischen Minimum von 2006 (Abb. 4). Das Jahr 2018 zeigt einen besonders starken Abfall. Die abfallenden Trends des Füstenseer Sees sind zwar deutlich zu erkennen. Sie sind aber relativ gedämpft, wie insbesondere im Vergleich mit dem im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin gelegenen Redernswalder See deutlich wird, der sehr viel steilere Abfälle zu verzeichnen hat (Kaiser et al., 2015).

Auch die Bodenfeuchtedaten am Standort Hinnensee, einem Teilbecken des Großen Füstenseer Sees, zeigen die besondere Dynamik des Jahres 2018 (Abb. 5): bis April zunächst nass bis überdurchschnittlich nass, danach folgte eine starke und kontinuierliche Austrocknung, die, anders als in normalen Jahren, kaum durch die normalerweise auftretenden gelegentlichen Sommerregen unterbrochen wurde. Ab Anfang Juni wurde das physikalisch begründete Minimum der Bodenfeuchte erreicht. Dieses Minimum wurde auch schon in vorherigen Jahren erreicht, allerdings immer nur für kurze Zeiträume und nicht langfristig wie 2018. Da das durch die Sommerregenereignisse zur Verfügung

gestellte Wasser normalerweise direkt durch den Waldbestand aufgenommen wird, war zu erwarten, dass die Bäume 2018 besonders unter einem Mangel litten. Dies sollte zu allererst für Bäume gelten, die weiter oben am Hang (rechte Spalte) angesiedelt sind, da diese grundwasserfernen Standorte trockener sind als die Standorte direkt am See, wo der Abstand zum Grundwasser nur zwischen 0,5 und 4 m beträgt (linke Spalte).

Die mit Punktdendrometern (Abb. 6) kontinuierlich gemessenen Wachstumsdaten der Baumarten Buche, Eiche und Kiefer zeigen jedoch unterschiedliche Reaktionen auf die extremen Verhältnisse des Jahres 2018 (Abb. 7).

Während die Buche mit erstaunlich gutem Wachstum besonders an dem grundwasserfernen Standort überrascht, zeigen die beiden anderen Baumarten starke Wachstumseinbrüche. Das ist deshalb so überraschend, weil Buchen als wenig trockenresistent gelten (Scharnweber et al., 2011). Eine Erklärung könnte darin liegen, dass die Buchen noch von der vorhandenen Restfeuchte im Boden profitieren und so einen normalen Jahrring formen konnten, bevor die extreme Trockenheit Anfang Juni einsetzte. Die Diagramme in Abb. 7 zeigen auch deutlich, dass das Wachstum der Buchen früher im Jahr einsetzte und auch endete. Die Wachstumskurve verläuft allerdings steiler als in den Jahren zuvor, d. h. trotz kürzerer Wachstumsperiode konnten die Buchen wegen des schnelleren Wachstums einen normalen Jahrring produzieren. Für Eichen und Kiefern setzt das Wachstum zu ähnlichen Zeiten ein, wie bei den Buchen, wobei es bei den Eichen früher endete und bei den Kiefern langsamer verlief und dementsprechend die Jahrringe 2018 schmaler ausfielen. Für alle drei Baumarten bleibt abzuwarten, wie sich der extrem trockene Sommer auf den Verlauf des Jahrrings 2019 auswirken wird. Es ist zu vermuten, dass der Trockenstress in 2018 zu einer Unterversorgung der Bäume geführt hat. Daraus resultiert, dass die fehlenden Reserven im Frühjahr 2019 zu einer Wachstumsverzögerung führen werden, weil die Bäume nach der Winterruhe erst neue Photosyntheseprodukte bilden müssen, mit denen dann die Holzzellen des Jahrrings 2019 produziert werden können. Die Baumschäden durch das extreme Jahr 2018 scheinen aber begrenzt und wahrscheinlich durch den zu Beginn noch feuchten Boden gemildert gewesen zu sein.

### Auswirkungen auf die Wiedervernässung von Mooren und deren Treibhausgasbilanz

Landwirtschaft auf drainierten Moorböden verursacht 4,5 % der bundesweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und mehr als 30 % der landesweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Mecklenburg-Vorpommern. Die Wiedervernässung von ehemals drainierten Moorstandorten ist eine Managementmaßnahme des Natur- und Klimaschutzes, um natürliche Moorfunktionen wie die Puffer- und Filterkapazität (zur Gewässerreinigung), die Kohlenstoffspeicherung (zum Klimaschutz) und die Habitatvielfalt (für Biodiversitäts- und Artenschutz) wiederherzustellen.

Seit Mai 2013 werden im Rahmen von TERENO-Nordost auf dem in 2004/2005 wiedervernässten Niedermoorstandort Zarnekow



Abb. 6: Punktdendrometer, hier installiert an einer Eiche, messen ununterbrochen seit 2012 halbstündig das Dickenwachstum von 36 Bäumen im Müritz-Nationalpark. (Foto: I. Heinrich, GFZ)

Fig. 6: Point dendrometers, installed on an oak tree, have been measuring the stem growth of 36 trees on a half-hourly basis since 2012 in Müritz National Park.

im Peenetal kontinuierlich Treibhausgasflüsse (CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>) mit Hilfe der Eddy-Kovarianz-Technik bestimmt, um die Entwicklung der Kohlenstoffquellen- bzw. -senkendynamik zu untersuchen und gegebenenfalls Handlungsoptionen zur Optimierung des Managements geben zu können.

Die Kohlenstoffdynamik hängt dabei von zahlreichen interagierenden Faktoren ab wie z. B. der Landnutzungsgeschichte, der Hydrologie, dem Wasserstandmanagement und nicht zuletzt vom Wetter und Klima. So hatten die extremen meteorologischen Bedingungen des Sommers 2018 vielfältige und bereits kurzfristig sichtbare Auswirkungen auf den Polder Zarnekow. Wie schon im ebenfalls sehr niederschlagsarmen Jahr 2016 fiel beispielsweise der im Rahmen von TERENO intensiv untersuchte und üblicherweise durch Überstau und eutrophes Flachwasser gekennzeichnete Polder vollständig trocken (Abb. 8). Beginnend bei einem Pegelhöchststand von etwa 120 cm (Mitte April) sank der Wasserspiegel kontinuierlich bis zur weitgehenden Austrocknung Mitte August und dem vollständigen Verlust des Oberflächenwassers (Mitte September). Am 13. Oktober 2018 begann abrupt der erneute Überstau der Fläche, gefolgt von einem starken Anstieg des Wasserstands in den letzten Oktobertagen. Diese vorübergehenden Austrocknungsphasen begünstigten offenbar die sprunghafte Ausbreitung der vor allem aus Rohrkolben bestehenden Randvegetation, die allein seit der Vegetationsperiode 2016 um etwa 40 m in die Wasserfläche hineingewachsen ist und 2018 besonders stark zunahm. Diese zunehmende Kolonisation mit Rohrkolben könnte einen positiven Rückkopplungseffekt auf die Evapotranspiration und damit einen negativen Effekt auf die künftigen Wasserstände im Polder auslösen. Seit Ende September/Anfang Oktober 2018 konnte zudem eine vollständige Begrünung der zuvor weitgehend vegetationsfreien, trockengefallenen Fläche beobachtet werden. Ob und wie sich diese Vegetationsdynamik – neben den sofortigen Auswirkungen auf Photosynthese und Respiration – nach dem winterlichem Absterben der Biomasse

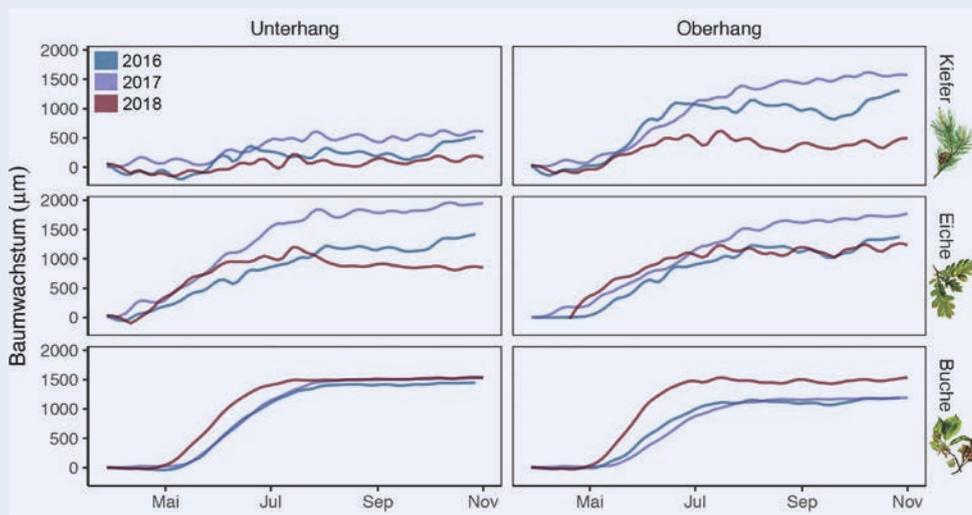


Abb. 7: Jährlicher Wachstumsverlauf der Baumarten Kiefer, Eiche und Buche (von oben nach unten) am Standort Hinnensee (2016 bis 2018)

Fig. 7: Annual course of growth of pine, oak and beech (from top to bottom) at site Hinnensee (2016 to 2018)

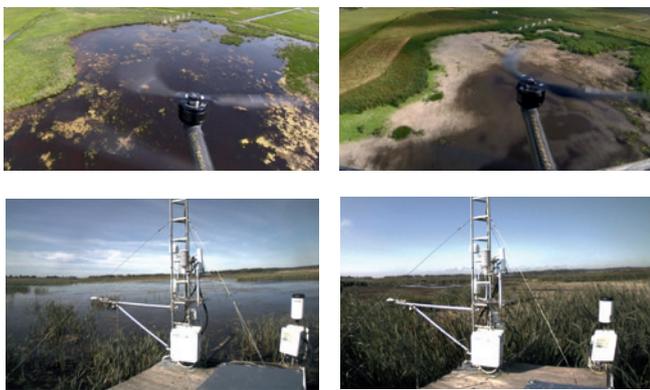


Abb. 8: Vegetations- und Wasserstandsentwicklung am Polder Zarnekow am 23. Mai 2018 (links) und am 5. September 2018 (rechts) (Fotos: Institut f. Flugführung, TU Braunschweig und GFZ)

Fig. 8: Vegetation and water level dynamics at the polder Zarnekow on 23 May 2018 (left) and on 5 Sep. 2018 (right)

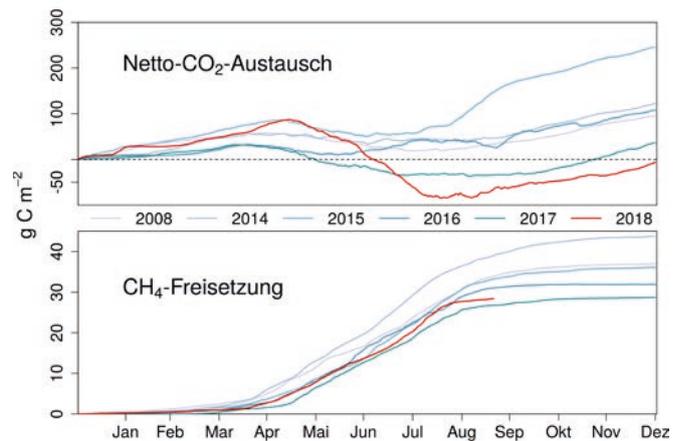


Abb. 9: Netto-CO<sub>2</sub>-Austausch (oben) und Methanfreisetzung (unten) in 2018 am Polder Zarnekow im Vergleich zu den Vorjahren

Fig. 9: Net-CO<sub>2</sub>-exchange (top) and methane emissions (bottom) in 2018 at polder Zarnekow in comparison to previous years

auf die langfristigen Stoffflüsse auswirken wird, ist eine der wissenschaftlichen Fragestellungen, die sich aus dem Dürrejahr 2018 ergeben. Entscheidend für die langfristig folgende Entwicklung der Treibhausgasflüsse wird sein, wie mikrobielle Gemeinschaften auf das temporäre Austrocknen des Polders und die sprunghafte Begrünung reagiert haben und wie nachhaltig diese Änderungen sind. Die Wiedervernässung des zuvor drainierten und landwirtschaftlich genutzten Durchströmungsmoors hatte die Gruppe der Methan bildenden Archaeen (einzellige Organismen) vor allem gegenüber Methan oxidierenden Bakterien deutlich begünstigt (Wen *et al.*, 2018). Die Dürre 2018 könnte zu einem Verschieben innerhalb beider Gruppen geführt haben, so dass sich der Prozess der Methanoxidation trotz erneutem Wasserspiegelanstieg nachhaltig etabliert haben könnte. Erste Ergebnisse aus Probenahmekampagnen im Herbst 2018 deuten an, dass die Methangehalte im Torfkörper leicht zurückgegangen sind. Die kurzfristigen Auswirkungen auf Wärme- und Stoffflüsse im Untersuchungsgebiet sind Gegenstand bereits laufender Analysen. Neben einem im Vergleich zu den Vorjahren deutlich stärkeren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Freisetzung durch Respiration konnte – konsistent mit der Ausbreitung der Vegetation – ab Mitte Mai ein noch stärkerer Anstieg der Photosyntheseleistung beobachtet werden,

so dass der Polder seit Anfang Juni eine deutliche CO<sub>2</sub>-Senke darstellte. Diese außergewöhnliche Produktivität kompensierte bis Jahresende die Respirationsleistung vollständig, sodass das Jahr 2018 das erste Jahr seit der Wiedervernässung 2004/2005 war, in dem der Polder in der Jahresbilanz eine Netto-CO<sub>2</sub>-Senke darstellte. Unabhängig von den meteorologischen Bedingungen des Jahres 2018 scheint hingegen die Freisetzung von Kohlenstoff durch Methan weiterhin einem bereits seit einigen Jahren zu beobachtenden abnehmenden Trend zu folgen (Abb. 9).

### Jahreszeitliche Effekte und Extremjahre in Seewasserisotopen

Seit 2012 wird der Tiefe See bei Neu-Gaarz in Mecklenburg-Vorpommern im Rahmen von TERENO-Nordost durch das GFZ umfassend mittels Langzeitmonitoring und Geoarchiven untersucht. Der Tiefe See besitzt infolge seiner jahresweise geschichteten (warvierten) Sedimente eines der wenigen Archive, das für eine zeitlich hochaufgelöste Paläoklimarekonstruktion seit dem Ende der letzten nordischen Eiszeit geeignet ist. Das Monitoring ist Voraussetzung, um den Einfluss sich ändernder Umweltbedingungen auf den See und die in ihm gebildeten sowie abgelagerten Sediment zu

verstehen. Diese Erkenntnisse werden dann zur Interpretation der Sedimentkerne genutzt, um klimarelevante Veränderungen besser erkennen und rekonstruieren zu können.

Das Monitoring umfasst die sensorbasierte Erfassung physikalischer Parameter in der Wassersäule durch kontinuierlich messende Sensoren (Wassertemperatur), die monatliche Probennahme und chemische Analyse des Seewassers sowie die Beobachtung der saisonalen Sedimentbildung in Sedimentfallen in verschiedenen Wassertiefen. Meteorologische Daten werden mit einer Wetterstation, die auf einer Plattform an der tiefsten Stelle auf dem See installiert wurde, seit 2015 einschließlich eines monatlich beprobten Regenwassersammlers, erfasst. Die stabilen Isotopenverhältnisse des Wassers ( $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta\text{D}$ ) geben Auskunft über den Wasserkreislauf und spiegeln den Einfluss von Regen-, Oberflächen- und Grundwasser sowie von Verdunstungsprozessen wider. Die Kenntnisse der Kontrollmechanismen der Isotopenverhältnisse des Seewassers sind eine Voraussetzung für die Rekonstruktion des vergangenen Klimas anhand von  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten in Karbonaten aus Sedimentkernen oder  $\delta\text{D}$ -Werten von Pflanzenwachs (Leng und Marshall, 2004). Die stabilen Isotopenverhältnisse des Wassers werden im Wasserisotopenlabor der GFZ-Sektion „Klimadynamik und Landschaftsentwicklung“ analysiert.

Das trockene Jahr 2018 war im Untersuchungszeitraum im Vergleich zum feuchten Jahr 2017 und dem Durchschnittsjahr 2016 durch Extrembedingungen gekennzeichnet (Abb. 10 und 11). Im Jahr 2018 war der Niederschlag um rund 200 mm niedriger als der Jahresdurchschnitt, und die Wassertemperatur erreichte im Sommer 2018 mit 26 °C Höchstwerte im Vergleich zu maximal 23 °C in den vorherigen Jahren. Die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Oberflächenwassers (sog. Epilimnion) liegen normalerweise bei etwa -5 ‰ im Winter und steigen mit zunehmender Verdunstung und Temperatur im Sommer auf -4 ‰ an. Im Sommer 2018 wurden die höchsten  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit fast -3 ‰ erreicht. Dieser Anstieg im  $\delta^{18}\text{O}$  entspricht einem hohen Verdunstungsverlust des Oberflächenwassers und korreliert mit der Abnahme des Seepiegels um rund 80 cm.

Die Übertragung der Erkenntnisse aus dem Monitoring auf die Ergebnisse hochauflösender Untersuchungen der Sedimentkerne mit mikrofaziellen und geochemischen/isotopengeochemischen Methoden wird für die verbesserte Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung benötigt. Zum Erkennen regionaler und überregionaler Muster von lang- und kurzfristigen Klimaschwankungen zwischen atlantisch und eher kontinental geprägtem Klima wird ein vergleichbares Monitoring zusammen mit Partnern von der Polnischen Akademie der Wissenschaften an Seen im nördlichen Polen an gleichfalls warvierten Seen in ähnlicher geologischer Position durchgeführt.

## Veränderte Feuer- und Waldbranddynamik

Im Gebiet von TERENO-Nordost war und ist der Faktor Feuer ein wichtiger Umweltfaktor, der durch eine am GFZ erstellte Rekonstruktion der Feuerdynamik für etwa die letzten 11 000 Jahre näher beleuchtet wurde (Dietze et al., 2018). Die Daten verdeutlichen, dass eine hohe Feueraktivität in den letzten Jahrtausenden eng



Abb. 10: Blick auf das Ostufer des Tiefen Sees im Mai (oben) und November (unten) 2018. Die weiße Linie kennzeichnet die ungefähre ursprüngliche Uferlinie. (Fotos: S. Pinkerneil, GFZ)

Fig. 10: View on the eastern shore of Lake Tiefer See in May (top) and November (bottom) 2018. The white line marks the approximate original shore line.

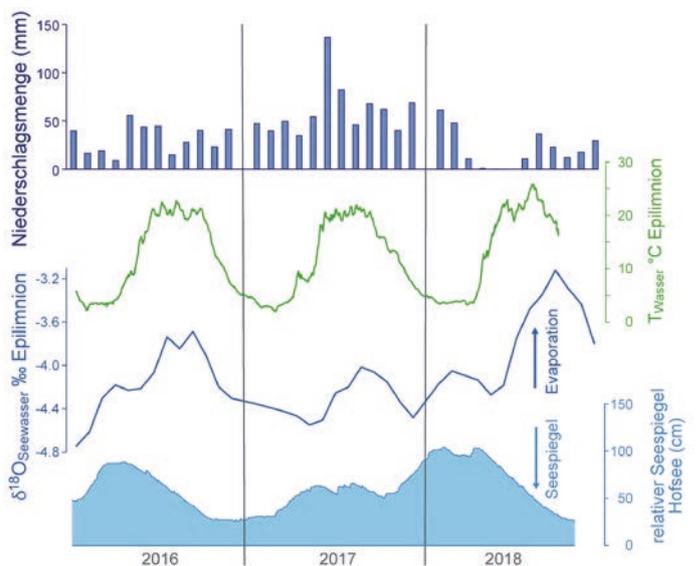


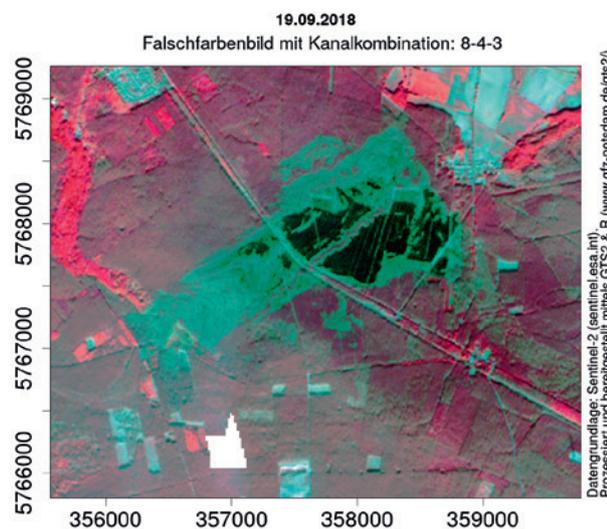
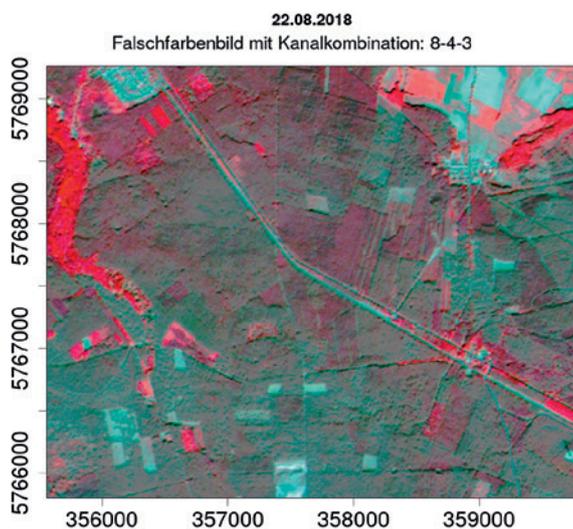
Abb. 11: Sauerstoffisotopenwerte ( $\delta^{18}\text{O}$ ) des Epilimnion-Seewassers (Oberflächenwasser) am Standort Tiefer See im Vergleich zum Seespiegel des hydrologisch verbundenen Hofsees, der Wassertemperatur des Epilimnions im Tiefen See und der Niederschlagsmenge von 2016 bis 2018

Fig. 11: Oxygen isotope values ( $\delta^{18}\text{O}$ ) of the epilimnic lake water (lake surface water) at lake Tiefer See compared to the relative lake level of the hydrological connected lake Hofsee, the epilimnic water temperature at lake Tiefer See and the precipitation amount over the period 2016 to 2018



Abb. 12: Waldbrände in Brandenburg. Oben: Statistik der Waldbrandflächen (1998-2018; Daten: Landesforst Brandenburg) vor dem Hintergrund einer Schrägluftbildaufnahme des etwa 400 ha großen Waldbrandes bei Treuenbrietzen südwestlich von Berlin im August 2018 (Foto: Jens Berger). Unten: Satellitenaufnahmen dieser Waldbrandfläche unmittelbar vor (links) und nach dem Brand (rechts)

Fig. 12: Forest fires in Brandenburg. Top: Forest area burnt during the period 1998-2018 (data: Landesforst Brandenburg) on top of an aerial photo showing the fire that burnt around 400 ha near Treuenbrietzen southwest of Berlin in August 2018. Below: Satellite images of the same burnt area shortly before (left) and after (right) of the fire



mit menschlicher Landnutzung gekoppelt war. Dabei wurde Feuer auf verschiedene Weise in den ehemals weit verbreiteten Laubmischwäldern als Werkzeug zur Landnutzung verwendet. Blitzschläge verursachten hingegen nur in sehr trockenen Sommern natürliche Waldbrände. Mit der industriellen Revolution im 18./19. Jahrhundert setzte die Forstwirtschaft jedoch vermehrt auf leicht entflammable Kiefernmonokulturen zur Holzversorgung und baute die natürlichen, wenig brennbaren Laubmischwälder um. Die aktive Feuernutzung sowie spontane Feuer wurden mit Brandschutzmaßnahmen weitgehend aus der Landschaft verbannt. Diese Maßnahmen waren bisher sehr erfolgreich. Allerdings häufen sich im Zuge des Klimawandels die extrem trockenen Sommer und damit auch die Waldbrände, wie z. B. die großflächigen Feuer in den Wäldern Brandenburgs des Sommers 2018 infolge der ausgeprägten Trockenheit (Abb. 12, Trockenjahr 2003: rund 600 ha, Trockenjahr 2018: rund 1660 ha). Unter extremen Bedingungen scheinen die getroffenen Maßnahmen offenbar noch nicht wirksam genug zu sein. Insbesondere ist ein vorbeugender Schutz vor Bränden durch den Waldumbau hin zu einem höheren Laubholzanteil und die vermehrte Pflanzung von Waldbrandriegeln naheliegend.

Denn Waldbrände bedeuten nicht nur ökonomische Einbußen in der Forstwirtschaft, sie stellen auch Risiken für Siedlungen und Infrastrukturen dar und beeinflussen längerfristig die Erholungsfunktionen der Wälder. Auch die natürlichen Stoffumsätze und Ökosystemfunktionen in den Wäldern werden zumeist für Jahre bis Jahrzehnte nachteilig verändert. Durch Modifikationen der Waldstrukturen, der Albedo und der Oberflächenstrukturen der verbrannten Waldflächen kommt es zu längerfristigen Veränderungen wichtiger Größen wie z. B. Niederschlagsinfiltration, Schneeakkumulation und Grundwasserneubildung im Vergleich zu intakten Wäldern. Häufen sich Waldbrände, kann somit auch die Regulierungsfunktion der Wälder in den Wasser-, Energie- und Stoffkreisläufen verändert werden.

### Zusammenfassung und Ausblick

Der Extremsommer 2018 war für TERENO-Nordost eine besondere Möglichkeit, die regionalen Auswirkungen von Klimaänderungen zu messen. Die Wetterlage hat tiefe Spuren in der Landschaft Nordostdeutschlands hinterlassen. Eine der Folgen waren viele

Waldbrände. Ein Großbrand vernichtete südwestlich von Berlin allein etwa 400 ha Wald. An den Standorten von TERENO-Nordost zeigten sich teilweise extreme Reaktionen der Ökosysteme. So fiel der Polder Zarnekow bei Demmin zum ersten Mal seit seiner Wiedervernässung trocken, mit noch nicht abzusehenden Folgen für die mikrobiellen Gemeinschaften und den Gasaustausch. Die Wälder im Müritz-Nationalpark hingegen haben den Extremsommer relativ gut überstanden, auch weil die Monate vor der großen Trockenheit überdurchschnittlich feucht waren. Besonders die Buchen waren in der Lage, die im Frühjahr noch vorhandene hohe Bodenfeuchte für ein gutes Dickenwachstum zu nutzen. Die Messdaten des Folgejahres 2019 für die verschiedenen Monitoringstandorte werden wichtige Aufschlüsse geben, wie die Langzeitwirkungen eines solchen Extremjahres ausfallen.

In Zukunft wird TERENO-Nordost zusammen mit dem neuen modularen Erdsystemobservatorium der Helmholtz-Gemeinschaft MOSES (Modular Observation Solutions for Earth Systems) bei extremen Wettersituationen noch besser ereignisbezogen und räumlich flexibel Umweltdaten für besonders betroffene Gebiete erheben, um Wechselwirkungen zwischen kurzfristigen Ereignissen (MOSES) und langfristigen Trends (TERENO) für ausgewählte Landschaftsbereiche zu untersuchen. Die so gewonnenen Umweltdaten bilden eine Grundlage für prognosefähige Systemanalysen, um beispielsweise die Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf die langfristige Verfügbarkeit und Qualität von Wasser- und Bodenressourcen zu verbessern. Aus diesen Erkenntnissen können Handlungsoptionen im Zuge einer verbesserten Anpassung an den Klima- und Landschaftswandel mit seinen jeweils regionalspezifischen Auswirkungen und Herausforderungen abgeleitet werden.

## Literatur

- Bens, O., Schwank, M., Blume, T., Brauer, A., Güntner, A., Heinrich, I., Helle, G., Itzerott, S., Kaiser, K., Sachs, T., Hüttl, R. F. J. (2012): TERENO: eine Monitoring- und Forschungsplattform zur Erfassung langfristiger Auswirkungen des Globalen Wandels auf regionaler Ebene. - *System Erde*, 2, 1, pp. 68–73. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.02.01.13>
- Dietze, E., Theuerkauf, M., Bloom, K., Brauer, A., Dörfler, W., Feeser, I., Feurdean, A., Gedminien, L., Giesecke, T., Jahns, S., Karpi ska-Kołaczek, M., Kołaczek, P., Lamentowicz, M., Latałowa, M., Marcisz, K., Obremska, M., P dziszewska, A., Poska, A., Rehfeld, K., Stan ikait , M., Stivrins, N., wi ta-Musznicka, J., Szal, M., Vassiljev, J., Veski, S., Wacnik, A., Weisbrodt, D., Wiethold, J., Vannièrè, B., Stowi ski, M. (2018): Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe. - *Quaternary Science Reviews*, 201, pp. 44–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.005>
- Dietze, E., Slowinski, M., Zawiska, I., Veh, G., Brauer, A. (2016): Multiple drivers of Holocene lake level changes at a lowland lake in northeastern Germany. - *Boreas*, 45, 4, pp. 828–845. DOI: <https://doi.org/10.1111/bor.12190>
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2018): Deutschlandwetter im Jahr 2018, verfügbar unter [https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228\\_deutschlandwetter\\_jahr2018\\_news.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228_deutschlandwetter_jahr2018_news.html) [letzter Zugriff: 15.03.2019]
- Germer, S., Kaiser, K., Bens, O., Hüttl, R. F. J. (2011): Water Balance Changes and Responses of Ecosystems and Society in the Berlin-Brandenburg Region - a Review. - *Die Erde*, 142, 1-2, pp. 65–95.
- Heinrich, I., Balanzategui, D., Bens, O., Blasch, G., Blume, T., Böttcher, F., Borg, E., Brademann, B., Brauer, A., Conrad, C., Dietze, E., Dräger, N., Fiener, P., Gerke, H. H., Güntner, A., Heine, I., Helle, G., Herbrich, M., Harfenmeister, K., Heußner, K.-U., Hohmann, C., Itzerott, S., Jurasinski, G., Kaiser, K., Kappler, C., Koebisch, F., Liebner, S., Lischeid, G., Merz, B., Missling, K. D., Morgner, M., Pinkerneil, S., Plessen, B., Raab, T., Ruhtz, T., Sachs, T., Sommer, M., Spengler, D., Stender, V., Stüve, P., Wilken, F. (2018): Interdisciplinary Geo-ecological Research across Time Scales in the Northeast German Lowland Observatory (TERENO-NE). - *Vadose Zone Journal*, 17, 1, 180116. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2018.06.0116>
- Kaiser, K., Germer, S., Küster, M., Lorenz, S., Stüve, P., Bens, O. (2012): Seespiegelschwankungen in Nordostdeutschland: Beobachtung und Rekonstruktion. - *System Erde*, 2, 1, pp. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.02.01.12>
- Kaiser, K., Koch, P. J., Mauersberger, R., Stüve, P., Dreibrodt, J., Bens, O. (2014): Detection and attribution of lake-level dynamics in north-eastern central Europe in recent decades. - *Regional Environmental Change*, 14, 4, pp. 1587–1600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0600-5>
- Kaiser, K., Heinrich, I., Heine, I., Natkhin, M., Dannowski, R., Lischeid, G., Schneider, T., Henkel, J., Küster, M., Heussner, K.-U., Bens, O., Chmielewski, J. (2015): Multi-decadal lake-level dynamics in north-eastern Germany as derived by a combination of gauging, proxy-data and modeling. - *Journal of Hydrology*, 529, Pt. 2, pp. 584–599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.057>
- Leng, M. J., Marshall, J. D. (2004): Paleoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives. – In: *Quaternary Science Reviews*, 23, 7-8, pp. 811–831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.012>
- Scharnweber, T., Manthey, M., Criegee, C., Bauwe, A., Schröder, C., Wilkening, M. (2011): Drought matters – Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. – In: *Forest Ecology and Management*, 262, 6, pp. 947–961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.026>
- Wen, X., Unger, V., Jurasinski, G., Koebisch, F., Horn, F., Rehder, G., Sachs, T., Zak, D., Lischeid, G., Knorr, K.-H., Böttcher, M. E., Winkel, M., Bodelier, P. L. E., Liebner, S. (2018): Predominance of methanogens over methanotrophs in rewetted fens characterized by high methane emissions. - *Biogeosciences*, 15, pp. 6519–6536. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-15-6519-2018>

# Netzwerk

## REKLIM-Regionalkonferenz am GFZ



Die Helmholtz-Klimainitiative REKLIM (Regionale Klimaänderungen) ist ein 2009 gegründeter Verbund von neun Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft. Ziel von REKLIM ist die Untersuchung der regionalen Auswirkungen des derzeitigen globalen Klimawandels. Die Ergebnisse tragen dazu bei, Anpassungs- und Vermeidungsstrategien zu optimieren und liefern somit eine wichtige Hilfestellung für Entscheidungsträger. Dabei spielen die jährlich ausgerichteten Regionalkonferenzen eine wichtige Rolle als Dialogplattform für die Wissenschaft sowie als Entscheidungshilfe in Politik und Verwaltung.

Teile des Systems Erde befinden sich gegenwärtig in einem tiefgreifenden Wandel. Die beobachtete Erhöhung der Lufttemperatur, die Erwärmung der Ozeane, das Abschmelzen der Gletscher und Eisschilde sowie der Meeresspiegelanstieg sind Zeichen einer signifikanten globalen Erderwärmung in den letzten Jahrzehnten. Die Auswirkungen dieser globalen Klimaveränderungen sind jedoch regional sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund ist das langfristige Ziel von REKLIM die Entwicklung von optimierten, gekoppelten Erdsystemmodellen auf einer regionalen Skala, in denen die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean, Kryosphäre, Biosphäre, Landoberflächen und Böden berücksichtigt werden. Diese Erdsystemmodelle in Kombination mit

entsprechenden Beobachtungen sowie Datenauswertungstechniken sollen eine Einschätzung über regionale Klimaänderungen und ihre Auswirkungen auf den Lebensraum des Menschen in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft erlauben.

REKLIM widmet sich in speziellen Schwerpunktthemen einem besseren Verständnis und der Quantifizierung regionaler Prozesse. Diese Themen umfassen Veränderungen der atmosphärischen Zusammensetzung, der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean, Eis und Landoberflächen sowie die Meeresspiegeländerungen. Außerdem zählen dazu klimatische Veränderungen in hohen Breiten, klimatische Rückkopplungseffekte von Veränderungen der Landoberflächen sowie die Veränderung von Extremereignissen in ihrer Intensität und Häufigkeit. Das GFZ beteiligt sich verstärkt an drei REKLIM-Schwerpunktthemen.

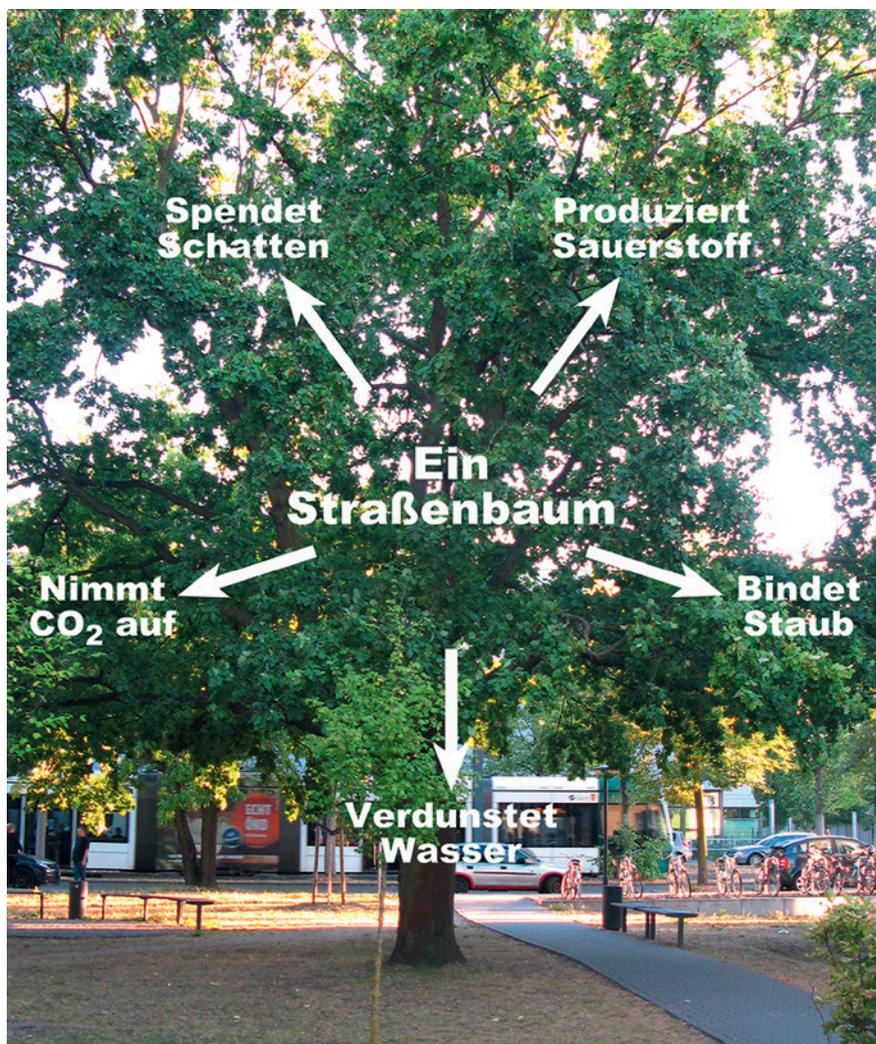
Das Schwerpunktthema „Schnelle Klimaänderungen aus Proxy-Daten“ stellt dabei Daten aus Geoarchiven zur Verfügung. Mit diesen werden Mechanismen und Prozesse, die zu verstärkten Klimasprüngen in der Vergangenheit geführt haben, erfasst und entsprechende regionale Klimamuster rekonstruiert. Für eine verbesserte Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung benötigt die Klimaforschung vor allem bessere Informationen über Dauer,

Geschwindigkeit, Frequenz und regionale Muster von lang- und kurzfristigen Klimaschwankungen. Der Rückblick in die Erdgeschichte bildet eine wesentliche Basis zum Verständnis der Reaktion und der Dynamik des Klimas.

Im Thema „Landoberflächen im Klimasystem“ werden die regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Wasserressourcen, Land- und Forstwirtschaft und deren Einflüsse auf das Klima untersucht. Die komplexe Verkettung von physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen an der Schnittstelle zwischen Atmosphäre und Landoberfläche ist bisher unvollständig verstanden, bildet aber einen der Schlüssel für verbesserte Vorhersagen regionaler Ausprägungen des Klimawandels und der resultierenden Folgen für den Menschen. In den vier Umweltobservatorien des TERENO-Netzwerks werden die Datengrundlagen für Prozessverständnis erarbeitet. Damit können verbesserte Szenarien in der nächsten Generation von regionalen Klimamodellen generiert werden.

Die Quantifizierung der Verluste der kontinentalen Eismassen, hier insbesondere von Grönland, wird im dritten Schwerpunktthema „Meeresspiegeländerungen von globaler zu regionaler und lokaler Skala“ bearbeitet. Gegenwärtig steigen die Schmelzraten der Eismassen weltweit, und insbesondere das Verhalten des grönländischen Eisschildes wird in Zukunft entscheidend sein. Eine wesentliche Unbekannte ist dabei noch die Dynamik der Gletscher und Eisströme und ihr Vermögen, Eis ins Meer zu transportieren. Weitere Fragen sind die Reaktion des Ozeans auf die Erwärmung, auf die Zufuhr von Schmelzwasser, auf die Änderung des Schwerfeldes durch den schrumpfenden Eisschild und die sich ergebenden Auswirkungen auf die Küstenzonen.

Die jährlich stattfindenden REKLIM-Regionalkonferenzen sind eine ideale Dialogplattform, um sowohl die Ergebnisse aktueller Forschung den Entscheidungsträgern aus Politik und Verwaltung zu präsentieren, als auch die Bedürfnisse der Gesellschaft



Wichtige Ökosystemleistungen eines Straßenbaums in Berlin (Foto: A. Hendrich, GFZ)

städtischen Wärmeinsel aufgezeigt. Während das Wachstum der Winterlinde, die am häufigsten gepflanzte Baumart, kaum durch den UWI beeinflusst zu sein scheint, reagieren die Eichen viel stärker und signifikant negativ. Das macht die Eiche für weitere Forschungen interessant, aber als Stadtbaum bei zunehmender Erwärmung weniger geeignet. Das Projekt zeigt auf, wie die verschiedenen Baumarten in Zukunft auf die Klimaerwärmung reagieren werden und liefert damit auch wichtige Informationen für geeignete Anpflanzungen in den historischen Gärten.

Die Ergebnisse zu Seespiegelveränderungen in Nordostdeutschland zeigen ebenfalls ein Potenzial für Anpassungsmaßnahmen auf. Es wurde gezeigt, dass nicht nur die klimatischen Bedingungen einen Einfluss auf Seespiegel haben, sondern auch die für die Grundwasserneubildung entscheidende Vegetation in Einzugsgebieten und die Maßnahmen des Wassermanagements durch den Menschen während der letzten Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Mit diesem Wissen eröffnen sich Möglichkeiten, fallenden Seespiegeln mit geeigneten Maßnahmen entgegenzuwirken, was zunehmend von Bedeutung sein wird, weil die Forschungsergebnisse ebenfalls zeigen, dass die Wasserstände mancher Seen ohne den Einfluss des Menschen noch deutlich unter die derzeit beobachteten Tiefstände fallen können. ■

an die Forschung herauszuarbeiten. Die inzwischen achte Regionalkonferenz am 25. September 2018 wurde durch das GFZ organisiert und fand auf dem Telegrafenberg in Potsdam statt. Aus aktuellem Anlass standen die Auswirkungen des Klimawandels speziell für die Ressource Wasser in Nordostdeutschland im Fokus der Veranstaltung (vgl. Beitrag von Heinrich et al. in diesem Heft, S. 38). Neben aktuellen wissenschaftlichen Ergebnissen wurden praktische Probleme der Anpassung an Extremereignisse erläutert. Fragen zur Wasserversorgung Potsdams, zu Problemen bei der Erhaltung und Pflege der

Historischen Gärten in Berlin-Brandenburg bei häufigeren Trockenphasen, sowie zum Regenwassermanagement in Berlin bei extremen Starkregen wurden diskutiert.

Besonders deutlich wird die Bedeutung der Forschung für praktische Anpassung an den Klimawandel in dem Projekt „Bäume als Indikatoren der urbanen Wärmeinsel“, das von Dr. Ingo Heinrich, GFZ, präsentiert wurde. Am Beispiel Berlins, der Stadt mit dem stärksten urbanen Wärmeinseleffekt (UWI), wurde erstmals an Jahrringen verschiedener Baumarten die räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung der

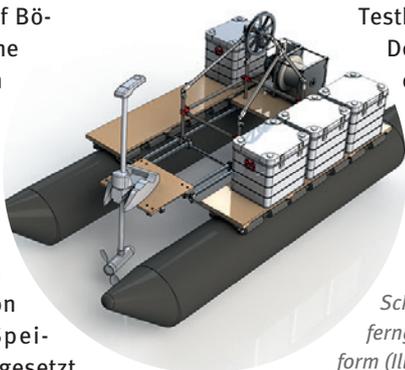
#### Koordination der REKLIM-Beiträge des GFZ:

Prof. Achim Brauer  
([achim.brauer@gfz-potsdam.de](mailto:achim.brauer@gfz-potsdam.de))



Seit 2017 entwickeln die acht Helmholtz-Zentren des Forschungsbereichs „Erde und Umwelt“ gemeinsam das innovative Beobachtungssystem MOSES (Modular Observation Solutions for Earth Systems). Mit dem modularen Beobachtungssystem sollen Interaktionen zwischen kurzzeitigen Ereignissen und langfristigen Trends in verschiedenen Kompartimenten des Systems Erde erfasst werden. Im Fokus stehen dabei vor allem Hitzewellen, hydrologische Extreme, Ozeanwirbel sowie das Abtauen von Permafrost und die damit verbundenen Treibhausgasströme in die Atmosphäre.

Das GFZ beteiligt sich an der Entwicklung von Modulen für die Beobachtung von Hitzewellen, Dürren, Hochwassern und Permafrost-Prozessen. Dabei werden z. B. die aktuell modernste Hyperspektralkamera für das Monitoring von Dürreeinflüssen auf Böden und Pflanzen, eine mit Speialsensoren ausgebaute Drohne zur Erfassung von Treibhausgasflüssen sowie ein Netz aus unterschiedlichen Gravimetern zur Bestimmung von hydrologischen Speichervariationen eingesetzt.



Schematische Darstellung der ferngesteuerten Schwimmplattform (Illustration: GFZ)

Zudem wird das Datenmanagement für das gesamte MOSES-Konsortium am GFZ koordiniert. Neben einer umfangreichen Data Policy und Datenmanagementplänen für die Messkampagnen wird ein zentrales Zugangsportale für die qualitätsgesicherten Messdaten entwickelt. Während der fünfjährigen Aufbauphase wird in einer Reihe von Testkampagnen das Zusammenspiel von teilweise neu entwickelten Messinstrumenten, umfangreichen Datenströmen und unterschiedlichen Teams von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie technischem Personal optimiert. Zum Beispiel wurde am GFZ in Kooperation mit dem AWI eine innovative ferngesteuerte Schwimmplattform zur seismischen Untersuchung von sehr schnell auftauendem Permafrost im Meeresboden nahe der Küste oder an Seeufnern entwickelt. Das System wurde bereits in der ersten MOSES-Testkampagne im Mackenzie-Delta (Kanada) erfolgreich eingesetzt.

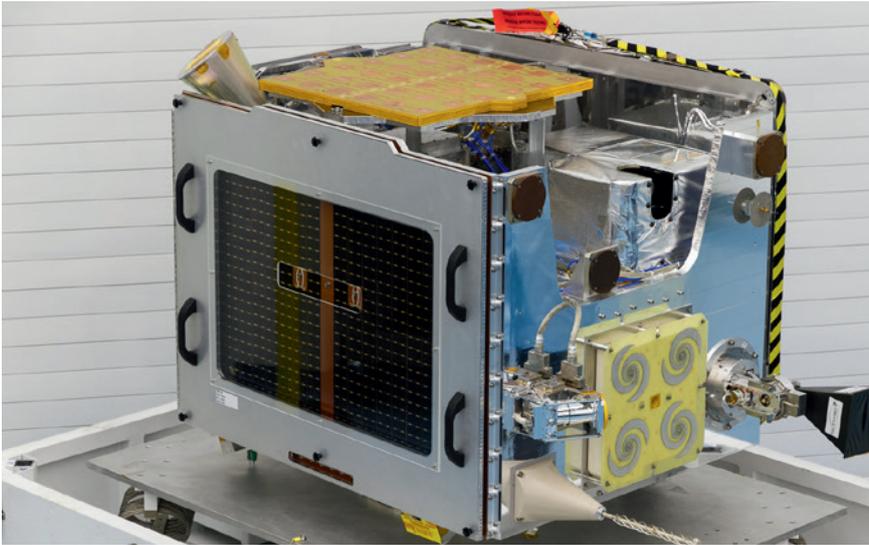
Von der Schwimmplattform wird ein seismischer Breitbandsensor auf dem Meeres- oder Seeboden

positioniert und das seismische Rauschen während einer kurzen Messzeit aufgezeichnet sowie ausgewertet. Dabei werden Daten zur räumlichen Verteilung von Permafrost im Meeresboden gewonnen sowie Degradationsraten bestimmt. Insbesondere die Lage der Permafrostoberkante in aquatischen Systemen, d. h. submarin, in Thermokarstseen und unter Flußsystemen ist bis jetzt nur wenig untersucht. Die Permafrostregionen der Erde spielen eine wesentliche Rolle bei der Freisetzung von Methan und stellen damit potenziell einen wesentlichen Einflussfaktor auf das Klima dar.

In der Betriebsphase von MOSES ab 2022 sollen die neu entwickelten, modularen Beobachtungssysteme bei und nach extremen Ereignissen kurzfristig einsetzbar sein, um die Abläufe und Auswirkungen von diesen Extremen „von der Quelle bis zur Senke“ erfassen zu können. Diese Erkenntnisse werden das Verständnis von der Relevanz der Extremereignisse für die langfristigen Trends der Klima- und Umweltvariablen entscheidend verbessern. ■

**Koordination von MOSES am GFZ:**  
Prof. Bruno Merz  
(bruno.merz@gfz-potsdam.de)

## Erster Nachweis von Regen über dem Ozean durch Navigationsatelliten



TechDemoSat-1 flugbereit im Reinraum im März 2013 (Quelle: SSTL)

Um beispielsweise den Klimawandel zu analysieren oder Informationen über Naturgefahren bereitzustellen, ist es für Forschende wichtig, Wissen über den Regen zu sammeln. Eine bessere Kenntnis der Niederschlagsmenge und ihrer Verteilung könnte beispielsweise zum Schutz vor Überschwemmungen durch Flüsse beitragen. An Land können Messstellen Daten liefern, indem sie den Niederschlag sammeln. Auf dem Meer ist das nicht so einfach. Ein neuer Ansatz eines Teams um Milad Asgarimehr (GFZ und Technische Universität Berlin), gemeinsam mit Forschenden vom Earth System Research Laboratory der National Oceanic and Atmospheric Administration der USA (NOAA) sowie der Universität Potsdam, nutzt Informationen, die in Radarsignalen von GNSS-Satelliten (Global Navigation Satellite System) enthalten sind, um Regen über dem Meer zu erkennen. Die Technologie trägt den Namen GNSS-Reflektometrie. Sie ist eine innovative Satelliten-Fernerkundungsmethode mit einem breiten Spektrum geophysikalischer Anwendungen. Asgarimehr und seine Kollegen haben ihre Ergebnisse im Fachjournal *Geophysical Research Letters* veröffentlicht.

Nach Ansicht der Forschenden könnte der neue Ansatz dazu beitragen, Niederschläge in der Atmosphäre besser zu überwachen als bisher. Die Forschung kann als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines zusätzlichen Regenindicators dienen, der Niederschlagsinformationen mittels GNSS-Reflektometrie

mit bisher unerreichter zeitlicher Auflösung und räumlicher Abdeckung liefert.

GNSS sind „Allwetter-Navigationssysteme“. Eine lange gehegte Grundannahme war deshalb, dass ihre Signale so verfasst sind, dass sie durch Wolken oder typische Niederschläge in der Atmosphäre nicht merklich abgeschwächt werden und Niederschläge deshalb nicht erkennen können. Die neue Studie nutzt einen anderen Effekt, um Regen über dem Meer nachzuweisen: Die Rauheit der Meeresoberfläche.

### GNSS-Reflektometrie kann Rauheit der Meeresoberfläche messen

Diese Oberfläche ist vor allem deshalb „rau“, weil Winde auf ihr Wellen erzeugen. Die Stärke der an der Oberfläche reflektierten Satellitensignale verhält sich umgekehrt proportional zu ihrer Rauheit: Je mehr und je stärker die Wellen, desto schwächer ist das reflektierte Signal. Kürzlich konnten Forschende nachweisen, dass es möglich ist, die Windgeschwindigkeit über den Ozeanen aus Messungen der Rauheit seiner Oberfläche zu ermitteln.

Regentropfen, die auf eine Meeresoberfläche fallen, verändern ebenfalls deren Rauheit. Milad Asgarimehr und das Team um ihn stellten sich die Frage, ob die GNSS-Reflektometrie Niederschläge über Ozeanen erkennen kann. Lautet die Antwort ja, könnten GNSS-Reflektometriesatelliten Regen fast wie ein Beobachter erkennen, der Regentropfen zusieht, wie sie das Spiegel-

bild des Mondes auf der Oberfläche eines Sees bei Nacht stören. Es gibt jedoch einen wesentlichen Unterschied: Anders als das Mondlicht sind die GNSS-Signale in der Lage, die Wolken zu durchdringen.

### Ein neues theoretisches Modell kommt zur Hilfe

Bei der Analyse von Daten des Navigationsatelliten TDS-1 (TechDemoSat-1) fand Asgarimehr Hinweise darauf, dass Regen über Ozeanen nachweisbar ist, sofern der Wind nicht zu stark weht. Allerdings fehlte seiner Forschung noch eine theoretische Begründung. Lange wurde vermutet, dass solche GNSS-Reflektometriemessungen unempfindlich gegenüber der kleinräumigen Oberflächenrauheit sein müssten, die durch Regentropfen auf der Meeresoberfläche verursacht wird. Doch die Veröffentlichung eines neuen theoretischen Modells im Jahr 2017 lieferte eine plausible Abschätzung für die Physik der Streuung von Radarsignalen an einer von schwachen Winden gestörten Meeresoberfläche. Die neue Technik, die Modelle und die Algorithmen werden nun weiter verbessert, um damit in Zukunft Datenlücken bei der Überwachung von Niederschlägen schließen können. ■

### Originalstudie:

Asgarimehr, M., Zavorotny, V., Wickert, J., Reich, S. (2018): Can GNSS Reflectometry Detect Precipitation Over Oceans? - *Geophysical Research Letters*. DOI: 10.1029/2018GL079708.

## Ein neuer Rahmen für den Himmel



*Künstlerische Darstellung der riesigen Ausströmung aus dem Quasar SDSS J1106+1939 (Abbildung: ESO/L. Calçada (Europäische Organisation für astronomische Forschung auf der Südhalbkugel))*

Am 30. August 2018 hat die International Astronomical Union einen neuen Referenzrahmen, den International Celestial Reference Frame 3 (ICRF-3), auf ihrer Jahresversammlung in Wien beschlossen. Der Referenzrahmen ist seit dem 1. Januar 2019 weltweit gültig. An ihm richten sich beispielsweise GPS-Systeme aus und er ist die Grundlage für die Navigation von Weltraumsonden.

Jede Art der Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde oder im All benötigt einen Referenzrahmen. Vergleichbar mit den Längen- und Breitengraden auf dem Globus ist auch ein Gitternetz am Himmel vorstellbar. Über einen solchen Referenzrahmen ist es möglich, mit Bezug zur Erdoberfläche die genaue Lage von Objekten am Himmel anzugeben. Für die Erstellung dieses Netzes braucht es „Ankerpunkte“ am Himmel und auf der Erde, an denen die Systeme ausgerichtet werden können. Für die Erde sind dies die etwa 50 weltweit vorhandenen Radioteleskope, für den Himmel 4536 sogenannte Quasare: Galaxien mit einem Schwarzen Loch im Zentrum.

Über die vergangenen 40 Jahre hinweg bestimmten die auf allen Kontinenten positionierten Radioteleskope mittels der Very Long Baseline Interferometry (VLBI, zu Deutsch: Radiointerferometrie auf langen Basislinien) die Positionen der 4536 Quasare unter maßgeblicher Beteiligung der VLBI-

Arbeitsgruppe der GFZ-Sektion Geodätische Weltraumverfahren. Dazu wurden aus allen vorhandenen VLBI-Beobachtungen der vergangenen 40 Jahre die genauen Richtungen aller extragalaktischen Objekte berechnet. Zudem konnten Beobachtungsfehler in den Berechnungen, die durch die Drehung unserer Galaxie entstehen, ausgeglichen werden.

Der letzte Referenzrahmen (ICRF-2) wurde im Jahr 2010 veröffentlicht. Demgegenüber verbessert das neue System die Genauigkeiten im Mittel um etwa das 1,5-fache. Es wurden etwa 30 % mehr Objekte in die Berechnungen einbezogen und zum ersten Mal wurde die Drehbewegung der Milchstraße einberechnet. Die Ergebnisse liegen nun zudem parallel in drei verschiedenen Radio-Frequenzbändern vor, was einen breiteren Zugriff für die verschiedenen Nutzerinnen und Nutzer ermöglicht.

Anhand des neuen Himmelsreferenzrahmens lassen sich die Richtungen von Objekten auf der Himmelskugel mit einer Genauigkeit von einem Hundertstel eines Millionstel Winkelgrads bestimmen. Das entspricht der Genauigkeit von der Erde aus einen Tennisball auf der Oberfläche des Mondes erkennen zu können.

Die Quasare senden permanent Radiowellen aus, die von den Radioteleskopen auf der Erde empfangen werden können.

Da sich die Quasare extrem weit von der Erde entfernt im All befinden (etwa 100 Millionen bis 10 Milliarden Lichtjahre), können sie, obwohl sie in Bewegung sind, von der Erde aus als ortsfest angesehen werden. Damit eignen sie sich optimal als Ankerpunkte für das Referenzsystem am Himmel.

Nicht nur Systeme zur Positionsbestimmung wie das GPS oder das europäische Pendant Galileo sind auf das Referenznetz am Himmel angewiesen. Auch Veränderungen auf der Erdoberfläche, wie beispielsweise Bewegungen von Erdplatten, Vulkanausbrüche, Meeresspiegelschwankungen, Erdbeben oder Veränderungen der Orientierung der Erde im Weltraum, lassen sich darüber präzise bestimmen. So gibt es für die Erdoberfläche den International Terrestrial Reference Frame (ITRF), der Bezugspunkte auf der Erde in einem Koordinatensystem erfasst, mit dem Zentrum der Erde als Mittelpunkt. Um z. B. bestimmen zu können, ob der Meeresspiegel gestiegen oder das Land abgesunken ist, braucht der Referenzrahmen auf der Erdoberfläche einen Referenzrahmen am Himmel, zu dem er in Bezug gesetzt werden kann. Je präziser dieser himmlische Referenzrahmen, desto genauer ist auch die Überwachung von Veränderungen an der Erdoberfläche möglich. ■

## „Radiance Light Trends“ zeigt Veränderungen der Lichtemissionen weltweit



Viele wissenschaftliche Satellitendaten sind im Prinzip kostenlos verfügbar. Das bedeutet aber nicht, dass sie tatsächlich einfach der breiten Öffentlichkeit zugänglich sind. Eine neue Webanwendung soll das zumindest für Satellitenbilder der Erde bei Nacht ändern. „Radiance Light Trends“ ermöglicht es jedem mit Internetverbindung, schnell und einfach eine Region oder einen Standort auszuwählen und die dort seit 1992 von Satelliten beobachteten Entwicklungen der nächtlichen Lichtemissionen zu analysieren. Die Entwicklung der Webapplikation leitete Dr. Christopher Kyba vom GFZ. Sie wurde im Rahmen des im EU-Programm Horizon 2020 geförderten Projekts GEOEssential erstellt. Für die Programmierung war Jurij Stare von Deneb Geoinformation Solutions zuständig.

Satelliten produzieren große Mengen an Daten, die sich häufig nicht ohne weiteres herunterladen lassen. Es kann etwa einen Tag Arbeit bedeuten, wenn Laien versuchen, ohne diese Anwendung die Entwicklungen der Lichtemissionen für eine bestimmte Region zu analysieren. Neben dem Herunterladen der Daten ist für die Auswahl einer Region und deren Analyse Spezialwissen über Software für geografische Informationssysteme erforderlich. Mit „Radiance Light Trends“ ist es nun auch ohne spezielle Ausbildung möglich,

in weniger als einer Minute eine Grafik mit Lichttrends zu erstellen.

Mit der Webanwendung kann die Entwicklung der Lichtverschmutzung für nahezu jeden Standort und jede Region der Welt berechnet werden. Das Besondere daran ist: Neue Satellitendaten werden automatisch in die Datenbank eingepflegt und bei der Berechnung berücksichtigt. Das ist besonders für interessierte Bürgerinnen und Bürger, im Umweltschutz Tätige oder Medien nützlich, aber auch für Kommunalverwaltungen und Unternehmen, die Beleuchtungsmaßnahmen planen. Die Anwendung könnte auch für die Analyse von Naturgefahren und die Planung oder den Wiederaufbau von Infrastrukturen hilfreich sein.

Veränderungen in der Beleuchtung, die durch „Radiance Light Trends“ verfolgt werden können, haben unterschiedliche Ursachen. Ein Beispiel dafür ist der Tucson International Airport in Arizona in den USA, wo von August bis Oktober 2014 Hunderte Außenleuchten ausgetauscht wurden, um den Energieverbrauch und die Lichtverschmutzung zu reduzieren. Dort ist ein deutlicher Rückgang des Lichts in „Radiance Light Trends“ sichtbar. Ein weiteres Beispiel ist die Lichtemission großer Gewächshäuser, die oft vormals dunkle Bereiche erhellt. So beleuchtet beispiels-

weise ein etwa 350 km südwestlich von Moskau gelegenes Gewächshaus seit 2015 die Nacht.

Die der Anwendung zugrunde liegenden Daten stammen von zwei Satellitensystemen, die in den letzten Jahrzehnten von verschiedenen Regierungsbehörden der USA betrieben wurden. Für die Jahre 1992 bis 2013 stammen die Daten aus dem Operational Linescan System der DMSP-Satelliten (Defense Meteorological Satellite Program). Ab 2012 ist die Datenquelle das „Day/Night Band“ des Instruments Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS DNB). Für die Anzeige der Satellitendaten bei „Radiance Light Trends“ stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung: Zum Beispiel kann eine farbkodierte Projektion der Lichtmesswerte mit Jahres- oder Monatsdaten auf eine Erdkarte erstellt werden oder ein Rahmen beziehungsweise ein Polygon um ein Gebiet von Interesse gezeichnet werden, um eine Zeitreihe mit Lichtdaten für mehrere Jahre auf monatlicher Basis zu erhalten. Die Daten können zudem in verschiedenen Formaten exportiert werden. ■

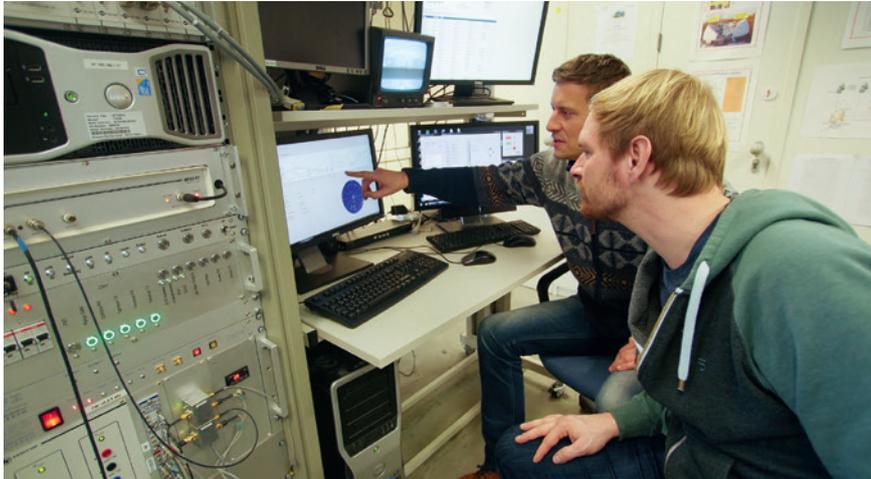
### Weitere Informationen:

Website „Radiance Light Trends“:  
[lighttrends.lightpollutionmap.info](http://lighttrends.lightpollutionmap.info)

Projekt GEOEssential:

<http://www.geoessential.eu/>

## Satellitenumlaufbahnen per Laser bestimmen



Ausgründung aus dem GFZ baut neue SLR-Messstation in Japan; GFZ-Wissenschaftler Dr.-Ing. Sven Bauer (r.) wird André Kloth von der Firma DiGOS beim Bau und Betrieb der SLR-Station in Japan unterstützen. (Foto: M. Meister, GFZ)

Die GFZ-Ausgründung DiGOS baut in den nächsten zwei Jahren eine Satelliten-Laser-Ranging (SLR)-Station für die japanische Weltraumagentur JAXA am Weltraumzentrum in Tsukuba, Japan. SLR steht dabei für die hochgenaue Messung der Entfernung zwischen einer Bodenstation und einem Satelliten mittels Laserpulsen. Aus den gewonnenen Daten werden die Umlaufbahnen von Satelliten bestimmt und auch vorhergesagt. Das GFZ betreibt auf dem Potsdamer Telegrafenberg eine eigene SLR-Station und ist damit Teil eines Netzwerks von rund 35 Stationen weltweit, die überwiegend für die Geodäsie genutzt werden.

Für den Bau der neuen japanischen SLR-Station wird das GFZ seine Expertise einbringen, insbesondere bei Fragen zu Betrieb und Wartung und der Bewertung von Designentscheidungen. Der Leiter der SLR-Station des GFZ, Dr.-Ing. Sven Bauer, wird das DiGOS-Team als Berater unterstützen, gerade auch, was die Anforderungen für den späteren täglichen Betrieb betrifft. Herzstück der neuen Station ist ein 80-Zentimeter-Spiegelteleskop mit einem leistungsstarken Laser, der bis zu 1000 Laserpulse in einer Sekunde abfeuert. Reflektoren, die an der Hülle der Ziel-Satelliten angebracht sind, strahlen das Laserlicht zurück. Der Detektor der SLR-Station ist so empfindlich, dass er sogar einzelne Lichtteilchen (Photonen) registrieren kann. Damit ist die SLR-Station

in der Lage, die Entfernung zu Satelliten mit einer Präzision bis in den Millimeterbereich zu messen. Neben der Umlaufbahnbestimmung dienen diese Daten einer ganzen Reihe von wissenschaftlichen Zwecken, z. B. der Überwachung von Erdrotationsparametern (Polbewegung und Tageslänge), von Verformungen der festen Erde, der Messung des Erdschwerefelds und nicht zuletzt der Eichung von GPS-Empfängern an Bord von Satelliten. Die japanische Station wird auf Tag- und Nachtbetrieb ausgelegt werden. Sie kann später flexibel erweitert werden, um beispielsweise Weltraumschrott zu beobachten oder einen automatischen Betrieb zu gewährleisten.

Als weiteren wissenschaftlichen Partner zusätzlich zum GFZ konnte das österreichische Institut für Weltraumforschung (IWF) in Graz gewonnen werden.

Neben dem Projekt für JAXA entwickelt DiGOS derzeit auch eine weitere „Next Generation SLR“-Bodenstation für die europäische Weltraumagentur ESA auf Teneriffa. Auf beiden Stationen wird die DiGOS SCOPE-Betriebssoftware und Steuerungshardware verwendet. Diese ist bereits seit 2012 in der SLR-Station des GFZ im Einsatz und wurde mit den dort gesammelten Erfahrungen wesentlich weiterentwickelt. ■

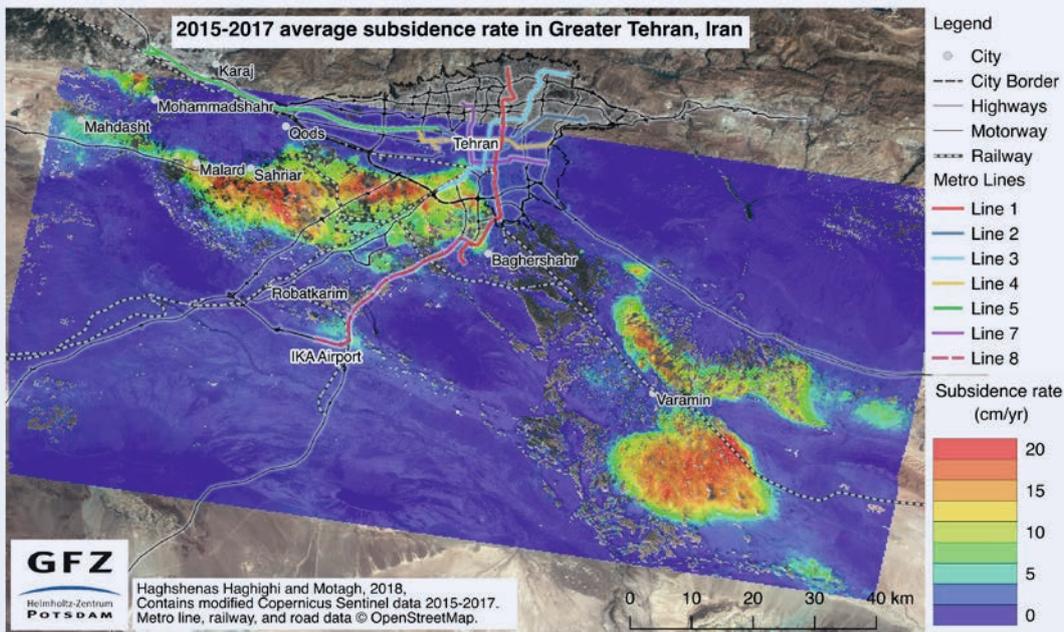
## Warum sich Teheran gefährlich absenkt

Iran hat ein Wasserproblem. Die Reserven in vielen Grundwasserbecken sind stark erschöpft. Das Land investiert seit etwa vierzig Jahren viel Geld in die Entwicklung der Landwirtschaft und strebt an, bei der Lebensmittelversorgung unabhängig zu sein. Um den erhöhten Wasserbedarf zu decken, werden in erheblichem Maß und staatlich kaum reguliert Grundwasserbecken ausgebeutet. Zudem hat die Regierung viele Staudämme errichten lassen, um Wasser für bestimmte Zwecke, insbesondere in der Landwirtschaft, zu speichern. Diese schränken jedoch den natürlichen Zufluss in die Grundwasserbecken in den stromabwärts liegenden Gebieten ein und trugen damit zu Wüstenbildung und zu ernststen Umweltproblemen bei. Dazu gehören die voranschreitende Austrocknung des Urmiasees im Nordwesten Irans, des zweitgrößten Salzsees der Welt, und häufige Staub- und Sandstürme in den vergangenen Jahren in der Provinz Khuzestan im Südwesten.

In der Region um die Hauptstadt Teheran mit ihren etwa acht Millionen Menschen nahm der Wasserbedarf außerdem durch den Zuzug vieler Einwohner in den letzten vierzig Jahren stark zu. Die Zahl der Brunnen dort stieg von knapp 4000 im Jahr 1968 auf mehr als 32 000 Wasserentnahmestellen im Jahr 2012. Hinzu kommen ausbleibender Regen in Dürreperioden, die es in den letzten Jahren immer häufiger gegeben hat. Das alles führte zu einem starken Rückgang des Grundwasserspiegels – in Teheran beispielsweise um zwölf Meter zwischen 1984 und 2011.

### Teile Teherans haben sich um mehrere Meter abgesenkt

Daraus folgt ein weiteres Problem: Der Boden über den Grundwasserbecken senkt sich. Wie groß dieser Effekt ist, berichten Mahdi Motagh und Mahmud Haghshenas Haghghi vom GFZ in einer Studie im Fachjournal *Remote Sen-*



Satellitendaten zeigen, dass eine übermäßige Entnahme von Grundwasser die iranische Hauptstadt bedroht. Abbildung: Durchschnittliche Absenkungsrate im Großraum Teheran in den Jahren 2015 bis 2017 basierend auf Daten des Sentinel-Satellitensystems. (Quelle: H. Haghghi und M. Motagh, GFZ)

ing of Environment. In Daten von vier verschiedenen Radarsatellitensystemen haben die beiden Forscher die Absenkungen der Erdoberfläche in der Region Teheran vermessen. Sie fanden heraus, dass sich dort zwischen 2003 und 2017 drei Gebiete mit Geschwindigkeiten von teils über 25 cm pro Jahr insgesamt um mehrere Meter abgesenkt haben. Die Studie zeichnet damit erstmals detailliert und mit präzisen Messungen den zeitlichen Verlauf der Absenkungen in der Region über einen längeren Zeitraum nach. Spalten im Grund und Risse in Gebäudewänden seien beispielsweise Folgen der Verformungen, sagen Haghshenas Haghghi und Motagh. Sie fanden auch heraus, dass die Grundwasserbecken in bestimmten Bereichen durch die Ausbeutung irreversibel geschädigt wurden. Sie können in Zukunft nicht mehr so viel Wasser speichern wie früher. Wissenschaftlich fundierte Pläne für die Wasserwirtschaft könnten die Situation jedoch entschärfen helfen, sagen die beiden Forscher. Für eine nachhaltige Entwicklung können Wissenschaft und Forschung die iranischen Verwaltungen und Regierungen dabei unterstützen, ihre Wasserbewirtschaftungspolitik zu überarbeiten.

### Echtzeit-Daten für Georisiken

Für ihre Analyse verwendeten die Forscher die Radarinterferometrie-Methode InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Mit diesem Messverfahren lässt sich aus von Satelliten aufgezeichneten hochpräzisen Radarsignalen im Mikrowellenbereich ein Abbild der Topografie der Erdoberfläche erstellen. Um Veränderungen der Oberfläche zu dokumentieren, nutzten die Forschenden neun Datensätze der Satellitensysteme Envisat ASAR, ALOS PALSAR, TerraSAR-X und Sentinel-1 aus den Jahren 2003 bis 2017. Sie kombinierten die Datensätze, um die kurz- und langfristigen Reaktionen der Erdoberfläche auf Veränderungen beim Grundwasserniveau zu untersuchen. Von besonderer Bedeutung waren die Satellitenbilder der Mission Sentinel-1, die seit 2014 alle 24 Tage und seit 2016 alle 12 Tage hochaufgelöste Radarbilder mit einer Kantenlänge von 250 km aus der Region Teheran liefert. Dadurch ist es möglich, Georisiken wie etwa Landabsenkungen nahezu in Echtzeit zu analysieren. Als nächstes wollen die beiden Forscher das untersuchte Gebiet erweitern und die Absenkung des Landes auch außerhalb Teherans mit Sentinel-1 messen. Solche Daten von Senkungen in großen Gebieten bringen neue Herausforderungen mit sich. Für die Analyse der

enormen Mengen an Radardaten entwickelten sie Softwaretools.

Unterstützt wurde diese Forschung durch den Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz-Gemeinschaft in der Helmholtz-Allianz „Remote Sensing and Earth System Dynamics“.

### Originalstudie:

Haghshenas Haghghi, M. & Motagh M. (2018): Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. Remote Sensing of Environment. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.003

## Wie viel Schutt liegt auf Gletschern?



Schuttbedeckter Bereich des „Mer de Glace“, dem größten Gletscher Frankreichs im Juni 2018 (Foto: CCBY-SA, D. Scherler, GFZ)

Eine sich erwärmende Erde führt dazu, dass das Volumen von Gebirgsgletschern und ihre Ausdehnung global gesehen seit Jahrzehnten abnehmen. Zeitgleich verändert sich auch die Bedeckung vieler Gletscher mit Schutt. Diese Schuttbedeckung wird bislang jedoch nur selten erfasst. Eine Studie des Wissenschaftlers Dirk Scherler vom GFZ und zweier Kollegen aus der Schweiz – einer davon bei Google angestellt – zeigt nun eine Möglichkeit, die Ausdehnung der Schuttflächen auf Gebirgsgletschern global und automatisiert per Satellitenüberwachung zu erfassen.

In ihrer Arbeit nutzten die Wissenschaftler dafür die Cloud-Computing Plattform „Google Earth Engine“. Das ist eine Web-basierte Entwicklungsumgebung und Datenbank mit Satellitenbildern aus vierzig Jahren Fernerkundung, die für Forschende frei zugänglich ist. Die Bilder für die Studie im Fachjournal *Geophysical Research Letters* stammen von den Satelliten Landsat-8 und Sentinel-2 und haben eine räumliche Auflösung von 30 x 30 bzw. 10 x 10 m pro Pixel. Die Wissen-

schaftler glichen die Bilder aus dem Weltall mit einem elektronischen Gletscherkatalog ab, dem „Randolph Glacier Inventory“, um die Bedeckung mit Schutt zu bestimmen. Dazu haben sie ein automatisches Verfahren entwickelt, das erdumspannend Pixel-für-Pixel-Vergleiche anstellt. Der Ansatz erlaubt eine schnelle Kartierung von Veränderungen in der Schuttbedeckung für jeden Zeitraum, für den Satellitenbilder verfügbar sind.

Eine manuelle Überprüfung zeigte robuste Ergebnisse. Demnach sind 4,4 % der Gletscheroberfläche in Gebirgen von Schutt bedeckt (der grönländische Eisschild und die Antarktis wurden nicht in die Betrachtung aufgenommen). Die Verteilung ist dabei ungleichmäßig: Zu den Polen hin nimmt die Schuttbedeckung ab, da die Landschaft hier eher flach ist. In steilen Gebirgsregionen, wie dem Himalaya, liegt hingegen mehr Schutt auf den Gletschern. Überdies zeigte die Studie, dass der Bedeckungsanteil bei kleineren Gletschern höher ist als bei größeren. Da die Gletscher weltweit schrumpfen, wird der Anteil der Schuttbedeckung

voraussichtlich zunehmen – und damit die Überwachung der Schuttbedeckung wichtiger werden.

Gebirgsgletscher haben eine große Bedeutung für Regionen, in die ihr Schmelzwasser fließt: Es dient als Trinkwasser, bewässert landwirtschaftliche Flächen oder treibt Turbinen an. Die Ergebnisse der Studie bilden nach Aussage der Autoren eine Grundlage für künftige Modellierungen der Effekte von Schuttbedeckung auf dem Eis, von der regionalen bis hin zur globalen Skala. ■

### Originalstudie:

Scherler, D., Wulf, H., Gorelick, N. (2018): Global Assessment of Supraglacial Debris Cover Extents. - *Geophysical Research Letters*, DOI:10.1029/2018GL080158

## Gletschersee stürzt talwärts – und Seismometer hören mit



Das Bhotekoshital in Nepal vor und nach der Sturzflut im Sunkoshifluss am 5. Juli 2016 (Fotos: K. Cook, GFZ)

Eine verheerende Wand aus Wasser wälzte sich am 5. Juli 2016 durch das Tal des Bhotekoshi/Sunkoshiflusses in Nepal. Sie kam aus einem See, der von einer Gletschermoräne gestaut wurde. Der natürliche Damm brach und mehr als 100 000 t Wasser stürzten auf einmal talwärts. Ein internationales Team von Forschenden hat dieses Ereignis mit Seismometern aufgezeichnet. Die Erdbebenmessgeräte waren nach dem katastrophalen Ghorka-Beben im April 2015 installiert worden. Es ist das erste Mal, dass so eine Sturzflut mit Seismometern in so hoher Auflösung aufgezeichnet wurde. In einer Studie, die in *Science* veröffentlicht wurde, schreiben die Autorinnen und Autoren, dass derartig massive Hochwasserereignisse die Erosionsraten stärker beeinflussen als die jährlichen Monsunregenfälle. Der Grund ist, dass die Wassermassen große Felsblöcke und grobe Sedimente mobilisieren, die normalerweise das Flussbett schützen. Während der Monsunzeit werden dagegen nur feinere Sedimente und Kieselsteine stromabwärts transportiert – nicht genug, um Erdrutsche und massive Erosion auszulösen. Die Erosionsraten können stark von nicht-klimatologischen Faktoren wie Erdbeben beeinflusst werden. Hinzu kommen klimatische Faktoren, die die Größe und Verteilung der Gletscherseen beeinflussen.

Kristen Cook vom GFZ, Erstautorin der Studie, besuchte das Tal vor und nach der Flut. Mehrere glückliche Umstände begleiteten das Ereignis: Die Überschwemmung ereignete sich am Abend, als die Menschen zu Hause waren, aber noch nicht schliefen. Es war so stark, dass es den Boden erzittern ließ, sagt Kristen Cook.

Sie unterhielt sich mit zwei Schäfern, die gespürt und gehört hatten, wie sich die Flut näherte. Der jüngere erzählte ihr, dass er an ein Erdbeben gedacht hatte, aber sein älterer Begleiter erinnerte sich an eine Flut von 1981 und warnte ihn. Beide kletterten vom Fluss weg und überlebten. Andere Menschen reagierten ähnlich und flohen rechtzeitig, so dass niemand verletzt wurde. Es gab jedoch erhebliche Schäden an der Infrastruktur. Die Forschenden hatten zudem Glück, bereits vor dem Hochwasserereignis Seismometer im Tal eingesetzt zu haben. Die Erschütterungen wurden daher von einem ganzen Netz aus seismischen Stationen registriert. Dies ist das erste Mal, dass Seismometer einen Gletscherseeausbruch mit solch hoher Auflösung aufgezeichnet haben. Die Verwendung von seismischen Daten zur Untersuchung von Überschwemmungen ist eine neue Technik, mit der Forschende Faktoren erkennen, die mit der herkömmlichen Flussüberwachung nicht beobachtet werden können. Zwei unterschiedliche Impulse konnten identifiziert werden. Der erste kam von der Wasserwand, der zweite nur Minuten später vom Gestein und vom groben Sediment im Wasser. Letzteres verursachte den größten Schaden. Brücken wurden ebenso zerstört wie Wasserkraftwerke und Straßen. In der Folgezeit kam es zu einer Reihe von Erdrutschen, weil die Flussufer destabilisiert worden waren.

Da es viele Gletscherseen im Himalaya und anderen Gebirgszügen weltweit gibt, die entweder vom Eis oder von Moränen gestaut sind, sind die Erkenntnisse des Teams von großer Bedeutung. Um Erosionsraten und das Risiko von Erdrutschen zu berechnen, müssen Faktoren wie Erdbe-

ben, schmelzende Gletscher, Lufttemperatur und die Speisung von Gletscherseen berücksichtigt werden. Die Situation wird noch komplizierter: Auch wenn die Hochwasserhäufigkeit mit dem Niederschlag in Verbindung gebracht werden kann, wird der Zusammenhang zwischen Erosion und Niederschlag nichtlinear werden, schlussfolgern die Autoren. Der Klimawandel mit steigenden Temperaturen kann die Situation verschlimmern und das Risiko für die Menschen in erdbebengefährdeten Bergregionen erhöhen.

### Originalstudie:

Cook, K., Andermann, C., Gimbert, F., Raj Adhikari, B., Hovius, N. (2018): Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. – *Science*, Vol. 362, Issue 6410, pp. 53-57. DOI: 10.1126/science.aat4981

### Video mit dem seismischen „Geräusch“ der Sturzflut:

[https://media.gfz-potsdam.de/gfz/wv/pm/18/10778\\_Das-seismische-Geraeusch-einer-Sturzflut\\_GFZ.mp4](https://media.gfz-potsdam.de/gfz/wv/pm/18/10778_Das-seismische-Geraeusch-einer-Sturzflut_GFZ.mp4)

## Erdbeben in Superzeitlupe



Istanbul und im Hintergrund die Prinzeninseln, auf denen sich das Bohrlochobservatorium GONAF befindet (Foto: M. Bohnhoff, GFZ)

Südlich von Istanbul ist es im Sommer 2016 zu einem großen Erdbeben gekommen, das allerdings so langsam vonstattenging, dass niemand es bemerkte. Die Deformation in der Erdkruste zog sich über mehr als 50 Tage hin, bei normalen Erdbeben passiert dies innerhalb von Sekunden. Erst eine neu entwickelte Methode zur Auswertung von Daten aus Deformationsmessgeräten in Bohrlöchern durch Forschende des GFZ in Zusammenarbeit mit dem türkischen Katastrophenschutz (AFAD) und dem UNAVCO-Institut aus den USA zeigte das ultra-langsame Beben unterhalb des Marmarameers. Das Team unter der Leitung von Dr. Patricia Martínez-Garzón vom GFZ berichtet darüber in der Fachzeitschrift *Earth and Planetary Science Letters*.

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Nordwesttürkei an der nordanatolischen Verwerfung. Diese geologische Bruchzone trennt Eurasien und die Anatolische Platte und ist eine der großen tektonischen Plattengrenzen, an der es immer wieder zu zerstörerischen Erdbeben mit einer großen Anzahl von Opfern kommt. Das letzte schwere Erdbeben ereignete sich 1999 bei Izmit und forderte fast 20 000 Tote. Ein Teil der Verwerfung, die unmittelbar südlich der dicht besiedelten Megacity Istanbul verläuft, wird derzeit als „seismische Lücke“ identifiziert und ist damit für ein großes Erdbeben überfällig. Die tektonische Belastung durch die Bewegung der Erdkrustenplatten ist kontinuierlich. Das

baut gewissermaßen täglich elastische Energie entlang von Verwerfungen auf. Die Freisetzung der gespeicherten Energie erfolgt entweder seismisch – in Form von Erdbeben – oder aseismisch, durch langsames Verformungskriechen in der Tiefe. Das Verständnis der Wechselwirkung zwischen beiden Phänomenen ist von entscheidender Bedeutung, um die Erdbebengefährdung und das daraus resultierende seismische Risiko in städtischen Gebieten zu bestimmen.

In ihrer aktuellen Studie berichten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über ein sich über fast zwei Monate hinziehendes, ultra-langsameres Erdbeben, das südlich von Istanbul unterhalb des Marmarameers in Verbindung mit erhöhter schwach spürbarer Erdbebenaktivität in geringer Tiefe in der Region auftrat. Die Forschenden untersuchten die Krustenverformungsdaten aus Instrumenten in Bohrlöchern, die im Rahmen des GONAF Plate Boundary Observatory (<http://www.gonaf-network.org/>) rund um das östliche Marmarameer installiert sind.

Die Daten einer der Bohrloch-Messstationen im seismisch aktivsten Teil des Gebiets auf der Armutlu-Halbinsel wurden mit neuartigen Computertechniken verarbeitet. Dadurch konnte das langsame Kriechsignal identifiziert werden, das innerhalb der Erdkruste auftrat und die gleiche Größe hat wie das größte jemals

gesehene derartige Signal, das entlang der San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien auftrat. Während dieses aseismischen langsamen Verformungssignals reagierte der flachere und vermutlich vollständig verhakte Teil der Erdkruste mit der höchsten Rate von moderaten Erdbeben seit Jahren. Das weist auf eine Wechselwirkung zwischen oberflächennaher und tiefer Deformation der Erdkruste hin. Wie diese Interaktion funktioniert, muss noch im Detail erforscht werden. Auf jeden Fall ermöglichen die Ergebnisse, das regionale seismische Risiko besser zu verstehen und zu quantifizieren, insbesondere für die 15-Millionen-Metropole Istanbul im Hinblick auf das bevorstehende Starkbeben.

GONAF ist Teil des GFZ-Plattenrand-Observatoriums in der Region Istanbul und wurde von deutschen, türkischen und US-amerikanischen Behörden sowie vom International Continental Scientific Drilling Programme ICDP mit Sitz am GFZ kofinanziert. ■

### Originalstudie:

Martínez-Garzón, P., Bohnhoff, M., Mencin, D., Kwiatak, G., Dresen, G., Hodgkinson, K., Nurlu, M., Kadirioglu, F. T., Kartal, R. F. (2019): Slow strain release along the eastern Marmara region offshore Istanbul in conjunction with enhanced local seismic moment release. - *Earth and Planetary Science Letters*, 510, pp. 209-218; <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.01.001>

## Tiefe Erdbeben weisen auf Aufstieg magmatischer Fluide unter dem Laacher See hin



Luftaufnahme des Laacher Sees  
(Foto: Df1paw  
([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laacher\\_See\\_-\\_Luftaufnahme.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laacher_See_-_Luftaufnahme.jpg)),  
CC BY-SA 4.0)

In der Osteifel könnten Magmen aus dem oberen Erdmantel in die mittlere und obere Erdkruste aufsteigen. Dies geht aus einer Studie des Erdbebendienstes Südwest mit dem GFZ, dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und dem Landeserdbebendienst Nordrhein-Westfalen hervor. Die Wissenschaftler präsentieren erstmals Hinweise auf von Magmabewegungen verursachte tiefe und niedrigfrequente Erdbeben unter dem Laacher-See-Vulkan. Allerdings gibt es keine Anzeichen für eine aktuell bevorstehende vulkanische Aktivität, wie die Forscher im *Geophysical Journal International* berichten.

Die festgestellten Erdbeben werden in großen Tiefen erzeugt und zeichnen sich durch ungewöhnlich niedrige Schwingfrequenzen aus. Ihre Stärke liegt unterhalb der Grenze der menschlichen Wahrnehmung. Die Wissenschaftler sprechen von „Deep-Low-Frequency-“ (DLF-) Erdbeben. Sie werden in einer Tiefe zwischen 10 und über 40 km erzeugt, das heißt in der Erdkruste und im oberen Erdmantel. Ihre dominanten Schwingfrequenzen liegen zwischen einem und 10 Hz, und damit deutlich niedriger im Vergleich zu tektonischen Erdbeben vergleichbarer Stärke.

DLF-Erdbeben gelten weltweit als Hinweis auf die Bewegung magmatischer Fluide in großer Tiefe. Unter aktiven Vulkanen, beispielsweise auf Island, in Japan oder Kamtschatka, lassen sich solche Erdbeben regelmäßig beobachten. Die Ergebnisse der Studie in der Osteifel legen nahe, dass unter dem Laacher-See-Vulkan magmatische Fluide aus dem oberen Erdmantel in die Erdkruste aufsteigen könnten. Dies lässt sich als Hinweis darauf auffassen,

dass Magmenkammern in der Erdkruste unterhalb des Laacher Sees existieren und sich langsam füllen könnten. In ihrer Studie ermittelten die Forscher von KIT, GFZ, Erdbebendienst Südwest – dem Verbund der Landeserdbebendienste Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg –, und Landeserdbebendienst Nordrhein-Westfalen, dass diese Erdbeben in der Osteifel episodisch in zeitlich und räumlich eng begrenzten Gruppen auftreten und sich etwa entlang einer Linie von 10 bis 45 km Tiefe aufreihen. Daraus schließen die Wissenschaftler, dass im Bereich des Laacher Sees Fluide und Magmen, das heißt aufgeschmolzenes Gestein, aus dem oberen Erdmantel in die mittlere und obere Erdkruste aufsteigen könnten.

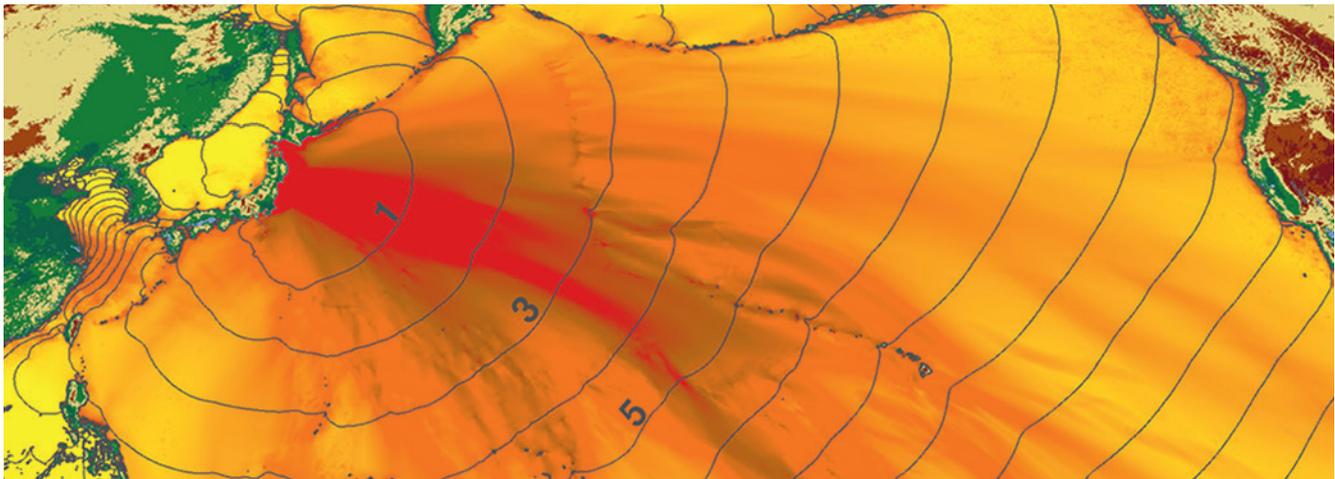
Dank eines umfangreichen Ausbaus der seismologischen Messnetze in Rheinland-Pfalz und den angrenzenden Gebieten ließen sich 2013 erstmals tiefe und tieffrequente Erdbeben unter der Osteifel registrieren. Insgesamt wurden in den vergangenen fünf Jahren vier räumlich eng begrenzte Gruppen solcher DLF-Erdbeben in der Osteifel nachgewiesen. Die Bebengruppen sind vom Laacher See aus steil nach unten in Richtung Südosten abfallend angeordnet. Neben der räumlichen Trennung ist auch das zeitliche Auftreten der DLF-Erdbeben scharf begrenzt: Bis jetzt haben die Experten acht Episoden von DLF-Erdbeben zwischen 40 Sekunden und acht Minuten Dauer beobachtet. Allerdings werten die Forscher die beobachteten DLF-Erdbeben nicht als unmittelbares Vorläufersignal einer aktuell bevorstehenden vulkanischen Aktivität. Der Aufstieg von Magma in die flache Erdkruste geht in aller Regel mit hochfrequenten Erdbebenschwär-

men einher. Eine solche Aktivität war in der Osteifel bis jetzt nicht zu beobachten. Außerdem fehlen Hinweise auf Hebungen der Erdoberfläche, die bei massiven Magmenaufstiegen deutlich feststellbar sein müssten. Datierungen der beim letzten Ausbruch vor 12 900 Jahren geförderten Magmen zeigen, dass Befüllung und Differenzierung der oberen Magmenkammer unter dem Laacher See etwa 30 000 Jahre gedauert haben könnten, bevor es zum eigentlichen Ausbruch kam. Das bedeutet, dass die magmatischen Prozesse sich über extrem lange Zeiträume hinziehen, bevor es zu einer Eruption kommt. Da die technischen Voraussetzungen zur Detektion und Lokalisierung von DLF-Erdbeben in der Osteifel erst seit einigen Jahren eine ausreichende Qualität erreicht haben, lässt sich rückwirkend nicht feststellen, seit wann DLF-Erdbeben im Bereich des Laacher Sees auftreten. Anzunehmen ist, dass dies bereits vor 2013 der Fall war. Nach der ersten Beobachtung tiefer Erdbeben im Jahr 2013 installierten GFZ, KIT und Erdbebendienst Südwest zusätzlich ein seismologisches Forschungsmessnetzwerk. Die gemeinsame Nutzung der seismischen Registrierungen erlaubt nun die detaillierte wissenschaftliche Analyse der Mikroseismizität.

Um die Zusammenhänge zwischen den DLF-Erdbeben und möglicher magmatischer Aktivität unter der Osteifel besser untersuchen zu können, empfehlen die Forscher eine Intensivierung der geochemischen Überwachung zur Analyse austretender Gase sowie wiederholte geodätische Messungen zur Feststellung möglicher Deformationen der Erdoberfläche. Ebenso sollten gezielte geophysikalische Untersuchungen zur Abbildung und Charakterisierung möglicher Magmareservoire unter der Laacher-See-Region vorgenommen werden. Weiterhin raten die Wissenschaftler zu einer Neubewertung der vulkanischen Gefährdung der Eifel. ■

**Originalstudie:** Hensch, M., Dahm, T., Ritter, J., Heimann, S., Schmidt, B., Stange, S., Lehmann, K. (2019): Deep low-frequency earthquakes reveal ongoing magmatic recharge beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany). - *Geophysical Journal International*. DOI: 10.1093/gji/ggy532

## Erdbebenwellen können Vulkane auch dämpfen



Wellenhöhen und Isochronen des Tsunami vor Japans Küste 2011 (Abb.: A. Babeyko, GFZ)

Erdbeben und vulkanische Aktivität hängen auf komplexe Weise miteinander zusammen: Es gibt eine Reihe von Belegen dafür, dass große Erdbeben vulkanische Aktivität auslösen, aber es gibt auch Beispiele für den gegenteiligen Effekt, also für vulkanische Aktivität gedämpft infolge eines Erdbebens. So führte das Beben der Magnitude 9 von Tōhoku im Jahr 2011, das einen verheerenden Tsunami und die Reaktorkatastrophe in Fukushima verursacht hatte, nicht nur zur Aktivitätsauslösung an manchen Vulkanen, sondern auch zu einer Landabsenkung bei einigen anderen vulkanischen Gebieten. Eigentlich würde man eine Hebung des Bodens erwarten, da man annimmt, dass ein solches Erdbeben den Druck des Magmas im Untergrund erhöht. Doch stattdessen passierte das Gegenteil.

Welcher Mechanismus könnte gleichzeitig diese unterschiedlichen vulkanischen Reaktionen auf Erdbeben erklären? Ein Team von Forschenden aus Japan, Deutschland, Italien und den USA, das von einem japanisch-deutschen Austauschprogramm finanziert wird, hat den Resonanzeffekt von Vulkangebirgen beim Durchlauf seismischer Wellen simuliert und dabei eine Erklärung für die paradoxen Effekte gefunden. Die Arbeit wurde online in der Fachzeitschrift *Geology* veröffentlicht.

Vulkane bilden häufig Berge oder Bergketten. Diese können während eines Erdbebens ähnlich wie ein Wolkenkratzer ins Schwingen kommen. In einem Labor

des GFZ simulierten die Forschenden solche Schwingungen eines Vulkanbergs. Sie schufen einen Miniaturvulkan aus Gelatine, spritzten Wasser und Luft in unterschiedlichen Anteilen hinein und platzierten ihn auf einem Rütteltisch. Das Rütteln führte dazu, dass ein Teil des Gelatine-Vulkans anfangs zu oszillieren. In der Gelatine entstanden Zonen der Verdichtung (Kompression) und der Entspannung (Dilatation). Eine mit Polarisationsfiltern bestückte Kamera hielt das Geschehen fest. Die Kompressionen und Dilatationen drückten die Fluide im Minivulkan in alle Richtungen, je nach Eigenschaft der Flüssigkeit. Gasreiche Flüssigkeiten, die in geringer Tiefe gelagert wurden, stiegen auf, während dichtere Flüssigkeiten abwärts sanken oder seitlich wanderten. Diese Bewegungen erfolgten etwa hundertmal schneller als ohne Schütteln.

Diese Experimente können sowohl anregende als auch dämpfende Auswirkungen erklären, weil Flüssigkeiten je nach Gasanteil und Eigenschaften nach oben oder unten wandern. Die Fluidmigration ist am effizientesten, wenn die Schwingungsfrequenz nahe an der Resonanzfrequenz des Berges liegt. Die Resonanzfrequenz für einen 30 km breiten vulkanischen Bereich, beispielsweise dort, wo eine Absenkung beobachtet wurde, beträgt  $\sim 0,07$  Hertz. Nur große Erdbeben, bei denen ein Bruch entlang etwa 100 km langer geologischer Störungszonen auftritt, können bei so niedrigen Frequenzen zu Resonanzschwingungen führen. Dies passt

zu der Beobachtung, dass große Erdbeben am wirksamsten sind, um vulkanische Aktivität auszulösen. Manchmal sind die Auswirkungen eines Bebens größer als Magnitude 8 sogar bei Vulkanen weltweit zu bemerken. Resonanzschwingungen von Vulkanen können daher wohl Prozesse im Inneren der Vulkane verstärken und deren Wirkung beschleunigen – manchmal mit einer Erhöhung des Drucks, manchmal mit einer Verminderung. ■

### Originalstudie:

Namiki, A., Rivalta, E., Woith, H., Willey, T., Parolai, S., Walter, T.R. (2018): Volcanic activities triggered or inhibited by resonance of volcanic edifices to large earthquakes. - *Geology*. DOI: [10.1130/G45323.1](https://doi.org/10.1130/G45323.1)

## Spurensuche eines extremen Klimawandels



Aus den Baumringen in diesen fossilen Kiefern haben die Forscherinnen und Forscher wertvolle Informationen über den plötzlichen Kälteeinbruch vor rund 12 000 Jahren gewonnen. (Foto: C. Miramont, Universität Aix-Marseille)

Die Reste eines in Schwemmland begrabenen Kiefernwalds am Fuße des Mont Saint Genis in Südfrankreich enthalten aufschlussreiche Informationen über einen drastischen Klimawandel. Die Kiefern begannen ihr Wachstum vor rund 12 900 Jahren während der relativ warmen Allerød-Zeit. Das fossile Holz dokumentiert den Kälteeinbruch der „Jüngeren Dryas“. Forschende des GFZ haben gemeinsam mit internationalen Kolleginnen und Kollegen jetzt erstmals klassische Baumringdickenmessungen mit Analysen der stabilen Isotope von Kohlenstoff und Sauerstoff der Baumjahre verknüpft. Sie rekonstruierten damit in jährlicher Zeitauflösung das lokale Bodenwasser (Niederschlag) und die relative Luftfeuchtigkeit. Daraus ergaben sich völlig neue Einblicke in die hydrologische Variabilität und Änderungen der atmosphärischen Zirkulation während dieses abrupten Klimawandels. Das Team berichtet darüber im Fachjournal *Scientific Reports*.

Der plötzliche Kälteeinbruch auf der Nordhalbkugel zwischen 12 700 und 11 600 Jahren vor heute ist hauptsächlich aus grönländischen Eisbohrkernen und mitteleuropäischen Seesedimenten bekannt. Er wurde nach der Weißen Silberwurz (lat.: *Dryas octopetala*) benannt – eine Pflanze der Arktis, die sich wieder ausgebreitet hatte. Der Fund der fossilen Kiefern in einem südfranzösischen Flusstal nahe Avignon schließt nun eine wichtige Lücke, denn

er zeigt, wie sich das Klima in dieser Zeit im Mittelmeerraum änderte. Mit genauen Radiokohlenstoff-Datierungen konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nachweisen, dass die begrabenen Kiefern in der warmen Allerød-Zeit vor der Jüngeren Dryas aufgewachsen waren und den plötzlichen Kälteeinbruch für einige Jahrzehnte überlebt hatten. Sie wurden damit Zeugen dieses Klimawandels.

In ihren Analysen fanden die Forschenden Anzeichen für einen vermehrten Luftmassentransport vom Atlantik. Überraschend war, dass schon etwa sechzig Jahre vor dem eigentlichen Klimawechsel eine deutliche Veränderung der Niederschlagsquelle zu erkennen war. Den Ergebnissen zufolge nahmen feuchte Luftmassen aus dem Atlantikraum zu und Niederschläge aus dem Mittelmeerraum ab. Zu sehen ist diese Veränderung in einer zunehmenden Variabilität der Sauerstoffisotope des Bodenwassers. Isotope sind Atome mit einer unterschiedlichen Anzahl von Neutronen im Kern. Aus den Verhältnissen von leichten und schweren Isotopen lassen sich Rückschlüsse auf die Herkunft von Luftmassen und damit Niederschlägen ziehen. Besonders markant ist auch die Zunahme extremer polarer Luftvorstöße, Winterniederschläge und Winterstürme zu Beginn der Jüngeren Dryas. Diese Studie belegt, dass nicht die Änderung der Mitteltemperaturen problematisch war, sondern dass der Stress für die Umwelt, der vermutlich auch zum Absterben

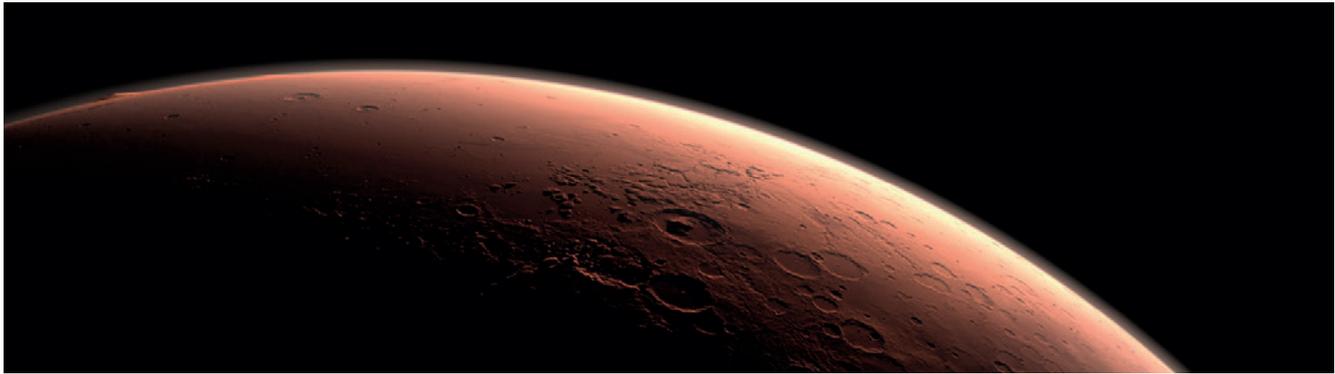
der Bäume geführt hat, durch die Häufung von extremen Witterungsbedingungen in einzelnen Jahren oder Dekaden ausgelöst wurde. Generell zeigt diese Studie, dass Zeiten von starkem Klimawandel mit einer größeren Instabilität der atmosphärischen Zirkulation einhergehen können, die zu einer stärkeren Variabilität von Jahr zu Jahr oder Dekaden führt. An diesem Beispiel zeigt die Paläoklimaforschung, wie sie Wissenslücken mit Informationen aus natürlichen Klimaarchiven schließen kann. Das ist auch deshalb wichtig, weil Erfahrungswerte darüber fehlen, was genau während eines plötzlichen Klimawandels geschieht, wie schnell sich das Klima verändern kann und welche regionalen Unterschiede auftreten.

Die Studie wurde durch das DFG-Projekt HE 3089/9-1 gefördert und von der Helmholtz REKLIM-Initiative unterstützt. ■

### Originalstudie:

Pauly, M., Helle, G., Miramont, C., Büntgen, U., Treydte, K., Reinig, F., Guibal, F., Sivan, O., Heinrich, I., Riedel, F., Kromer, B., Balanzategui, D., Wacker, L., Sookdeo, A., Brauer, A. (2018): Subfossil trees suggest enhanced Mediterranean hydroclimate variability at the onset of the Younger Dryas, - *Scientific Reports*, 8, 13980 (SREP-18-03033-T) [www.nature.com/articles/s41598-018-32251-2](http://www.nature.com/articles/s41598-018-32251-2)

## Natürliche „Batterien“ machten Mars organisch



Am Computer erzeugtes Bild des Mars zwischen Dunkelheit und Tageslicht, Quelle: <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA14293>

Hinweise auf organisches Material auf dem Mars sorgen immer wieder für Euphorie bei Forschenden wie wissenschaftsbegeisterten Laien. Vielleicht, so die Hoffnung, könnten sich mit den Spuren auch die Indizien für Leben auf dem Mars verdichten. Ein internationales Team von Forschenden unter der Führung von Andrew Steele von der Carnegie Institution of Washington in Washington D.C., an dem Liane G. Benning vom GFZ, sowie Richard Wirth und Anja Schreiber aus Bennings Gruppe beteiligt waren, hat untersucht, woher der organische Kohlenstoff in drei Marsmeteoriten stammt. Die Forschenden vermuten, dass der Kohlenstoff durch elektrochemische Reaktionen zwischen vulkanischen Mineralien und salzhaltigen Flüssigkeiten entstanden ist. Das berichten sie in einer Studie im Fachjournal *Science Advances*. Sie schreiben von einem möglichen „Paradigmenwechsel“ bei der Suche nach Leben auf anderen Planeten und der Erklärung von Evolutionsprozessen auf der Erde.

Organische Kohlenstoffverbindungen umfassen bis auf einige wenige Ausnahmen die Verbindungen von Kohlenstoff mit sich selbst oder anderen Elementen wie Wasserstoff. Sie gelten als Grundbausteine für die Prozesse des Lebens, wie wir es kennen, und können durch biologische Prozesse, aber auch durch unbelebte chemische Vorgänge entstehen. Wie die in den drei Marsmeteoriten namens Tissint, Nakhla und NWA 1950 gefundenen Anteile an organischen Kohlenstoffen entstanden sind, versuchte das Team mit modernen elektronenmikroskopischen, spektroskopischen, spektrometrischen und Röntgen-Untersuchungen zu

enthüllen. Ihre Hypothese: Ähnlich wie bei einer Batterie entstand auf dem Mars beim Aufeinandertreffen von metallhaltigem Material aus mineralischem Vulkangestein mit einer Salzlösung eine elektrische Spannung. Die Energie aus diesem „galvanischen“ Prozess genügte, um in einer mehrstufigen chemischen Reaktion die vorgefundenen organischen Kohlenstoffverbindungen entstehen zu lassen.

Die Ergebnisse gründen auf Forschungsarbeiten aus dem Jahr 2012, als Steele und sein Team belegen konnten, dass der organische Kohlenstoff in den Meteoriten tatsächlich vom Mars stammt und nicht aus einer Verunreinigung auf der Erde. Sie fanden damals auch heraus, dass der Kohlenstoff nicht biologischen Ursprungs ist. Die nun veröffentlichte Studie zielte darauf ab, festzustellen, woher der organische Kohlenstoff stattdessen kommt. Dass die Natur offensichtlich genügend Energie für den beschriebenen Prozess liefert, hat große Bedeutung für die Forschung im Bereich der Astrobiologie. Ein Fund von organischem Material muss demnach nicht zwingend ein Hinweis auf Leben sein. Prinzipiell sei der beschriebene Vorgang überall möglich, wo vulkanisches Material mit salzhaltigen Flüssigkeiten in Verbindung tritt. Beispielsweise könnten sich ähnliche Vorgänge auch auf der Erde oder den Saturn- und Jupitermonden Enceladus und Europa abgespielt haben. Auch für auf dem Mars beobachtete Naturphänomene, wie das Auftreten von Methan in dessen Atmosphäre oder das vom Curiosity-Rover in Gesteinsproben gefundene widerstandsfähige organische

Material, sind die neuen Erkenntnisse von Belang. Die Ergebnisse der aktuellen Analysen an Marsmeteoriten auf der Erde stimmen nämlich mit dem überein, was der Roverroboter auf der Oberfläche des „roten Planeten“ vor Ort fand. Erst die „leistungsfähige Kombination von Roboter- und Laboranalysen“ habe zur Entwicklung ihrer Hypothese führen können, schreiben die Forschenden. Benning und ihre Kolleginnen und Kollegen wollen diese nun durch eine spezifische roboterassistierte Untersuchung an vom Mars zurückgebrachten Proben und anschließende Laborexperimente überprüfen.

Die Forschenden haben ihre Studie Erik Hauri von der Carnegie Institution gewidmet, der an der Arbeit mitgewirkt hat und im September verstarb. 2008 war der Geochemiker Hauri an der Entdeckung von Spuren von Wasser auf dem Mond beteiligt. 2011 konnte er zeigen, dass der Erdtrabant wesentlich größere Mengen an Wasser beherbergt als man bis dahin angenommen hatte. Das warf weitreichende Fragen zur Entstehungstheorie des Mondes und von Planeten wie der Erde auf. ■

### Originalstudie:

Steele, A., Benning, L. G., Wirth R., Siljeström, S., Fries, M.D., Hauri, E., Conrad, P.G., Rogers, K., Eigenbrode, J., Schreiber, A., Needham, A., Wang, J.H., McCubbin, F.M., Kilcoyne D. and Rodriguez Blanco, J.D. (2018): Organic synthesis on Mars by electrochemical reduction of CO<sub>2</sub>. - *Science Advances*. DOI: [10.1126/sciadv.aat5118](https://doi.org/10.1126/sciadv.aat5118) <https://dx.doi.org/10.1126/sciadv.aat5118>

## Geothermisches Niedertemperatur-Demonstrationskraftwerk an indonesische Partner übergeben



*Geothermisches Niedertemperatur-Demonstrationskraftwerk*

Niedertemperatur-Kraftwerke können erheblich zu einer effizienteren Nutzung der geothermischen Ressourcen in Indonesien beitragen. Sie eignen sich aufgrund der vergleichsweise geringen Baugrößen und der Möglichkeit zur automatischen Betriebsführung auch für die elektrische Versorgung netzferner Gebiete. Am 21. Januar 2019 ist das vom GFZ in Nord-Sulawesi, Indonesien, errichtete geothermische Nie-

dertemperatur-Demonstrationskraftwerk (GeNie) an das zukünftige indonesische Betreiberkonsortium übergeben worden. Bislang wird in Indonesien, abgesehen von der Demonstrationsanlage, nur an einem weiteren Geothermiestandort auf Niedertemperatur-Kraftwerkstechnik zurückgegriffen.

Das Demonstrationskraftwerk nutzt einen Teil des am Geothermiefeld Lahendong geförderten geothermischen Dampf-Wasser-Gemisches, um über einen separaten Kraftwerkskreislauf Strom zu erzeugen. Durch einen Heißwasserzwischenkreis ist es möglich, sowohl Wärme von reiner Flüssigkeit als auch von Zweiphasengemischen zu verstromen. Basierend auf einer Projektförderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und in enger Zusammenarbeit mit den indonesischen Partnern BPPT (Agency for the Assessment and Application of Technology) und PGE (Pertamina Geothermal Energy) haben GFZ-Ingenieurwissenschaftler seit 2014 Konzeptentwicklung, Planung, Bau und Inbetriebnahme des Demonstrationskraftwerks geleitet. Indonesische und deutsche Firmen haben maßgeblich an diesem Prozess mitgewirkt. Hier sind insbesondere die Firmen PT Intan Kalorindo, Dürr Cyplan Ltd., EDL Anlagenbau GmbH sowie Güntner GmbH/PT Guntner Indonesia zu nennen. Im September 2017 begann schließlich der Forschungs- und Testbetrieb. ■

## Grundsteinlegung für Laborneubau



*GFZ-Vorstandssprecher Prof. Reinhard Hüttel, die Architektin Katja Döpke und Architekt Alexander Gyalokay vom Büro Heinle, Wischer und Partner, GFZ-Kuratoriumsvorsitzender Dr. Karl Eugen Huthmacher, MinDir a.D., und GFZ-Forscher Prof. Dirk Wagner (v.l.n.r.) mit der Zeitkapsel für den Grundstein (Foto: E. Gantz, GFZ)*

Der Grundstein für das „GeoBioLab“ ist gelegt. Am Donnerstag, 8. November 2018, hat das GFZ den Baubeginn für ein neues Laborgebäude mit einem Festakt gefeiert. Das „Helmholtz-Labor für integrierte geowissenschaftlich-biologische Forschung“ (GeoBioLab) wird in erster Linie der Erforschung der tiefen Biosphäre und der

Wechselwirkungen der Biosphäre mit der Geosphäre und dem Klima dienen. Der Neubau wird ebenfalls Platz für einen Serverraum bieten. Der Bau bildet den Abschluss des Neubaukomplexes des GFZ mit den Häusern B bis G, indem er in unmittelbare Nachbarschaft an das Haus B gesetzt wird. Die Bruttogrundfläche beträgt gut 3800 qm, davon sind 1439 qm Hauptnutzfläche, also Labore und Büros. Die Baukosten werden auf rund 13 Millionen Euro veranschlagt. Die Fertigstellung ist im Dezember 2020 vorgesehen. Das sehr moderne Gebäude und die Haustechnik werden die Kriterien der Silber-Zertifizierung nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) erfüllen. Es wurde vom Architekturbüro Heinle, Wischer und Partner entworfen.

Hauptnutzer des Gebäudes werden die beiden Sektionen Geomikrobiologie (Leitung: Prof. Dirk Wagner) und Grenzflächen-Geochemie (Leitung: Prof. Liane G. Benning) sein. Erst seit rund 20 Jahren wisse man, dass tausende Meter unter dem Boden eine florierende Gemeinschaft von Mikroorga-

nismen lebe, sagte Dirk Wagner anlässlich der Grundsteinlegung: „Wir gehen davon aus, dass die Biomasse in den obersten drei Kilometern der Erdkruste ungefähr genauso groß ist wie die gesamte Biomasse auf der Erdoberfläche.“ Das Leben in der tiefen Biosphäre hat Auswirkungen auf wichtige Prozesse, beispielsweise bei der Bildung und Zersetzung von Methan in und unter Permafrostböden.

Der Wissenschaftliche Vorstand und Vorstandssprecher des GFZ, Prof. Reinhard Hüttel, betonte bei der Grundsteinlegung, wie wichtig es sei, die Erde als System zu betrachten und die Wechselwirkungen mit vielen Disziplinen gemeinsam zu erforschen. Reinhard Hüttel nutzte die Gelegenheit auch, sich beim scheidenden Vorsitzenden des GFZ-Kuratoriums, Dr. Karl-Eugen Huthmacher zu bedanken. Der frühere Abteilungsleiter im Bundesministerium für Bildung und Forschung gibt mit seinem altersbedingten Ausscheiden aus dem BMBF auch den Kuratoriumsvorsitz am GFZ auf, den er seit 2010 innehatte. ■

## Bundesministerin Karliczek und Landesministerin Münch auf dem Telegrafenberg



Bundesministerin Anja Karliczek wird von Prof. Reinhard Hüttl bei ihrem Besuch auf dem Telegrafenberg begrüßt (Foto: Thomas Spiekermann/GFZ)

„Dies ist ein Ort der sprechenden Wissenschaft!“ Mit diesen Worten lobte Bundesforschungsministerin Anja Karliczek den Wissenschaftspark Albert Einstein auf dem Potsdamer Telegrafenberg bei ihrem Antrittsbesuch im Land Brandenburg am 20. März 2019. Die Bundesministerin war gemeinsam mit ihrer Gastgeberin, der brandenburgischen Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kultur Martina Münch wäh-

rend des vierzehnten PhD Day des GFZ auf den Telegrafenberg gekommen. Zum PhD Day stellen die GFZ-Doktorandinnen und -Doktoranden unter anderem ihre aktuellen Forschungsprojekte vor. Die Ministerinnen konnten einen Eindruck vom FameLab-Wettbewerb gewinnen, bei dem junge Forschende in einem Vortrag von nur drei Minuten und ohne größere technische Hilfsmittel eine Jury und das Publikum begeistern

müssen. Der Regional-Vorentscheid für Berlin-Brandenburg fand mit zehn Teilnehmerinnen und Teilnehmern gemeinsam mit dem GFZ-PhD Day statt. Bundesministerin Karliczek durfte die Sieger des Wettbewerbs ehren: „Das ist Wissenschaftskommunikation vom Feinsten“, sagte sie.

Zuvor konnten die Ministerinnen im Hörsaal bereits eine gute Nachricht überbringen: Ab Juni wird das GFZ als Partner der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg im Rahmen der Initiative „Land-Innovation-Lausitz“ von einer Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) profitieren. Vision und Ziel der Initiative ist die Entwicklung der Lausitz zu einer Modellregion für die Anpassung der Landnutzung an den Klimawandel durch innovative Technologien und Anbausysteme mit einer an den Zielen der Bioökonomie ausgerichteten Wertschöpfung. Die Förderung ist Teil des BMBF-Programms „WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“. ■



Reinhard Hüttl freute sich sehr über den Besuch der Ministerinnen und die lobenden Worte: „Für uns ist es etwas ganz besonderes, Bundesministerin Anja Karliczek und Landesministerin Martina Münch an unserem PhD Day begrüßen zu dürfen. Wir hoffen, dass der Eindruck vom Telegrafenberg Lust auf weitere Besuche macht und freuen uns auf eine weiterhin erfolgreiche Zusammenarbeit.“



Brandenburgs Wissenschafts- und Forschungsministerin Martina Münch sagte: „Die Forschungseinrichtungen auf dem Potsdamer Telegrafenberg tragen maßgeblich zur internationalen Strahlkraft der herausragenden und innovativen Wissenschaftslandschaft in Potsdam und im Land Brandenburg bei. Die außerordentlich positive Entwicklung der brandenburgischen Wissenschaftslandschaft ist von unschätzbare Bedeutung für die Region.“



„Auf dem Telegrafenberg in Potsdam wird herausragende Forschung über das Universum und unsere Erde betrieben“, sagte Bundesforschungsministerin Anja Karliczek. „Heute brauchen wir diese wissenschaftlichen Erkenntnisse mehr denn je, um große gesellschaftliche Herausforderungen wie den Klimawandel bewältigen zu können.“

(Fotos: Thomas Spiekermann/GFZ)

# Ausgezeichnet

## Reinhard Hüttl ist neuer Vizepräsident der GDNÄ



**Prof. Reinhard Hüttl**, Wissenschaftlicher Vorstand des GFZ und Vorsitzender des Vorstands, übernahm zum 1. Januar 2019 das Ehrenamt des Vizepräsidenten der Gesellschaft Deutscher Naturforscher (GDNÄ). Die Mitgliederversammlung der GDNÄ hatte Reinhard Hüttl bereits im Dezember 2018 in Saarbrücken zu ihrem Vizepräsidenten gewählt.

Gegründet im Jahre 1822 ist die GDNÄ Deutschlands älteste interdisziplinäre wissenschaftliche Gesellschaft. Sie ist die einzige wissenschaftliche Gesellschaft in Deutschland, die neben Expertinnen und Experten auch Schülerinnen und Schülern, Studierenden und naturwissenschaftlichen Laien für eine Mitgliedschaft offen steht. Sie beschreibt als ihre Ziele die Förderung des wissenschaftlichen Austauschs über die Grenzen der Fachdisziplinen hinweg und die Vermittlung von Faszination und Bedeutung wissenschaftlicher Erkenntnis gegenüber einer interessierten Öffentlichkeit und besonders auch jungen Menschen. Als neuer Vizepräsident ist Reinhard Hüttl gleichzeitig designierter Präsident der GDNÄ, dieses Amt wird er in den Jahren 2021 und 2022 innehaben. ■

## Stefan Schwartze ist Helmholtz-Vizepräsident



Seit 1. Januar 2019 bekleidet **Dr. Stefan Schwartze**, Administrativer Vorstand des GFZ, die Rolle eines kaufmännischen Vizepräsidenten der Helmholtz-Gemeinschaft. Als einer von insgesamt acht Vizepräsidentinnen und -präsidenten möchte sich Stefan Schwartze in seiner Amtszeit für die zentrenübergreifende Zusammenarbeit insbesondere in der Digitalisierung und für die Aufhebung der vom Bundestag

verhängten Haushaltssperre einsetzen. Die Amtszeit beträgt zunächst zwei Jahre mit der Möglichkeit einer Wiederwahl.

Stefan Schwartze ist promovierter Jurist. 2003 wurde er Administratives Vorstandsmitglied des Stiftungsvorstands des Max-Delbrück-Centrums in Berlin-Buch. 2008 wurde er zum Kanzler der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster ernannt. Seit 1. Dezember 2011 ist er Administrativer Vorstand des GFZ. ■

## Neue GFZ-Sektion Fernerkundung und Geoinformatik unter der Leitung von Doris Dransch



Zum 1. März 2019 fusionierten die beiden bisher eigenständigen GFZ-Sektionen „Fernerkundung“ und „Geoinformatik“ zur neuen Sektion „Fernerkundung und Geoinformatik“.

Die Geoinformatik bildet in Zukunft eine eigene Arbeitsgruppe innerhalb der neuen Sektion. Die Leitung der neuen Sektion übernahm **Prof. Doris Dransch**, bisher Leiterin der Sektion Geoinformatik.

Der bisherige Leiter der Sektion Fernerkundung, **Prof. Luis Guanter**, folgte einem Ruf an die Universität Valencia, Spanien, und wird dort zukünftig im Themengebiet der Mechanik lehren und forschen. Der Wechsel von Luis Guanter soll die Basis neuer Kooperationen zwischen dem GFZ und der Universität Valencia bilden. ■

## Professur für Maribel Núñez Valdez



**Prof. Maribel Núñez Valdez** aus der GFZ-Sektion Chemie und Physik der Geomaterialien hat eine W2-Professur für Atomistische Geomaterialforschung an der Goethe-Universität in Frankfurt am Main angetreten. Es ist die erste gemeinsame Berufung des GFZ mit dieser Universität.

Núñez Valdez wird weiterhin am GFZ tätig sein und sich zusätzlich an der Goethe-Universität in der Lehre engagieren

Die Forscherin war 2017 im Rahmen des Helmholtz-Programms für exzellente Frauen in der Wissenschaft ans GFZ gekommen. Zuvor hatte sie ein Physikstudium in ihrem Heimatland Mexiko absolviert, an das sich ein Ph.D. an der University of Minnesota-Twin Cities in Minneapolis sowie Postdoc-Stationen in Zürich und Moskau anschlossen. Der Schwerpunkt ihrer Arbeit sind Theorie und Simulation von Materialeigenschaften, insbesondere von Geomaterialien, zum einen aus grundlegendem Interesse, zum anderen aber auch wegen ihrer Bedeutung für technologische Anwendungen und für Modellierungen der Erde und anderer Planeten. ■

## Charlotte Krawczyk und Magdalena Scheck-Wenderoth in die Academia Europaea aufgenommen



Die GFZ-Direktorinnen **Prof. Charlotte Krawczyk** und **Prof. Magdalena Scheck-Wenderoth** wurden im September 2018 in die Academia Europaea, Sektion Earth and Cosmic Science, aufgenommen. Die Academia Europaea ist eine europäische regierungsunabhängige wissenschaftliche Gesellschaft mit Sitz in London, mit dem Ziel, „das Verständnis der Wissenschaften in der Öffentlichkeit zu verbessern und zu fördern“. Eine Mitgliedschaft erfolgt ausschließlich durch Vorschlag einer Gutachterkommission. Die Gesellschaft besteht aus etwa 3000 Mitgliedern, darunter mehr als 50 Nobelpreisträgerinnen und -preisträger.

Charlotte Krawczyk ist Direktorin des GFZ-Departments Geophysik und Leiterin der Sektion Oberflächennahe Geophysik. Sie forscht vor allem auf dem Feld der angewandten Geophysik und zu geophysikali-

schen Eigenschaften von Massentransporten im Untergrund. Neben ihrer Arbeit am GFZ hat sie eine gemeinsame Professur für Geophysik mit Schwerpunkt Seismik mit der Technischen Universität Berlin inne.

Magdalena Scheck-Wenderoth ist Direktorin des GFZ-Departments Geosysteme und Leiterin der Sektion Sedimentbeckenmodellierung. Sie hat eine gemeinsame Professur für Sedimentbeckenanalyse mit der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen inne. Forschungsschwerpunkt ihrer Arbeit sind geodynamische Prozesse in Sedimentbecken und daraus resultierende Folgen für die Untergrundnutzung. ■

### Bruno Merz und Friedhelm von Blanckenburg sind AGU Fellows 2018



Die **Professoren Bruno Merz**, Leiter der GFZ-Sektion Hydrologie und **Friedhelm von Blanckenburg**, Leiter der GFZ-Sektion Geochemie der Erdoberfläche, haben am 12. Dezember 2018 auf der Jahresversammlung der American Geophysical Union (AGU) in Washington, D.C., ihre Urkunden und Medaillen zum AGU Fellow während einer feierlichen Zeremonie überreicht bekommen. Zu der AGU Fellow Class 2018 gehören 62 Preisträgerinnen und Preisträger, die für ihre außergewöhnlichen wissenschaftlichen Leistungen, Visionen und ihr Engagement ausgezeichnet wurden.

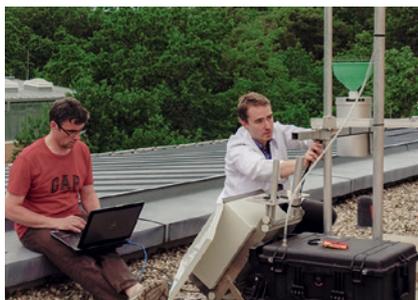
Bruno Merz erhielt die Auszeichnung insbesondere für seine Arbeiten zu hydrologischen Extremen. Unter seiner Leitung hat die GFZ-Sektion Hydrologie Modelle entwickelt, mit deren Hilfe Extremereignisse besser verstanden und Risiken besser eingeschätzt werden können. Friedhelm von Blanckenburg befasst sich vor allem mit Umweltinformationen, die sich aus der Isotopenzusammensetzung von Gesteinen und anderen Proben gewinnen lassen. ■

### Ehrung für Frank Flechtner



**Prof. Frank Flechtner**, Leiter der GFZ-Sektion Globales Geomonitoring und Schwerefeld und Professor an der TU Berlin, erhielt im August 2018 die „NASA Outstanding Public Leadership Medal“. Die Ehrung würdigt seine herausragende Rolle bei der Koordinierung des europäischen Teils der GRACE-FO-Mission. Die Vorgängermission GRACE und GRACE-Follow On mit je zwei Satelliten liefern Daten, die das Schwerefeld der Erde samt seiner zeitlichen Variationen beschreiben. Das GRACE-Duo umkreiste die Erde von 2002 bis 2017 (dreimal so lang wie ursprünglich geplant) und GRACE-FO ist am 22. Mai 2018 erfolgreich ins All gestartet. Ebenfalls erfolgreich war der Projektantrag für die DFG-Forschergruppe „New Refined Observations of Climate Change from Spaceborne Gravity Missions (NEROGRAV)“, deren Sprecher Frank Flechtner ist. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wollen neuartige Methoden und Modellierungsansätze entwickeln, mithilfe derer sich die durch Satellitenmissionen gewonnenen Daten noch präziser auswerten lassen. Die Schwerefelddaten tragen zu einem tieferen Verständnis von Massenverteilung und -transport im System Erde bei. Das ist wichtig, um zentrale Fragen in den Forschungsbereichen der Hydrologie, Ozeanografie, Glaziologie, Geologie und Klimatologie zu analysieren. ■

### ERC-Grant geht an Team um Dirk Sachse



Torsten Queisser und Gunnar Pruß bei der Arbeit am Regenwassersammler (Foto: M. Reich, GFZ)

Der Europäische Forschungsrat (ERC) fördert das Team um den GFZ-Forscher **Dr. Dirk Sachse** mit einem „Proof of Concept“-Grant. Die Fördersumme von 150 000 Euro soll dazu dienen, einen automatisierten Regenwassersammler möglichst nah an die Marktreife zu bringen. Für Dirk Sachse ist es nach seinem „Consolidator-Grant“ die zweite ERC-Förderung. Gemeinsam mit **Dr. Christoff Andermann**, **Torsten Queißer** und **Markus Reich** wurde ein Prototyp entwickelt, der bereits umfangreiche Tests hinter sich hat.

Mit dem Gerät sollen kontinuierlich Proben von Regenwasser auch in unwegsamem Regionen gewonnen werden. Die Herausforderung dabei ist eine Trennung und Konservierung der einzelnen Proben, so dass minimale Unterschiede in der Isotopenzusammensetzung noch Monate später analysiert werden können. Auch die Energieversorgung und Robustheit des „Samplers“ müssen gewährleistet sein, um auch ein halbes Jahr im Hochgebirge, z. B. in Nepal, zu überstehen. ■

### Sabine Chabrilat mit Best Paper Award ausgezeichnet



**Dr. Sabine Chabrilat**, Arbeitsgruppenleiterin in der GFZ-Sektion Fernerkundung, erhielt den Best Paper Award auf dem 9. Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing

Evolution in Remote Sensing „Whispers“, der vom 23. bis 26. September 2018 in Amsterdam, Niederlande, stattfand. Sabine Chabrilat und ihre Co-Autoren erhielten die Auszeichnung für ihre Arbeit mit dem Titel „Mapping CROP variability related to soil quality and CROP stress within rain fed Mediterranean agroecosystems using hyperspectral data“. ■

## Best Presentation Award für Susanne Glaser



**Dr.-Ing. Susanne Glaser**, GFZ-Sektion Geodätische Weltraumverfahren, erhielt auf der GNSS+-Konferenz 2018 des Institute of Navigation (ION) in Miami,

USA, den „Best Presentation Award“. Sie bekam den Award für ihre Präsentation „On the Impact of Inter-satellite Links and Ultra-stable Clocks within Future GNSS Constellations on Geodetic Parameters“ in der Sitzung „Future Trends of Satellite Navigation“. Die ION GNSS+ ist die weltweit bedeutendste Konferenz für die Bereiche GNSS-Technologie, -Dienste und -Produkte. Mit GNSS werden globale Navigationssatellitensysteme wie das amerikanische GPS und das europäische Galileo bezeichnet. ■

## Kirsten Elger zu Chefredakteurin von Earth System Science Data ernannt



**Dr. Kirsten Elger**, Referentin in der Organisationseinheit „Bibliothek und Informationsdienste“ am GFZ, ist eines der fünf Mitglieder in der Leitung der Zeitschrift

Earth System Science Data (ESSD). Die Zeitschrift wurde 2008 als erste Datenzeitschrift der Welt gegründet. Kirsten Elger war dort seit 2016 bereits „Topical Editor“, nun ist sie in die Chefredaktion berufen worden.

Die internationale, interdisziplinäre Zeitschrift veröffentlicht Artikel über Forschungsdaten und publiziert gleichzeitig die beschriebenen Daten durch Forschungsdatenrepositorien wie die GFZ Data Services. Die Artikel durchlaufen ein Peer-Review-Verfahren, werden also von anderen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern daraufhin begutachtet, ob sie sich zur Veröffentlichung eignen. ■

## Nachwuchswissenschaftlerpreis für Hannes Hofmann



**Dr. Hannes Hofmann**, GFZ-Sektion Geoenergie, wurde mit dem Nachwuchswissenschaftlerpreis des Bundesverbandes Geothermie ausgezeichnet.

Der Preis wurde im Rahmen des Deutschen Geothermiekongresses (DGK) verliehen, der vom 27. bis 29. November 2018 in Essen stattfand. Der Bundesverband Geothermie vergibt diesen Preis zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und in „Anerkennung der Leistung junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf dem Gebiet der Geothermie“. ■

## Antoine B. Jacquey erhält Doktorandenpreis



**Dr.-Ing. Antoine B. Jacquey**, GFZ-Sektion Sedimentbeckenmodellierung, erhielt den Helmholtz-Doktorandenpreis 2018 des Helmholtz-Forschungsbereichs Energie im

November 2018. Antoine Jacquey hat mit seiner Promotionsarbeit maßgeblich dazu beigetragen, die physikalischen Bedingungen in geologischen Reservoiren besser numerisch zu beschreiben. Der entscheidende Fortschritt besteht darin, dass er neuartige Werkzeuge entwickelt hat, die dreidimensional sowohl die geologisch bedingten Heterogenitäten im Untergrund als auch die dort ablaufenden physikalischen Prozesse berücksichtigen.

Antoine Jacquey wurde zudem mit dem Heitfeld-Preis der „Hildegard und Karl-Heinrich Heitfeld Stiftung“ für seine herausragende Dissertation im Fachgebiet der Geologie ausgezeichnet. Titel der Dissertation: „Coupled thermo-hydro-mechanical processes in geothermal reservoirs: a multiphysic and multiscale approach linking geology and 3D numerical modelling“. ■

## System Erde. GFZ-Journal (2019) Jahrgang 9, Heft 1

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

### Geothermie in urbanen Räumen

Thermische Unterspeicherung und

#### Tiefe Geothermie in Deutschland

*Guido Blöcher, Thomas Reinsch, Simona Regensburg,  
Jan Henniges, Maren Brehme, Ali Saadat, Stefan Kranz,  
Maximilian Frick, Angela Spalek, Ernst Huenges* [6-13](#)

### Nutzung des geologischen Untergrunds zur stofflichen Speicherung

*Cornelia Schmidt-Hattenberger, Stefan Lüth, Dennis Rippe,  
Bernd Wiese, Peter Pilz, Johannes Hierold, Martin Zimmer,  
Michael Kühn* [14-19](#)

### Wo Salz, Wasser und Gas sich treffen – Kavernenrand- bereiche unter Tage und unter der Lupe im Forschungs- projekt ProSalz

*Bettina Strauch, Julia Arndt, Johannes Barth, Rüdiger Giese,  
Michael Kühn, Anssi Myrntinen, Heike Richter, Svenja Steding,  
Martin Zimmer, Axel Zirkler* [20-25](#)

### Erdbebengefährdung Deutschlands – neu bewertet für aktuelle Baunorm

*Gottfried Grünthal, Dietrich Sromeyer, Christian Bosse,  
Fabrice Cotton, Dino Bindi* [26-31](#)

### Wenn Gesteine sich auflösen: Erdfallstrukturen in Deutsch- lands Untergrund

*Charlotte M. Krawczyk, Samira Maghsoudi, Djamil Al-Halbouni*  
[32-37](#)

### Regionale Auswirkungen des Globalen Wandels: Der Extremsommer 2018 in Nordostdeutschland

*Ingo Heinrich, Daniel Balanzategui, Oliver Bens, Theresa  
Blume, Achim Brauer, Elisabeth Dietze, Pia Gottschalk,  
Andreas Güntner, Katharina Harfenmeister, Gerhard  
Helle, Christian Hohmann, Sibylle Itzerott, Knut Kaiser,  
Susanne Liebner, Bruno Merz, Sylvia Pinkerneil, Birgit  
Plessen, Torsten Sachs, Markus J. Schwab, Daniel  
Spengler, Claudia Vallentin, Christian Wille* [38-47](#)

