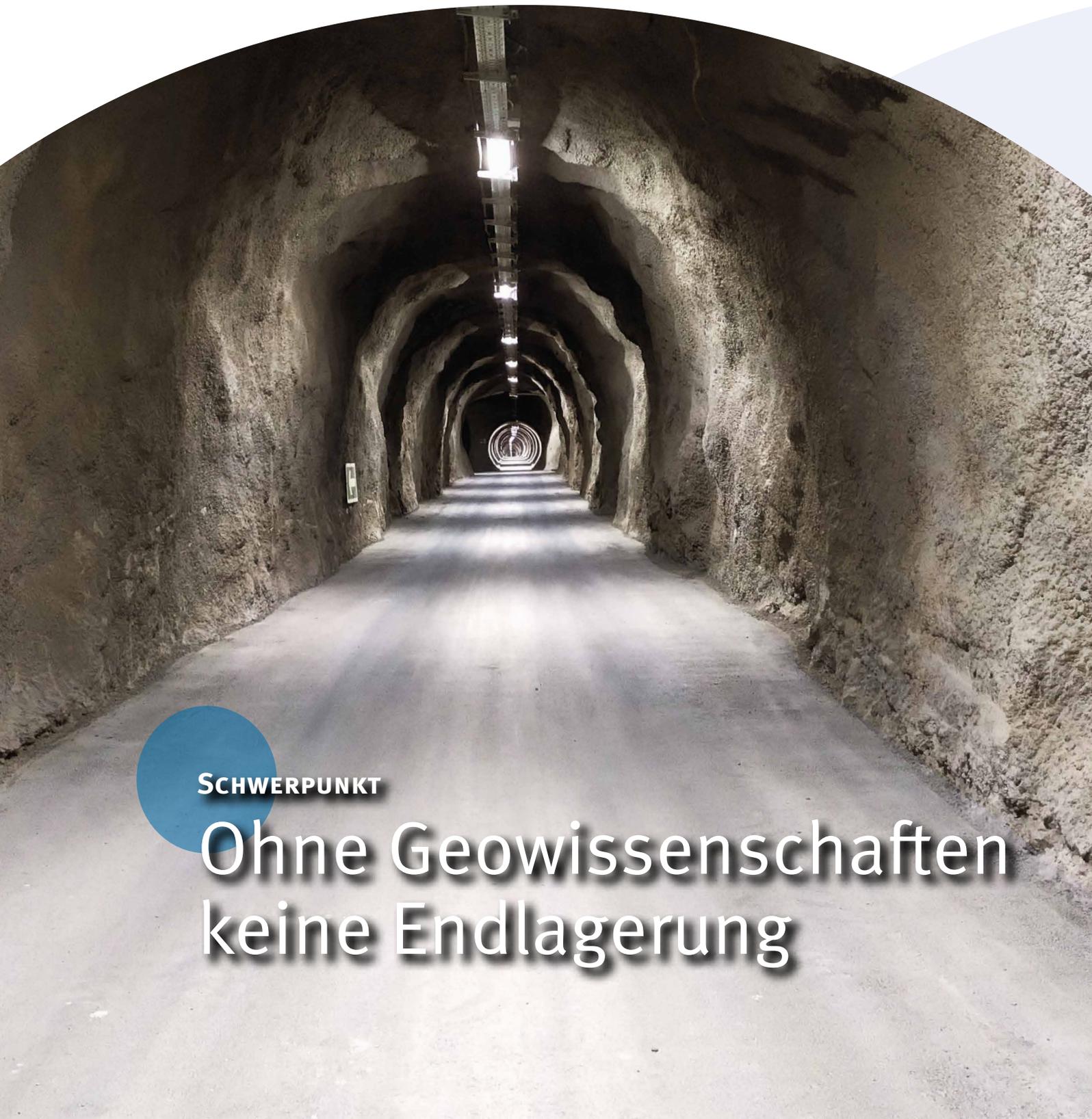


System Erde

GFZ-JOURNAL

2/2021



SCHWERPUNKT

Ohne Geowissenschaften keine Endlagerung



Titelbild

Das Felslabor Mont Terri zur Erforschung des Opalinustons ist ein unterirdisches geologisches Labor im gleichnamigen Berg bei Saint-Ursanne in der Schweiz. Der Zugang zum Untertagelabor erfolgt über die Sicherheitsgalerie eines Autobahntunnels, die hier zu sehen ist.

Abbildung: Micheal Kühn, GFZ

Impressum

Herausgeber:

Prof. Dr. Niels Hovius
Dr. Stefan Schwartze
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Redaktion:

Prof. Dr. Michael Kühn
apl. Prof. Dr. Oliver Heidbach
Prof. Dr. Magdalena Scheck-Wenderoth
Josef Zens (V.i.S.d.P.)
Dr. Dietlinde Friedrich (Koordination)
Dr. Arnd Heumann
Pia Klinghammer

Layout:

Pia Klinghammer

Druck:

ARNOLD group, Großbeeren
Potsdam, Dezember 2021
ISSN 2191-8589

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 Entscheiderinnen und Entscheider in Wissenschaft, Gesellschaft und Politik, an interessierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie an die fachinteressierte Öffentlichkeit.

Möchten Sie in unseren Verteiler für System Erde aufgenommen werden? Dann senden Sie bitte eine E-Mail mit Ihrem Namen und Ihrer Adresse an: presse@gfz-potsdam.de oder schreiben Sie uns: GFZ, Vorstandsbereich, Telegrafenberg, 14473 Potsdam

Bitte beachten Sie, dass Ihre Bestellung ab der jeweils nächsten regulären Ausgabe von System Erde bearbeitet werden kann. Sie erhalten System Erde dann bis auf Widerruf kostenlos und ohne Begleitschreiben zugesendet. Über presse@gfz-potsdam.de oder die Postadresse können Sie uns auch informieren, wenn Sie aus dem Verteiler ausgetragen werden möchten.

Alle Abbildungen GFZ, soweit nicht anders gekennzeichnet



Alle Artikel auch im Internet verfügbar:
systemerde.gfz-potsdam.de

Editorial



2031: Das hört sich an wie Science-Fiction, und es sind doch nur noch neun Jahre bis dahin. Es soll das Jahr der Standortentscheidung durch den Bundestag für das Endlager für hochradioaktiven Abfall sein. Menschen in betroffenen Regionen werden Angst haben. Die Politik hat diese Herausforderung erkannt und ein Verfahren konzipiert, das größtmögliche Transparenz herstellen, das Bürgerinnen und Bürger angemessen beteiligen und das auf dem Weg zu einer wissenschaftsgeleiteten Entscheidung selbsthinterfragend und lernend sein soll. Der Erfolg dieses Plans wird entscheiden, ob die betroffenen Regionen die Gerichte anrufen und Proteste organisieren werden, ob sie auf die Politik schimpfen und die Wissenschaft in Frage stellen werden.

Auch wir in den Geowissenschaften stehen vor einer großen Herausforderung. Unsere Ergebnisse werden ebenso unter die Lupe genommen werden wie unsere Unabhängigkeit. Eine kritische Öffentlichkeit wird Gegenexpertisen einfordern und eigene Resultate präsentieren. Leserbriefe pensionierter Diplom-Ingenieure und Naturwissenschaftlerinnen werden in renommierten Zeitungen erscheinen und bessere Lösungen versprechen: Wiederaufarbeitung, Transmutation, vielleicht die Tiefsee oder das Weltall. Auf jeden Fall nicht in Deutschland, nicht unter der Erde und schon gar nicht unter meinem Hinterhof. Dennoch stehen wir in der Verantwortung, für unser Problem eine Lösung zu finden – und zwar bei uns.

Eine Versachlichung der Debatte ist dringend notwendig. Was können wir tun, um hierzu beizutragen und den Findungsprozess zu unterstützen? Schon jetzt ist es so, dass Transparenz zur guten wissenschaftlichen Praxis gehört. In den Leitlinien der Deutschen Forschungsgemeinschaft heißt es

dazu: „Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dokumentieren alle für das Zustandekommen eines Forschungsergebnisses relevanten Informationen so nachvollziehbar, wie dies im betroffenen Fachgebiet erforderlich und angemessen ist, um das Ergebnis überprüfen und bewerten zu können. Grundsätzlich dokumentieren sie daher auch Einzelergebnisse, die die Forschungshypothese nicht stützen. Eine Selektion von Ergebnissen hat in diesem Zusammenhang zu unterbleiben.“

Doch diese Art von Transparenz reicht nicht aus. Denn was wir für unsere Fachkolleginnen und Fachkollegen nachvollziehbar darstellen, wirkt auf Menschen außerhalb der Wissenschaft oft unverständlich; zumal, wenn es in englischer Sprache erfolgt. Wir müssen also noch mehr als bisher über unsere Methoden sprechen, über die Forschungsfragen und unsere Antworten, über die Fakten, aber auch die Grenzen unseres Wissens und unserer Modelle. Wir werden uns auch auf eine Debatte über Werte einstellen müssen. Der alte Elfenbeinturm-Ansatz ist keine Option mehr: Wissenschaft und Forschende müssen ein aktiver Teil des gesellschaftlichen Prozesses sein, auch als Mitglieder der Gesellschaft, die das Atommüllproblem verursacht hat.

Die Ihnen vorliegende Schwerpunkt-Ausgabe des GFZ-Journals „System Erde“ ist ein Anfang. Die Texte in diesem Heft spiegeln den heutigen Stand unseres Wissens zu Themen, die zur Endlagerstandortsuche gehören, wider. In einigen dieser Themen sind wir führend und sehen uns daher in einer doppelten Verantwortung: Wir forschen dazu und wir bieten Dialog an. Die Texte werden online verfügbar bleiben und sind auch als Einladung zur Debatte zu verstehen. Wenn Sie Fragen haben, schreiben Sie gerne an endlagerforschung@gfz-potsdam.de.

Wir wünschen eine anregende Lektüre

Niels Hovius und Stefan Schwartz

Prof. Dr. Niels Hovius
Wissenschaftlicher Vorstand

Dr. Stefan Schwartz
Administrativer Vorstand

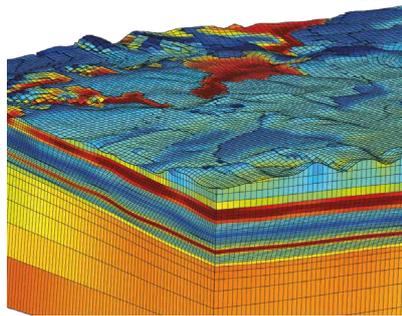
Inhalt

SCHWERPUNKT

Ohne Geowissenschaften keine Endlagerung



6



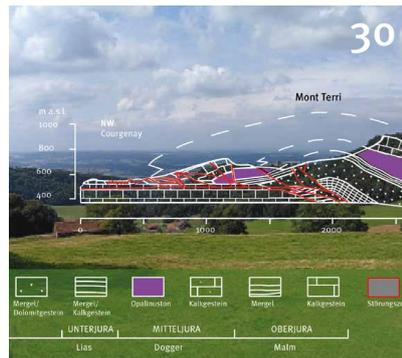
12



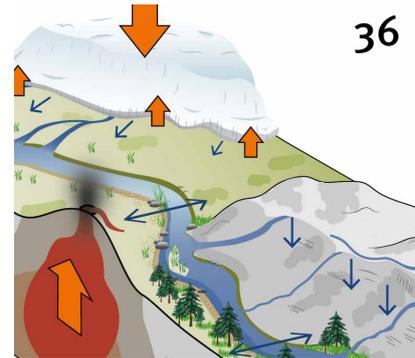
18



24



30



36

- 6 Nadeln im Heuhaufen**
*Michael Kühn, Oliver Heidbach,
Arnd Heumann, Josef Zens*

- 12 Standortsuche im Spannungsfeld**
*Oliver Heidbach, Moritz Ziegler, Sophia Morawietz,
Karsten Reiter, Luisa Röckel, Fabrice Cotton*

- 18 Licht ins Dunkel bringen**
*Stefan Lüth, Roman Esefelder, Heike Richter, Katrin
Jaksch, Benjamin Schwarz, Britta Wawerzinek,
Rüdiger Giese, Charlotte M. Krawczyk*

- 24 Gesteinseigenschaften geben den Ton an**
*Steffi Genderjahn, Anja M. Schleicher,
Valerian Schuster, Julia Mitzscherling,
Dirk Wagner, Erik Rybacki, Georg Dresden*

- 30 Modelle simulieren die Zukunft**
*Michael Kühn, Theresa Hennig, Oliver Heidbach,
Magdalena Scheck-Wenderoth*

- 36 Stabilität über eine Million Jahre**
*Richard Ott, Boris Gailleton, Luca C. Malatesta,
Lukas Becker, Jean Braun*

-
- 42 Interview: „Ich wünsche mir, dass sich junge Menschen in den Suchprozess einbringen“
 - 46 Standpunkt: Wir werden den Dialog suchen
 - 47 Forschungslandschaft Endlager
 - 48 Helmholtz-Zentren im Forschungsverbund iCross
 - 49 Vertrauen aufbauen – Das Nationale Begleitgremium
 - 50 Weiterführende Informationen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

51 Netzwerk

- 51 Worauf die Wissenschaft nach der Hochwasserkatastrophe 2021 Antworten finden muss
- 52 Wie wird eine Flut zur Katastrophe?
- 52 Neue Web-Plattform zur Planung der Hochwasservorsorge in Städten
- 53 Genauere Abschätzung erwartbarer Hochwasserschäden
- 54 Die seismische Chronik einer Sturzflut
- 55 GFZ-Taskforce am Vulkanausbruch auf La Palma
- 56 Wann Erdbeben Vulkanausbrüche auslösen

- 57 Langsame und reguläre Erdbeben wechselwirken in der Nähe von Istanbul
- 58 Flussläufe als Kohlenstoffsinken
- 58 Der Puls des Toten Meeres
- 59 Quecksilber wird unter grönländischem Eisschild freigesetzt
- 59 Regenfälle verändern arktischen Kohlenstoffkreislauf
- 60 Superionisches Eis: Neues zu Magnetfeldern von Uranus und Neptun
- 60 Wie Wasser auf Eisplaneten den felsigen Untergrund auslaugt
- 60 Können Astronauten unbeschadet zum Mars fliegen?
- 61 Chancen und Grenzen von Künstlicher Intelligenz in der Klimamodellierung
- 62 Mehr Rechenpower für das GFZ
- 62 Laborneubau GeoBioLab
- 63 Neue digitale Weiterbildungsformate in der Satelliten-Fernerkundung
- 64 BMBF prämiert das GFZ als Vorreiter in der internationalen Wissenschaftsdiplomatie
- 64 GFZ Friends – Förderverein des GFZ
- 65 **Ausgezeichnet**

Nadeln im Heuhaufen

Michael Kühn^{1,2}, Oliver Heidbach^{1,3}, Arnd Heumann¹, Josef Zens¹

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

³ TU Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Berlin

Die Suche nach einem Standort zur Endlagerung von hochradioaktivem Abfall ist eine generationenübergreifende soziale und politische Aufgabe mit geowissenschaftlichem Kern. Deutschland hat dafür einen partizipativen Prozess gestartet. Die erste Herausforderung ist die Eingrenzung geeigneter Gebiete beginnend mit der gesamten Bundesrepublik. Die zweite ist den Untergrund im Bereich der verbleibenden wenigen Prozent der Landesfläche mit geowissenschaftlichem Wissen, Methoden und Daten detailliert auf seine Eignung hin zu untersuchen.

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist eine drängende Frage der Menschheit. Ziel der Endlagerung der Abfälle ist es, Mensch und Umwelt vor der radiologischen Gefährdung langfristig zu schützen. Wesentlich ist dabei auch, dass künftige Generationen nicht unangemessen belastet werden. Der Plan ist, die anfallenden radioaktiven Stoffe in undurchlässige Gesteinsschichten einzulagern, sodass sie passiv, ohne weiteres Eingreifen des Menschen, für eine Million Jahre eingeschlossen sein werden. Aufgrund unterschiedlicher Endlagerkonzepte werden international auch unterschiedliche Gesteinsformationen auf ihre Eignung für die Aufnahme eines Endlagers untersucht (Wirtsgesteine). Eine wesentliche Rolle spielen die jeweiligen nationalen geologischen Gegebenheiten. Neben der geologischen Lagerung oder der aktuellen Praxis der Lagerung der Abfälle an der Erdoberfläche wurden auch die Verdünnung, Versenkung im Meer oder selbst das Entsorgen der radioaktiven Abfälle im Weltall diskutiert.

Kernaussagen

- Die **Suche nach einem Endlager** in Deutschland ist ein **weltweit einmaliger Prozess**, da von einer „weißen Landkarte“ gestartet wird und alle drei mögliche Wirtsgesteinstypen Ton, Kristallin und Salz in Betracht gezogen werden.
- Generell stehen die **geowissenschaftlichen Methoden, Daten und das zugehörige Wissen** beim Auffinden des Endlagerstandorts mit der größtmöglichen Sicherheit im Fokus.
- Integrierte **Modelle** der Eigenschaften und Prozesse im Untergrund sind für die **Prognose** von zentraler Bedeutung bei der Standortsuche, sind aber immer mit **Ungewissheiten** behaftet.
- Das **Suchverfahren** muss **systematisch und spezifisch** durchgeführt werden, basierend auf dem geologischen Grundverständnis und der Gesamtheit aller verfügbaren **Daten des Untergrunds**.

Diese Alternativen sind aber mit signifikanten Risiken für Mensch und Umwelt verbunden, sodass sie nicht weiterverfolgt werden.

Die Wissenschaft ist sich einig, dass die Endlagerung in tiefen geologischen

Schichten erfolgen muss. Das ist internationaler Konsens. Im Standortauswahlgesetz (StandAG, https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/) der Bundesrepublik Deutschland, das unter Berücksichtigung von Verbesserungsvorschlägen der Endlagerkommission des



Abb. 1: Beim Standortauswahlverfahren handelt es sich buchstäblich um die Suche nach Nadeln im Heuhaufen. (Foto: miro – stock.adobe.com)

Deutschen Bundestags im Mai 2017 in novellierter Fassung in Kraft trat, ist die geologische Lagerung vorgeschrieben. Der langfristige Einschluss der radioaktiven Stoffe erfolgt, von innen nach außen beschrieben, in eigens dafür konzipierten Behältern, durch die Stollenverfüllung im Untertagebauwerk, die Lagereinbauten und schlussendlich vom angrenzenden Gestein. Diese technischen und geologischen Barrieren sollen in Kombination verhindern, dass radioaktive Stoffe aus dem Endlager durch Wasser herausgelöst und über das angrenzende Gestein an die Erdoberfläche in den Lebensraum des Menschen gelangen können. Die Sicherheitsbarrieren werden als Garant gesehen, dass die Schutzziele für die Umwelt zuverlässig und langfristig eingehalten werden.

Bei der Auswahl der weiter zu erkundenen geologischen Standortregionen sind die Eigenschaften der Gesteinsschichten das alles entscheidende Kriterium, weil sie vor allem die Integrität eines Endlagers bestimmen. Das Standortwahlverfahren der Bundesrepublik Deutschland gibt der Sicherheit oberste Priorität.

„Mit dem Standortauswahlverfahren soll in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung [...] in der Bundesrepublik

Deutschland ermittelt werden. Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens [...] bestimmt wird und die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet“ (StandAG, § 1, Satz 2).

Das Auswahlverfahren nach dem StandAG für ein Endlager in der Bundesrepublik Deutschland sieht in einem weltweit einmaligen, mehrstufigen, demokratisch legitimierten Prozess eine Entscheidung vor, die auch Konfliktbewältigungsschritte beinhaltet. Ziel ist es, einen möglichst weitgehenden und generationenfesten, gesellschaftlichen Konsens zu ermöglichen. Der Ausgangspunkt ist die gesamte Fläche der Bundesrepublik. Es ist die berühmte Suche nach den Nadeln im Heuhaufen (Abb. 1), da am Ende nur maximal 0,003 % der Fläche, also etwa 10 km², benötigt werden (Abb. 2).

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) hat im Rahmen des Standortauswahlverfahrens den Auftrag, das Endlager zu finden. Hierzu werden zuerst großräumige Teilgebiete ermittelt, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen (BGE, 2020). Anschließend grenzt die BGE diese Gebiete zu kleinräumigen Standortregionen

ein, die mit geophysikalischen Methoden ober- und untertägig detailliert erkundet werden, um abschließend den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit vorzuschlagen. Der letzte Schritt, eine gesellschaftlich akzeptierte Standortentscheidung durch den Bundestag, wird für das Jahr 2031 angestrebt.

Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) hat im Standortauswahlverfahren die Aufgabe, den Vollzug des StandAG zu überwachen. Es prüft die Vorschläge der BGE und erarbeitet daraus Empfehlungen für den Gesetzgeber. Darüber hinaus ist das BASE Träger der Öffentlichkeitsbeteiligung im Prozess und informiert dementsprechend umfassend und systematisch.

Mit Blick auf die Öffentlichkeitsbeteiligung hat das Nationale Begleitgremium (NBG) die Aufgabe, das Verfahren zu begleiten und darin zu vermitteln und so Vertrauen in die Verfahrensdurchführung zu ermöglichen. Das NBG ist ein unabhängiges, pluralistisch zusammengesetztes Gremium, welches die Bandbreite der gesamten Gesellschaft widerspiegelt. Es kann sich unabhängig und wissenschaftlich mit sämtlichen Fragestellungen des Standortauswahlverfahrens befassen und die zuständigen Institutionen jederzeit befragen und darüber Stellungnahmen abgeben.

In allen Phasen der Standortsuche sind geowissenschaftliche Erkenntnisse und



Kontakt: Michael Kühn (michael.kuehn@gfz-potsdam.de)
Oliver Heidbach (oliver.heidbach@gfz-potsdam.de)

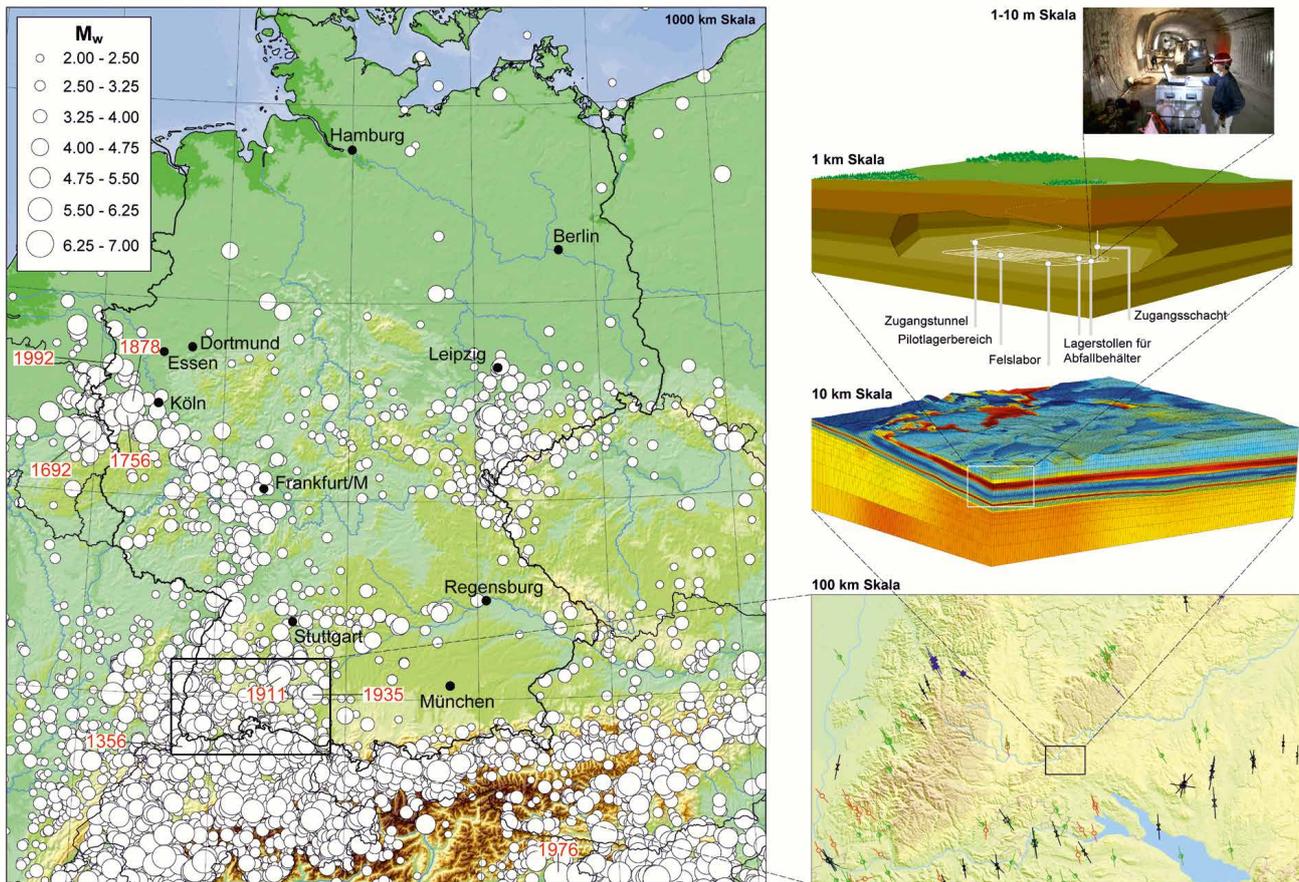


Abb. 2: Von der Landkarte Deutschlands zum Endlagerstandort. Die skalenübergreifende Standortsuche startet mit der gesamten Grundfläche Deutschlands (357 000 km²). Am Ende werden aber nur 0,003 % für den Bau eines Endlagers genutzt (entspricht ungefähr 10 km²). Die Deutschlandkarte zeigt die Magnituden der katalogisierten Seismizität ab dem Jahr 1000 (Grünthal et al., 2018), die Regionalkarte zeigt die Orientierung der größten horizontalen Spannung in der Erdkruste (Reiter et al., 2016), das Bild der 10 km Skala zeigt die Verteilung der Spannungen aus einem Computermodell (siehe Heidbach et al., 2021).

geotechnische Expertise von entscheidender Bedeutung. Wesentlich ist für die Umsetzung des Standortauswahlverfahrens auch unabhängige Forschung. Als nationales Forschungszentrum für die feste Erde ist sich das Deutsche GeoForschungszentrum GFZ seiner Verantwortung auf diesem Forschungsfeld bewusst und beteiligt sich mit Beiträgen im Rahmen der Grundlagenforschung.

Geowissenschaften schaffen die entscheidende Wissensbasis

Die Ermittlung des Standorts erfolgt anhand der im StandAG festgelegten Kriterien über die vorhandenen oder zu erhebenden geologischen Daten der gesamten Bundesrepublik Deutschland. Dazu gehören Ausschlusskriterien wie z. B. die seismische Aktivität oder aktive

Störungszonen (Heidbach et al., 2021, S. 12 in diesem Heft). Zusätzlich müssen Mindestanforderungen erfüllt sein. Danach sollen z. B. mindestens 300 m Gestein das Endlager von der Erdoberfläche trennen und die Gesteinsschicht, welche das Endlager aufnehmen soll, muss mindestens eine Dicke (Mächtigkeit) von 100 m aufweisen (Lüth et al., 2021, S. 18 in diesem Heft). Die Suche erfolgt dementsprechend von grobmaschigen zu immer kleinräumigeren Gebieten über die räumlichen Skalen von 1000 km bis zu 1 bis 10 m (Abb. 2).

Auf schlussendlich so identifizierte Standorte werden die **geowissenschaftlichen Abwägungskriterien** angewendet, um Gebiete auszuweisen, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in einem der drei Wirts-

gesteine erwarten lassen (Genderjahn et al., 2021, S. 24 in diesem Heft). Potenzielle Wirtsgesteine sind in diesem Rahmen Steinsalz, Tonstein und Kristallin-gestein (Infobox Wirtsgesteine S. 11).

Die BGE hat unter Anwendung der festgelegten geowissenschaftlichen Anforderungen und Kriterien Gebiete und daran anschließend Standorte zu ermitteln, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen bzw. gewährleisten. Ein Gebiet ist nicht als Endlagerstandort geeignet, wenn nur eines der sechs Ausschlusskriterien erfüllt ist. Die Ausschlusskriterien sind:

1. Großräumige natürliche Vertikalbewegungen mit Hebungsraten von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer

Million Jahren (Ott et al., 2021, S. 36 in diesem Heft).

2. Aktive Störungszonen in den Gebirgsbereichen, die als Endlager in Betracht kommen.
3. Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit (auch Bohrungen), aus denen negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich des potenziellen Endlagers herrühren.
4. Nachgewiesene oder zu erwartende seismische Aktivität, die eine Gefährdung darstellt.
5. Quartärer Vulkanismus liegt vor oder ist zukünftig zu erwarten.
6. Nachgewiesene junge Grundwasseralter im Gebirgsbereich des geplanten Endlagers.

Gebiete, die kein Ausschlusskriterium erfüllen, sind nur als Endlagerstandort geeignet, wenn **gleichzeitig alle fünf Mindestanforderungen** erfüllt sind. Diese sind:

1. Eine sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines potenziellen Endlagers, sodass der Transport von Radionukliden ausschließlich durch Diffusion erfolgen kann.
2. Eine Mächtigkeit des Wirtsgesteins von mindestens 100 m.
3. Eine minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von mindestens 300 m unter der Geländeoberfläche.
4. Eine verfügbare Fläche für das Endlager, die für die Realisierung zur möglichen späteren Auffahrung eines Bergungsbergwerks erforderlich ist.
5. Der Erhalt der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren (Kühn et al., 2021, S. 30 in diesem Heft).

Daran anschließend bewertet die BGE anhand der sogenannten geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, ob in

einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Diese ergibt sich nach einer sicherheitsgerichteten Beurteilung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien nach dem StandAG, die hier in Anlehnung daran aufgeführt werden:

1. Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll so gering wie möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften sind dabei die vorherrschende Grundwasserströmung, das Grundwasserangebot und die Diffusionsgeschwindigkeit.
2. Die barrierewirksamen Gesteine müssen mindestens über eine Mächtigkeit verfügen, die den sicheren Einschluss der Radionuklide über einen Zeitraum von einer Million Jahren bewirkt. Das voraussichtliche Einschlussvermögen soll möglichst groß und zuverlässig prognostizierbar sein und ist mittels Modellrechnungen abzuleiten.
3. Die räumliche Beschreibung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, soll zuverlässig möglich sein.
4. Die für die langfristige Stabilität wichtigen geologischen Merkmale sollen sich in der Vergangenheit über möglichst lange Zeiträume nicht wesentlich verändert haben. Dies sind insbesondere die Zeitspannen, über die sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ nicht wesentlich verändert haben.
5. Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter neuer Durchlässigkeit (sekundäre Permeabilität) im Wirtsgestein soll außerhalb einer Auflockerungszone um das Endlager möglichst gering sein.
6. Die Neigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Ausbildung von Wegsamkeiten durch Spalten und Klüfte soll möglichst gering sein.

7. Die Gasbildung soll unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein.
8. Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten führen.
9. Die barrierewirksamen Gesteine sollen ein möglichst hohes Rückhaltevermögen gegenüber den langzeitrelevanten Radionukliden besitzen.
10. Die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und der Minerale des Wirtsgesteins sollen sich auch nach dem Einbringen von Behälter- und Ausbaumaterial positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und das Material technischer und geotechnischer Barrieren chemisch möglichst nicht angreifen.
11. Die überdeckenden Schichten sollen durch ihre Mächtigkeit sowie ihren strukturellen Aufbau und ihre Zusammensetzung möglichst langfristig zum Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegen direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Vorgänge beitragen.

Die **Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien** machen sehr deutlich, dass es die **Methoden, Daten und das zugehörige Wissen der Geologie, Geophysik und Geochemie** sind, die für das Auffinden eines Endlagerstandorts mit der bestmöglichen Sicherheit im Fokus aller Arbeiten und der **Forschung am GFZ** stehen.

Lernen von der Natur und von ihr abgeleiteten Modellen

Experimente, die im Labor oder in Untertagelaboren durchgeführt werden, können nur über eine vergleichsweise sehr kurze

Zeitspanne betrachtet werden. Mit Bezug zur langfristigen Sicherheit eines Endlagers können daher Beobachtungen in der Natur über sogenannte Analoga bei der Beurteilung von Laborexperimenten und theoretischen Berechnungen unterstützen.

Die Natur bietet Erfahrungen aus Systemen, die als Analoga für Endlager dienen, in denen radioaktive Stoffe wirksam über Milliarden Jahre eingeschlossen blieben. Ein Beispiel dafür sind die Uranerzvorkommen in Oklo (Gabun, Afrika), in denen es auf natürliche Weise zur Kernspaltung gekommen ist. Wie in einem Atomkraftwerk sind aufgrund des hohen natürlichen Gehalts des Uranisotops ^{235}U während einiger Jahrtausende im Gestein spontan Kettenreaktionen abgelaufen. Dabei entstanden hochradioaktive Spaltprodukte, die über Jahrmillionen weiter zerfallen sind. Heute sind nur noch die Endprodukte vorhanden. Geochemische Untersuchungen haben gezeigt, dass seit dieser Reaktorbildung nur ein geringer Teil des Urans und der Spaltprodukte in das umliegende Gestein eingedrungen ist. Der weitaus größte Teil der ursprünglich radioaktiven Stoffe blieb eingeschlossen. In Oklo hat die Natur einen natürlichen Kernreaktor und ein Endlager für hochradioaktive Spaltprodukte geschaffen. Dabei blieben die „Abfälle“ sogar ohne technische Sicherheitsbarrieren im Gestein eingeschlossen.

Über Beobachtungen in der Natur ist es also möglich, etwas über vergangene und aktuelle Prozesse zu lernen. Um Prognosen zu erhalten, wie sich das System in der Zukunft verhält, werden computergestützte Modelle erstellt (Kühn et al., 2021). Diese sind nützlich und notwendig, um z. B. die räumliche und zeitliche Verteilung der Konzentrationen von Radionukliden in der Umwelt zu verstehen, um Strukturen des Untergrunds in drei Dimensionen abzubilden (Lüth et al., 2021), oder das gegenwärtige tektonische Spannungsfeld zu beschreiben (Heidbach et al., 2021). Eine weitere Aufgabe von Modellen ist z. B. die Quantifizierung von Erosionsprozessen für

eine Million Jahre mit realen räumlichen Koordinaten, welche die abdeckenden Schichten über dem Endlager verändern (Ott et al., 2021).

Die Grenzen der Modelle liegen in der Konzeption der physikalischen Gleichungen, welche die Prozesse vereinfachend beschreiben und eine bestmögliche Annäherung an die realen Gegebenheiten darstellen sollen. Trotzdem bieten sie ein Instrument für die kritische Analyse. Modelle sind ein Mittel, um Szenarien mit unterschiedlichen Bedingungen zu rechnen, Ideen zu prüfen und die sensiblen Parameter aufzuzeigen. Sie weisen den Weg zu weiteren Untersuchungen und helfen, neue Experimente zu entwerfen und Hypothesen kritisch zu prüfen (Kühn et al., 2021).

Im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen für ein Endlager gilt es daher immer zu berücksichtigen, dass die Modellvorstellungen und Modellprognosen realer Systeme niemals ein vollständiges Abbild liefern. Es bleiben Ungewissheiten, die zur Entscheidungsfindung im Standortauswahlverfahren minimiert werden müssen.

Systematische, wissenschaftliche Herangehensweise für den Findungsprozess

Mit dem Standortauswahlverfahren soll ein Endlager für hochradioaktive Abfälle mit der bestmöglichen Sicherheit in einem vergleichenden Verfahren ermittelt werden. Dies soll darüber hinaus u. a. transparent und wissenschaftsbasiert stattfinden.

Die Beschaffung der erforderlichen geologischen Daten durch die BGE für die Anwendung der genannten Kriterien erfolgte durch Datenlieferungen der zuständigen Bundes- und Landesbehörden. Insgesamt liegen so nun mehr als eine Million Datensätze in unterschiedlichsten Formen vor. Hierbei gilt es zu unterscheiden zwischen Daten, die relevant

sind bezüglich der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen oder geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Es handelt sich um eine ausgesprochen umfangreiche Arbeit, die von der BGE durchgeführt wurde. Für die weiteren Phasen im Standortauswahlverfahren steht nun ein einmaliger geologischer Datensatz für die Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung. Neue Daten werden erst in späteren Verfahrensschritten bei den obertägigen und untertägigen Erkundungen gewonnen (BGE, 2020).

Die BGE verfolgt ein eingrenzendes Verfahren, das im Kern kein potenziell geeignetes Gebiet frühzeitig ausschließen soll. Dabei wurde auch beschlossen, grundsätzlich von tendenziell günstigen Bedingungen der Wirtsgesteinseigenschaften mit Blick auf einen potenziellen Endlagerstandort auszugehen. So werden die physikalischen Gesteinseigenschaften durch die BGE positiv bewertet. Grundsätzlich wird beim Tonstein von ungestörten und nicht gefalteten Formationen ausgegangen. Für Kristallingestein wird erwartet, dass trotz seiner häufig vorhandenen Klüftung Bereiche geringerer Durchlässigkeit und ausreichender Größe immer vorhanden sind. Das Steinsalz schließlich wird als rein, ungestört und ohne Risse und Klüfte angenommen (BGE, 2020). Daraus folgt, dass die bislang erzielten Ergebnisse ausreichend sind, gleichwohl aber nicht als Stand der Wissenschaft und Technik bezeichnet werden können (Kühn, 2021). Trotzdem ist das Verfahren als praktikabel und nachvollziehbar zu bezeichnen. In Zukunft wird indes ein anderer Umgang mit dem vorhandenen „Datens(ch)atz“ notwendig sein.

Um den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit im Zuge eines tatsächlich vergleichenden Verfahrens zu ermitteln, wie es im StandAG vorgesehen ist, wird das Suchverfahren systematischer und spezifischer durchgeführt werden müssen, basierend auf dem geowissenschaftlichen Grundverständnis und der Gesamtheit aller verfügbarer Daten des Untergrunds.



Wirtsgesteine



Steinsalz in einem Bergwerk
(Foto: bastan-stock.adobe.com)



Granit in einem Steinbruch
(Foto: merial-stock.adobe.com)



Handstück des Opalinustons
(Foto: swisstopo)

Steinsalze

Steinsalz ist ein Evaporit- und Sedimentgestein, das in der geologischen Vergangenheit durch Ausfällung aus konzentriertem Meerwasser entstanden ist. Bis auf geringe Beimengungen anderer Evaporitminerale, wie Anhydrit, Gips oder Sylvinit, sowie Tonmineralen besteht Steinsalz ausschließlich aus dem Mineral Halit (Natriumchlorid, NaCl). Aufgrund der Dichte bzw. sehr geringen Durchlässigkeit werden Steinsalzvorkommen als geeignete Wirtsgesteine für die Endlagerung angesehen. Salz besitzt gute Wärmeleitungsigenschaften.

Kristallingestein

Kristallingestein ist eine Bezeichnung für Magmatite und Metamorphite und wird zur Unterscheidung von Sedimentgesteinen verwendet. Ein Beispiel ist Granit, der in der Erdkruste aus Magma entstanden ist. Kristallingesteine sind aufgrund ihrer hohen Stabilität grundsätzlich als Wirtsgesteine für ein Endlager geeignet. Sie sind allerdings häufig auch geklüftet und bieten Wasser entlang dieser Störungen im Gestein Zutrittmöglichkeiten. Das StandAG sieht daher für Kristallingesteine die Möglichkeit einer anderen Auslegung der technischen Barrieren als bei Tonstein und bei Steinsalz vor.

Tonstein

Tonstein ist ein Sedimentgestein mit Korngrößen kleiner als 0,002 mm. Es besteht überwiegend aus Tonmineralen (z. B. Montmorillonit, Illit und Smektit) mit Beimengungen an Quarz, Feldspat und Karbonaten und hat wie Salz eine sehr geringe Durchlässigkeit. Im Gegensatz zu Salz ist Tonstein unlöslich und bringt darüber hinaus auch eine erhebliche Sorptionskapazität für Radionuklide mit. Tonformationen haben ein hervorragendes Isolations- und Abdichtungsvermögen und die Fähigkeit, Wasser und gelöste Inhaltsstoffe über geologische Zeiträume an sich zu binden.

Literatur

- BGE. (2020). *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*: Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf
- Genderjahn, S., Schleicher, A. M., Schuster, V., Mitscherling, J., Wagner, D., Rybacki, E., Dresen, G. (2021). Gesteinseigenschaften geben den Ton an. *System Erde*, 11 (2), 24–29. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.4>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018). Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands - Version 2016 - für DIN EN 1998-1/NA. *Bautechnik*, 95 (5), 371–384. <https://doi.org/10.1002/bate.201700098>
- Heidbach, O., Ziegler, M., Morawietz, S., Reiter, K., Röckel, L., Cotton, F. (2021). Standortsuche im Spannungsfeld. *System Erde*, 11 (2), 12–17. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.2>
- Kühn, M. (2021). *Gutachten zu den Fragen: Entsprechen die Referenzdatensätze, die die BGE zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien teilweise eingesetzt hat, dem „state of the art“?* Sind sie also in ihrer Fachlichkeit für die Aufgabe der Ermittlung von Teilgebieten angemessen und entsprechen sie dem Stand von Wissenschaft und Technik? Nationales Begleitgremium, Geschäftsstelle, Buchholzweg 8, 13627 Berlin. https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Downloads/DE/Downloads_Gutachten/Gutachten_Referenzdaten_Kuehn_10_5_2021.pdf
- Kühn, M., Hennig, T., Heidbach, O., Scheck-Wenderoth, M. (2021). Modelle simulieren die Zukunft. *System Erde*, 11 (2), 30–35. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.5>
- Lüth, S., Esefelder, R., Richter, H., Jaksch, K., Schwarz, B., Wawerzinek, B., Giese, R., Krawczyk, C. M. (2021). Licht ins Dunkel bringen. *System Erde*, 11 (2), 18–23. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.3>
- Ott, R. F., Gailleton, B., Malatesta, L. C., Becker, L., Braun, J. (2021). Stabilität über eine Million Jahre. *System Erde*, 11 (2), 36–41. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.6>
- Reiter, K., Heidbach, O., Reinecker, J., Müller, B., Röckel, T. (2015). Spannungskarte Deutschland 2015. *Erdöl Erdgas Kohle*, 131 (11), 437–442. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_1361435

Standortsuche im Spannungsfeld

Oliver Heidbach^{1,2}, Moritz Ziegler¹, Sophia Morawietz^{1,2}, Karsten Reiter³, Luisa Röckel⁴, Fabrice Cotton^{1,5}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² TU Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Berlin

³ TU Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Darmstadt

⁴ Institut für Angewandte Geowissenschaften, KIT, Karlsruhe

⁵ Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

Das gegenwärtige Spannungsfeld der Erdkruste ist eine zentrale Feldgröße für die Beurteilung der Stabilität eines Endlagers. Erreichen die Spannungen einen kritischen Wert, dann versagt das Gestein. Es bilden sich Risse und Brüche, die Wegsamkeiten für Flüssigkeiten und Gase darstellen. Als Folge kann das Endlager undicht werden. Im direkten Bezug dazu stehen die Ausschlusskriterien seismische Aktivität und aktive Störungszonen aus dem Standortauswahlgesetz. Beide sind ein Ausdruck dafür, dass der kritische Wert überschritten wurde.

Die Beschreibung des gegenwärtigen, natürlichen, also ungestörten Spannungszustands der Erdkruste ist für die Suche eines Standorts für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle von großer Bedeutung. Damit kann prognostiziert werden, wieviel Spannungsänderungen in der Zukunft aufgenommen werden können, ohne einen kritischen Zustand zu erreichen. Diese Spannungsänderungen sind zum einen vom Menschen verursacht, z. B. durch Bohrungen, Kavernenbau, oder die Lagerung der wärmeabstrahlenden Behälter mit den radioaktiven Abfällen. Zum anderen ändern auch natürliche Prozesse, wie z. B. Erdbeben, Eiszeiten und Erosion (Ott et al., 2021, S. 36 in diesem Heft), den Spannungszustand. Da die Stabilität eines geologischen Tiefenlagers zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen für die Standortauswahl entscheidend für den Schutz von Mensch und Umwelt ist, analysiert und bewertet das

Kernaussagen

- **Das gegenwärtige Spannungsfeld der Erdkruste** ist eine entscheidende Feldgröße zur Beurteilung, ob ein Standort als Endlager geeignet ist. Hochauflösende geomechanisch-numerische Modelle spielen hierbei eine zentrale Rolle.
- **Ungewissheiten** der Modelle zum gegenwärtigen Spannungszustand der Erdkruste müssen bestimmt und mit intelligenten Beprobungsstrategien durch Bohrungen reduziert werden.
- **Das Ausschlusskriterium seismische Aktivität** ist in seiner momentanen Formulierung nicht zielführend und muss durch einen physikbasierten Ansatz ersetzt werden.

Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ Daten zum Spannungsfeld und stellt diese in öffentlich zugänglichen Datenbanken bereit (Heidbach et al., 2018; Morawietz et al., 2020). Weiterhin werden am GFZ Methoden und Konzepte entwickelt, um aus den punktuellen Informationen mit Computersimulationen

eine kontinuierliche Beschreibung des gegenwärtigen Spannungsfelds im dreidimensionalen Raum zu erstellen (Ziegler und Heidbach, 2020). Ziel ist dabei auch, eine Vorhersage der zu erwartenden Spannungsänderungen durch natürliche und anthropogene Eingriffe zu treffen.

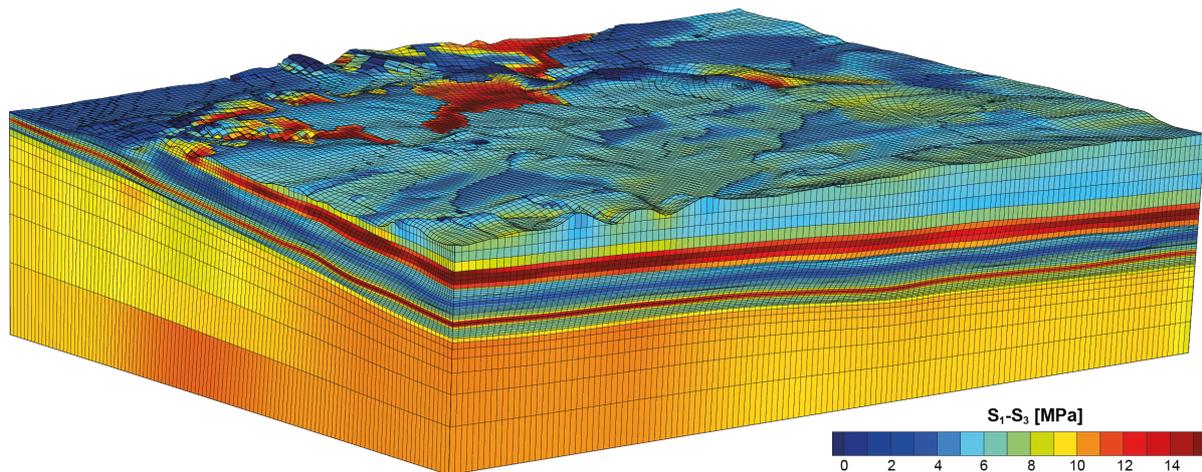


Abb. 1: Computermodell der 3D-Spannungsverteilung. Dargestellt ist die Differenzspannung in einem Volumen von $10 \times 10 \times 2,5 \text{ km}^3$. Blaue Farben verdeutlichen eine geringe Differenzspannung, welche z. B. in tonreichen Schichten vorherrscht. Höhere Differenzspannungen, sichtbar durch die rote Farbe, herrschen in den festen Schichten, wie z. B. dem Malm oder unteren Muschelkalk.

Kritische Spannungen und Computermodelle

Erreichen die Spannungen einen kritischen Wert, dann versagt das Gestein und es entstehen neue Brüche oder präexistierende tektonische Störungen werden reaktiviert. Beide Vorgänge können kriechend geschehen oder abrupt. Im zweiten Fall kommt es zu Erdbeben, deren Magnitude im Wesentlichen von der Länge der Brüche und Störungen sowie dem relativen Versatz entlang dieser bestimmt werden. Natürliche Erdbeben finden an präexistierenden Störungen statt, da es leichter ist, diese zu reaktivieren, als in einem intakten Gestein einen Neubruch zu erzeugen.

Für die Reaktivierung und den Neubruch ist die sogenannte Differenzspannung, also der Unterschied zwischen der größten und kleinsten Hauptspannung, entscheidend. Die Hauptspannungen wiederum kann man sich als drei senkrecht zueinanderstehende Kraftvektoren vorstellen. Sind alle gleich groß, dann findet keine Deformation statt. Wie stark in der oberen Erdkruste Gesteine deformiert werden und wie groß die Differenzspannungen sind, wird in erster Näherung

durch die elastischen Eigenschaften der Gesteine und den wirkenden Kräften, also der Schwerkraft und den Oberflächenkräften, die durch die Bewegung der tektonischen Platten erzeugt werden, bestimmt.

Zur Prognose des Spannungszustands im Untergrund werden 3D geomechanisch-numerische Computermodelle auf der Basis gemessener Daten gerechnet. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis einer solchen Modellierung für die oberen 2 km in der Molasse des Schweizer Voralpenlands (Hergert et al., 2015). Die einzelnen Sedimentschichten besitzen unterschiedliche elastische Eigenschaften. Diese bewirken eine große Variabilität der resultierenden Differenzspannungen zwischen den mechanisch festen Schichten aus Kalkstein, wie z. B. dem Malm und unteren Muschelkalk (rote Farben) und den „weicheren“ tonreichen Schichten des Doggers (blaue Farben).

Von zentraler Bedeutung für das Reaktivierungspotenzial präexistierender Störungen ist deren Orientierung im Spannungsfeld. Für intaktes Gestein ist dessen Festigkeit der entscheidende Parameter. Ist die Gesteinsfestigkeit bzw.

der Reibungskoeffizient einer präexistierenden Störung bekannt, kann das Versagens- bzw. Reaktivierungspotenzial als ein Wert zwischen null und eins dargestellt werden. Null bedeutet, der Zustand ist sehr weit vom Versagen und Neubruch entfernt; der Wert eins zeigt an, dass ein Bruch bzw. eine Reaktivierung stattfindet (siehe Abb. 2 unten).

Die wesentlichen Parameter, die benötigt werden, um die Kritikalität des Spannungszustands zu quantifizieren sind 1) die Lage und Orientierung von präexistierenden Störungen im Raum, 2) die Beschreibung der räumlichen Variabilität des ungestörten, natürlichen Spannungszustands, 3) das Versagenskriterium, d. h. wieviel Spannung das Gestein aufnehmen kann, bevor sich Brüche bilden oder eine Reaktivierung von präexistierenden Störungen stattfindet. Hinzu kommt 4) die Beschreibung der natürlichen und vom Menschen verursachten Prozesse, die Spannungsänderungen zur Folge haben, wie der Bau von Stollen und Schächten, aber auch der Wärmeeintrag durch die Behälter.

Störungen im Untergrund können z. B. mittels 3D-Seismik detektiert werden



Kontakt: Oliver Heidbach
(oliver.heidbach@gfz-potsdam.de)

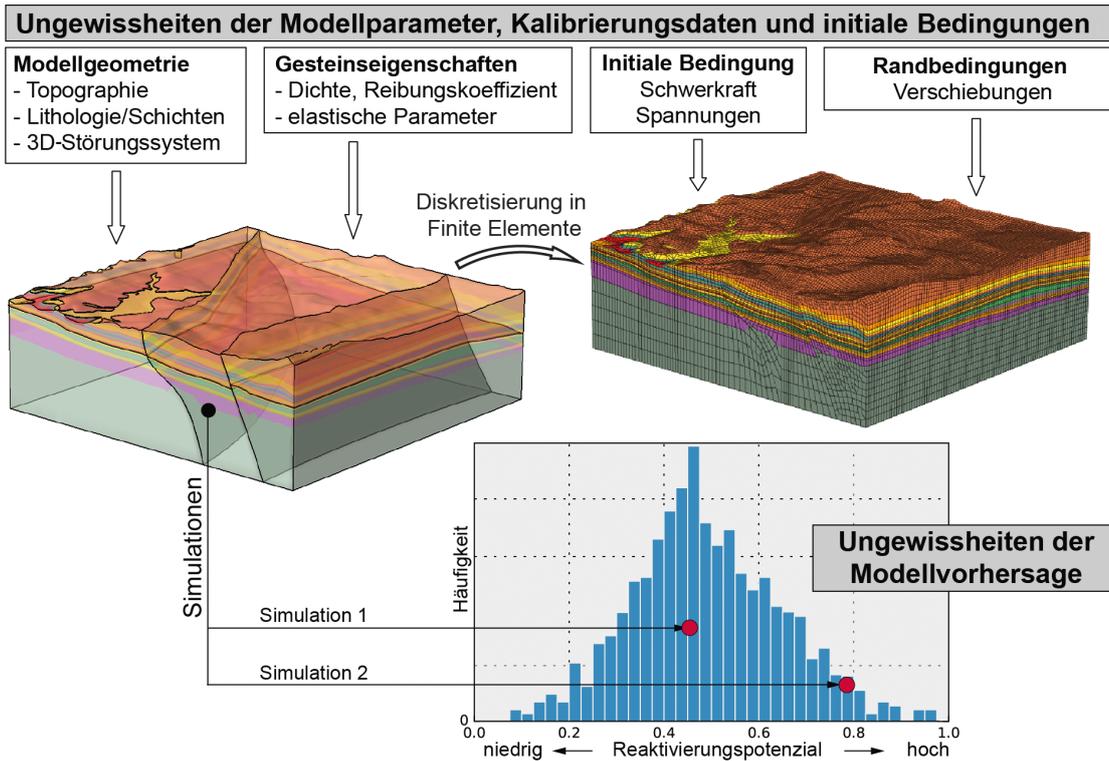


Abb. 2: Wesentliche Eingabegrößen eines geomechanisch-numerischen Modells zur Beschreibung des 3D-Spannungsfelds. Initiale und Randbedingungen werden variiert, bis die Modellergebnisse bestmöglich an punktuell vorliegende Spannungsdaten aus Bohrlochinformationen angepasst sind. Das Histogramm zeigt die Verteilung aller Simulationen des Modells in Bezug auf das Reaktivierungspotenzial präexistierender Störungen, wenn der Modellparameterraum untersucht wird. Sind die Ungewissheiten des Modells hoch, so ist das Histogramm breit und die Vorhersage hat eine niedrige Präzision (Abb. 3). Die roten Punkte zeigen die Vorhersage von zwei einzelnen Simulationen.

(Lüth et al., 2021, S. 18 in diesem Heft). Die Gesteinsfestigkeit und die elastischen Eigenschaften werden z. B. im Labor an Proben bestimmt oder von seismischen Messungen abgeleitet. Zur Quantifizierung der Spannungsänderungen werden thermisch-hydraulisch-mechanische Modelle verwendet (Kühn et al., 2021, S. 30 in diesem Heft). Eine Herausforderung ist die quantitative Beschreibung des natürlichen Spannungszustands. Hierzu werden 3D geomechanisch-numerische Modelle eingesetzt, die auf einem statischen geologischen Modell des Untergrunds basieren, in dem die Strukturen und die Verteilung der Gesteinseigenschaften beschrieben werden. Die physikalische Gleichung, die dieses Problem beschreibt, ist die des Kräftegleichgewichts zwischen der Schwerkraft und Oberflächenkräften der Plattentektonik. In der Regel ist die Verteilung der Gesteinseigenschaften inhomogen und anisotrop, sodass eine

Lösung der Gleichung nur mit numerischen Methoden, die eine Näherungslösung liefern, möglich ist. Hierfür bietet sich die Methode der Finiten Elemente an, da hiermit auch komplexe geologische Strukturen im Untergrund abgebildet werden können. Abbildung 2 fasst die wesentlichen Eingabegrößen einer solchen Modellierung zusammen und zeigt den Transfer der Geometrie zu einem Finite-Elemente-Gitter.

Ungewissheiten der Modellvorhersage

Um die Zuverlässigkeit einer Modellvorhersage einschätzen zu können, müssen die Ungewissheiten der Vorhersage bestimmt werden. Abbildung 3 verdeutlicht, dass hierzu eine einzelne Lösung eines Modells (roter Punkt), die man erhält, wenn alle Modellparameter festgelegt werden und eine bestmögliche Anpas-

sung an Kalibrierungsdaten vorliegt, nicht ausreicht. Der grüne Punkt in Abb. 3 ist das gesuchte Modellergebnis, das die wahre Beschreibung der Realität liefern würde. Die weißen Punkte sind verschiedene Simulationen des Modells, also Modelle, die mit unterschiedlichen Modellparametern im Rahmen ihrer Unsicherheiten gerechnet werden und somit eine Streuung der Modellergebnisse erzeugen. Die Aussagekraft von einem einzelnen Modellergebnis ist gering, da nicht bekannt ist, wie weit es vom wahren Ergebnis entfernt ist. Wenn tausende Simulationen gerechnet werden, ergibt sich eine Streuung, die idealerweise um das wahre Ergebnis verteilt ist; in diesem Fall ist die Richtigkeit des gewählten Modells hoch (Abb. 3a, b). Um die Streuung, also die Präzision der Modellergebnisse, zu verbessern, müssen die Ungewissheiten des Modells reduziert werden – die Genauigkeit nimmt zu und die Breite des Histogramms nimmt

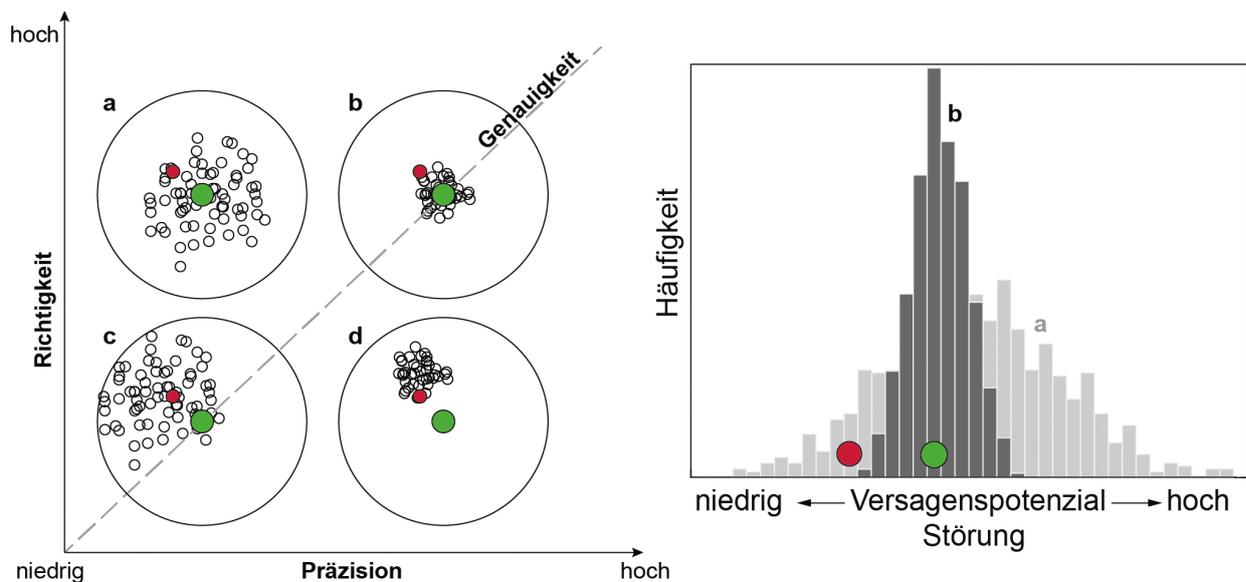


Abb. 3: Durch Variation der Modellparameter erhält man eine Vielzahl von Modellergebnissen (Simulationen). Eine einzelne Simulation (roter Punkt) sagt wenig darüber aus, wie zuverlässig das Modell ist. Werden viele Simulationen dargestellt, sollte sich eine Verteilung um den wahren, aber unbekanntem Wert (grüner Punkt) ergeben. Eine hohe Präzision und hohe Richtigkeit ergeben eine hohe Genauigkeit der Modellvorhersage. Die beiden Histogramme zeigen Verteilungen mit geringer (hellgrau) und höherer (dunkelgrau) Präzision.

ab, wie für die Fälle a und b in Abb. 3 gezeigt, da die Streuung der Modellergebnisse verringert wurde.

Um eine hohe Präzision der Modellvorhersage des natürlichen gegenwärtigen Spannungszustands zu erhalten, müssen im betrachteten Modellvolumen an genügend Punkten Daten zum Spannungszustand aus Bohrlochmessungen vorliegen, an die das Modell angepasst wird (Hergert et al., 2015). Je mehr Daten mit hoher Zuverlässigkeit im Modellvolumen vorliegen, desto genauer und somit zuverlässiger ist die Vorhersage der kontinuierlichen Beschreibung des 3D-Spannungsfelds (Ziegler und Heidbach, 2020).

Die größten Herausforderungen der Modellierung sind dabei nicht die numerischen Werkzeuge oder die Rechenleistung, sondern die Verfügbarkeit von zuverlässigen Daten. Dies gilt insbesondere für die Gesteinseigenschaften und deren räumliche Verteilung im Untergrund und, noch wichtiger, Daten zum Spannungsfeld aus Bohrungen, um das Modell an diese anzupassen (Morawietz et al., 2020; Heidbach et al., 2018; Reiter et al., 2015). Nur wenn diese Daten in

ausreichender Qualität und Anzahl zur Verfügung stehen, können die Ungewissheiten der Modellvorhersage auf ein für einen Endlagerstandort ausreichendes Niveau reduziert werden. Da die Kosten der Bohrungen hoch sind, müssen im Vorfeld intelligente Beprobungsstrategien entwickelt werden, um herauszufinden, wie viele Bohrungen an welchen Stellen notwendig sind. Erste Strategien werden derzeit am GFZ entwickelt und können in Zukunft mit Bohrlochdaten aus der Endlagerstandortsuche in der Nordschweiz getestet werden.

Ausschlusskriterium seismische Aktivität

Das Reaktivierungspotenzial von Störungen und die daraus resultierenden Erdbeben können die Standortsicherheit eines Endlagers beeinträchtigen. Um dies auszuschließen, sind im Standortauswahlgesetz in § 22 die zwei Ausschlusskriterien „aktive Störungszonen“ und „seismische Aktivität“ definiert. Das erste soll Gebiete ausschließen, in denen Bewegung an Störungen in den vergangenen 34 Millionen Jahren stattgefunden haben und somit die Barrierewirkung

beeinträchtigen könnten. Dies setzt voraus, dass diese Störungen vollständig in einem potenziellen Standortgebiet erfasst sind. Das zweite Kriterium soll die potenzielle Schadenswirkung durch Erdbeben auf einen Endlagerstandort ausschließen. Es werden daher Gebiete ausgeschlossen, in denen die seismische Gefährdung größer ist, als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01.

Allerdings ist der Kontext, in dem die Einteilung Deutschlands in Erdbebenzonen im genannten Nationalen Anhang (NA 2011-01) zur Baunorm erfolgt, die Bereitstellung von Lastannahmen aufgrund seismischer Wellen für normale Hochbauten an der Erdoberfläche (Grünthal et al., 2018). Innerhalb der Erdbebenzonen gelten Bodenbeschleunigungen in m/s^2 , die an der freien Erdoberfläche mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % innerhalb von 50 Jahren, d. h. der typischen Standzeit normaler Hochbauten, erwartet werden. Diesem Gefährdungsniveau entspricht eine mittlere Wiederholungsperiode dieser erwarteten Bodenbeschleunigungen von 475 Jahren. Bei oberirdischen kerntechnischen Anlagen

” Eine Spannungsgefährdungskarte Deutschlands führt die Ausschlusskriterien aktive Störungszonen und seismische Aktivität zusammen.

werden ebenfalls 50 Jahre Standzeit angenommen, aber die zu verwendenden Überschreitenswahrscheinlichkeiten von Erdbeben liegen um Größenordnungen niedriger, um auch extrem unwahrscheinliche Erdbeben zu berücksichtigen. Praktisch heißt das, dass für oberirdische kerntechnische Anlagen Bodenbeschleunigungen von extrem selten auftretenden Erdbeben berücksichtigt werden müssen, um die Sicherheit der Anlagen zu gewährleisten.

Da jedoch die Grundlage der Heranziehung von Baunormen zum erdbebengerechten Konstruktionsentwurf stets Bodenbeschleunigungen seismischer Wellen an der freien Erdoberfläche sind, ist die Herangehensweise im Ausschlusskriterium seismische Aktivität, also die Verwendung der Erdbebenzonen für die untertägigen Bereiche eines Endlagers, ungeachtet der gewählten Überschreitenswahrscheinlichkeiten, im Grundsatz falsch. Das Endlager liegt unter der Erde, sodass die Wirkung von seismischen Wellen eine ganz andere ist, als an der freien Erdoberfläche. Die Amplituden der seismischen Wellen halbieren sich im Gegensatz zu denen an der freien Oberfläche. Hinzu kommt, dass Bauwerke untertage im Gegensatz zu einem Gebäude an der Erdoberfläche nicht frei schwingen können, da sie von Gestein umgeben sind. Daher werden die Erdbebenzonen auch in anderen Ländern nicht als Kriterium für die Standortsuche verwendet.

Die eigentliche seismische Gefährdung ist nicht die Bodenbewegung, sondern sind die Spannungsänderungen, die von

Erdbeben in der Nähe eines potenziellen Endlagerstandorts hervorgerufen werden. Hinzu kommt die direkte Wirkung der seismischen Welle, also die dynamische Spannungsänderung. Für beide Fragen ist die Quelle, also die Lage und Größe des Erdbebens und dessen Abstrahlcharakteristik, von großer Bedeutung, um die möglichen Auswirkungen auf die Integrität eines Endlagers zu beurteilen. Das entscheidende Kriterium, das auch die Gefährdung durch Erdbeben und ihren Wirkungen im Untergrund einschließt, besteht in der Einhaltung einer kritischen, nicht zu unterschreitenden Distanz zu aktiven tektonischen Störungen, was mit dem zweiten Ausschlusskriterium aktive Störungszonen bereits aufgegriffen wird. Wie groß diese kritische Distanz zu Störungen, an denen Erdbeben stattfinden könnten, sein muss und ob alle maßgeblichen aktiven Störungszonen bekannt und ausreichend präzise kartiert sind, ist hierbei eine entscheidende und zu klärende Frage. Ebenso muss abgeschätzt werden, wie die Störung im Spannungsfeld orientiert ist, sodass probabilistisch abgeschätzt werden kann, welches maximale Erdbeben an einer Störung zu erwarten ist und welche Auswirkung dieses Erdbeben auf einen Endlagerstandort hat.

Ausblick – Eine Spannungsgefährdungskarte für Deutschland

Da aktive tektonische Störungen die Quelle von Erdbeben sind, können die beiden Ausschlusskriterien seismische Aktivität und aktive Störungszonen nicht

unabhängig voneinander betrachtet werden. Der Erdbebenkatalog für Deutschland gibt Aufschluss darüber, wo die seismische Aktivität hoch ist. Der Katalog basiert auf knapp 100 Jahren instrumenteller Beobachtungen sowie auf Berichten von Schäden durch Starkbeben der vergangenen 1000 Jahre (Grünthal und Wahlström, 2012). Letztere sind mit großen Unsicherheiten in Magnitude und Lage behaftet. Daher ist es nicht möglich vorherzusagen, wo in den nächsten eine Million Jahren Erdbeben mit welcher Magnitude auftreten. Es ist jedoch möglich, probabilistische Abschätzungen vorzunehmen und diese mit der Orientierung der bekannten Störungen und der Orientierung des Spannungsfelds zu verknüpfen. Hieraus kann eine Spannungsgefährdungskarte entwickelt werden, welche die Wahrscheinlichkeit vorher zu definierender statischer und dynamischer Spannungsänderungen beinhaltet. Wie wahrscheinlich ein einzelnes Szenario ist, kann aus einer einzelnen Simulation, wie sie als Beispiel in Abb. 4 gezeigt wird, nicht bestimmt werden. Hierzu sind tausende notwendig, die sich durch die Variation der Modellparameter und Modellannahmen unterscheiden. Diese Ensembles von Simulationen können mit etablierten statistischen Methoden bewertet werden; der Transfer, d. h. die Kombination beider Welten, also der Deterministik und Probabilistik, ist eine Herausforderung für zukünftige Forschungsarbeiten zur „Erdbebengefährdung und dynamischen Risiken“ am Deutschen Geoforschungszentrum GFZ.

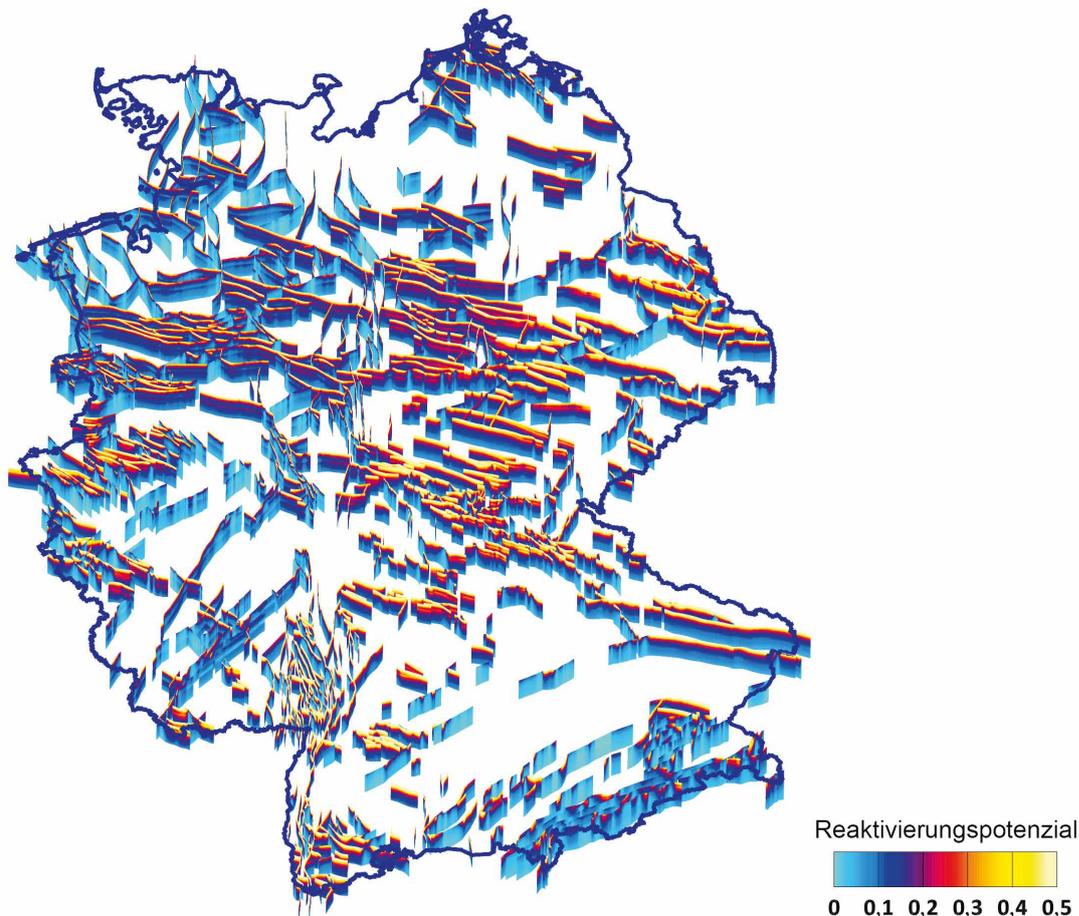


Abb. 4: Umrechnung einer Modellsimulation des 3D-Spannungsfelds aus dem Deutschlandmodell von Ahlers et al. (2021) in das Reaktivierungspotenzial von tektonischen Störungen. Die Ergebnisse sind im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts SpannEnD – Spannungsmodellierung Endlagerung Deutschland (spannend-projekt.de; Förderkennzeichen 02E11637A) entstanden und werden aktuell zur Publikation vorbereitet.

Literatur

- Ahlers, S., Henk, A., Hergert, T., Reiter, K., Müller, B., Röckel, L., Heidbach, O., Morawietz, S., Scheck-Wenderoth, M., Anikiev, D. (2021). 3D crustal stress state of Germany according to a data-calibrated geomechanical model. *Solid Earth*, 12 (8), 1777–1799. <https://doi.org/10.5194/se-12-1777-2021>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018). Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands - Version 2016 - für DIN EN 1998-1/NA. *Bautechnik*, 95 (5), 371–384. <https://doi.org/10.1002/bate.201700098>
- Grünthal, G., Wahlstrom, R. (2012). The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *Journal of Seismology*, 16 (3), 535–570. <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9302-y>
- Heidbach, O., Rajabi, M., Cui, X., Fuchs, K., Müller, B., Reinecker, J., Reiter, K., Tingay, M., Wenzel, F., Xie, F., Ziegler, M. O., Zoback, M.-L., Zoback, M. (2018). The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744, 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
- Hergert, T., Heidbach, O., Reiter, K., Giger, S. B., Marschall, P. (2015). Stress field sensitivity analysis in a sedimentary sequence of the Alpine foreland, northern Switzerland. *Solid Earth*, 6 (2), 533–552. <https://doi.org/10.5194/se-6-533-2015>
- Kühn, M., Hennig, T., Heidbach, O., Scheck-Wenderoth, M. (2021). Modelle simulieren die Zukunft. *System Erde*, 11 (2), 30–35. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.5>
- Morawietz, S., Heidbach, O., Reiter, K., Ziegler, M., Rajabi, M., Zimmermann, G., Müller, B., Tingay, M. (2020). An open-access stress magnitude database for Germany and adjacent regions. *Geothermal Energy*, 8 (1). <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00178-5>
- Ott, R. F., Gailleton, B., Malatesta, L. C., Becker, L., Braun, J. (2021). Stabilität über eine Million Jahre. *System Erde*, 11 (2), 36–41. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.6>
- Reiter, K., Heidbach, O., Reinecker, J., Müller, B., Röckel, T. (2015). Spannungskarte Deutschland 2015. *Erdöl Erdgas Kohle*, 131 (11), 437–442. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_1361435
- Ziegler, M. O., Heidbach, O. (2020). The 3D stress state from geomechanical-numerical modelling and its uncertainties: a case study in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermal Energy*, 8 (1). <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00162-z>

Licht ins Dunkel bringen

Stefan Lüth¹, Roman Esefelder^{1,2}, Heike Richter^{1,2}, Katrin Jaksch¹, Benjamin Schwarz¹, Britta Wawerzinek¹, Rüdiger Giese¹, Charlotte M. Krawczyk^{1,2}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² TU Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Berlin

Die Mindestanforderungen des Standortauswahlgesetzes stellen hohe Ansprüche an die physikalischen Eigenschaften des Wirtsgesteins an einem möglichen Endlagerstandort. Geophysikalische Verfahren können ein strukturelles Abbild des Untergrunds liefern und diesen beschreiben, von der Erdoberfläche bis in die Tiefe des Endlagers und darunter. Für die Erkundung eines Endlagerstandorts sind hochauflösende Verfahren notwendig, die weit über Standardmethoden der seismischen und geologischen Untersuchungen hinausgehen.

Das Standortauswahlgesetz (StandAG) definiert Mindestanforderungen an die Eigenschaften und die geometrische Anordnung des Wirtsgesteins an einem Endlagerstandort. Die Gesteinsformation, die den hochradioaktiven Abfall aufnehmen soll, muss mindestens 100 m mächtig sein und mindestens 300 m unter der Geländeoberfläche liegen. Sie muss außerdem eine ausreichende flächenhafte Ausdehnung aufweisen, um das gesamte Endlager und alle damit verbundenen Bauwerke (z. B. auch ein unter Umständen erforderliches Bergungsbergwerk) aufnehmen zu können. Innerhalb dieser Gesteinsformation muss die Vorkundung sicherstellen, dass die geologischen Strukturen die langfristige Stabilität und das Rückhaltevermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht beeinträchtigen. Dies können Schwächezonen wie z. B. Störungen oder interne Unregelmäßigkeiten (Heterogenitäten) innerhalb der Formation sein.

Kernaussagen

- Die **seismische Vorkundung** eines potenziellen Endlagerstandorts liefert zerstörungsfrei ein detailliertes **strukturelles und physikalisches Abbild** des Untergrunds.
- Die **begrenzte räumliche Auflösung der Oberflächenerkundung** wird **untertägig** ergänzt. Die in **verschiedenen Untertagelaboren validierte Seismik** erlaubt die Abbildung und physikalische Charakterisierung von kleinräumigen Strukturen, die von der Oberfläche nur unzureichend sichtbar gemacht werden können.
- Es werden neue Auswertemethoden entwickelt, die eine **verbesserte Abbildung** von internen Strukturen wie **Störungen oder Schwächezonen** innerhalb geologischer Formationen erlauben.

Modellierungen für die Langzeitprognose der Entwicklung eines Endlagerstandorts sind auf eine möglichst genaue Beschreibung des „Ist-Zustands“ in einem statischen Modell (Lage und Geometrie des

einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der darüber liegenden Schichten sowie ihrer physikalischen Eigenschaften) angewiesen (Kühn et al., 2021, S. 30 in diesem Heft).



Abb. 1: Untertägige seismische Messungen bringen Licht ins Dunkel. In einem Salzbergwerk wurden so durch das GFZ Umfelderkundungen durchgeführt. Vordergrund: Digitale Datenaufzeichnung; Hintergrund: Anregung seismischer Signale durch eine auf einen Gabelstapler montierte Vibrationsquelle (Foto: R. Giese, GFZ)

Ein für die Endlagerung hochradioaktiven Abfalls in Frage kommender Standort muss also umfassend erkundet werden, und dies soll möglichst „zerstörungsfrei“ geschehen, also ohne das zu untersuchende Wirtsgestein anzubohren und so Risse und Klüfte zu schaffen. Deshalb sind im Rahmen der übertägigen Erkundung durchgeführte geophysikalische (seismische) Messungen ein wichtiges Werkzeug zur Untergrundabbildung eines möglichen Endlagerstandorts. Diese können durch untertägige, seismische Messungen ergänzt werden, die eine höhere Auflösung von Strukturen im unmittelbaren Umfeld eines potenziellen Endlagers ermöglichen (Abb. 1).

Seismische Abbildung von Störungen

Als klassisches geophysikalisches Verfahren liefert die Reflexionsseismik hochaufgelöste strukturelle Abbilder des Untergrunds. Sie findet seit mittlerweile über 50 Jahren verlässlich Einsatz in der Prospektion. Insbesondere in Sedimentbecken, welche für die Erkundung und Erschließung von Kohlenwasserstoffen von zentraler Bedeutung sind, ermöglicht die Reflexionsseismik detaillierte Rekonstruktionen von Schichtgrenzen, die eine wichtige Grundlage für die Inter-

pretation und die Modellbildung darstellen (Doornebal und Stevenson, 2010; Ziesch et al., 2017). Während reflektierte Wellenfelder eine ausgezeichnete vertikale Auflösung in der Oberflächenseismik ermöglichen, ist das laterale Auflösungsvermögen physikalisch begrenzt, was zur Folge hat, dass kleinräumige Heterogenitäten nur unzureichend abgebildet werden können. Zudem ist es insbesondere schwierig, steilstehende Strukturen mit einer typischen Messanordnung verlässlich zu rekonstruieren.

Begünstigt durch die Erhebung immer größerer und dichter Datensätze, werden vor allem im Rahmen von Forschungsarbeiten neben Reflexionen an Schichtgrenzen vermehrt schwache, an kleinräumigen Diskontinuitäten rückgestreute Wellenfelder untersucht, die in herkömmlichen Bearbeitungsschritten gewöhnlich unterdrückt werden. Diese sogenannten Diffraktionen (siehe Infobox Reflexionen und Diffraktionen S. 23) haben trotz ihrer Schwäche die einzigartige Eigenschaft, dass die Streuung in guter Näherung gleichförmig in alle Richtungen erfolgt. Dadurch kann auch mit wenigen Empfängern an der Oberfläche eine ausreichende Beleuchtung von beliebig steilstehenden Strukturen gewährleistet werden (Schwarz, 2019).

Lokalisierte Heterogenitäten, deren laterale Ausmaße sich im Bereich oder unterhalb der seismischen Wellenlänge bewegen, zeichnen sich durch die Erzeugung von diffraktierten Wellenfeldern aus, die mit modernen, speziell zugeschnittenen Bearbeitungsmethoden ausgewertet werden können. Insbesondere treten Diffraktionen vermehrt an Brüchen und Störungen auf, deren genaue strukturelle Beschreibung in direktem Zusammenhang mit der wichtigen Abschätzung der Durchlässigkeit für Fluide und von Gefahrenpotenzialen steht (Schwarz und Krawczyk, 2020).

Abbildung 2 zeigt einen Vergleich einer herkömmlichen reflexionsbasierten Untergrundabbildung (a) mit einer Rekonstruktion basierend auf Diffraktionen (b) für einen industriellen seismischen Datensatz, der vor der Küste Israels im Levantebecken aufgezeichnet wurde (Schwarz und Krawczyk, 2020). Abgebildet sind oberflächennahe, weitgehend ungestörte, horizontale Reflektoren, eine darunter angeschlossene ältere Schicht resultierend aus chaotischer Sedimentation durch turbulente Bodenströmungen, sowie tiefer liegende, ältere Sedimentgesteine, die von durch Salztektonik verursachten Störungen (S1 bis S4 in Abb. 2) durchzogen sind. Während herkömmliche Reflexionsabbilder



Kontakt: Stefan Lüth
(slueth@gfz-potsdam.de)

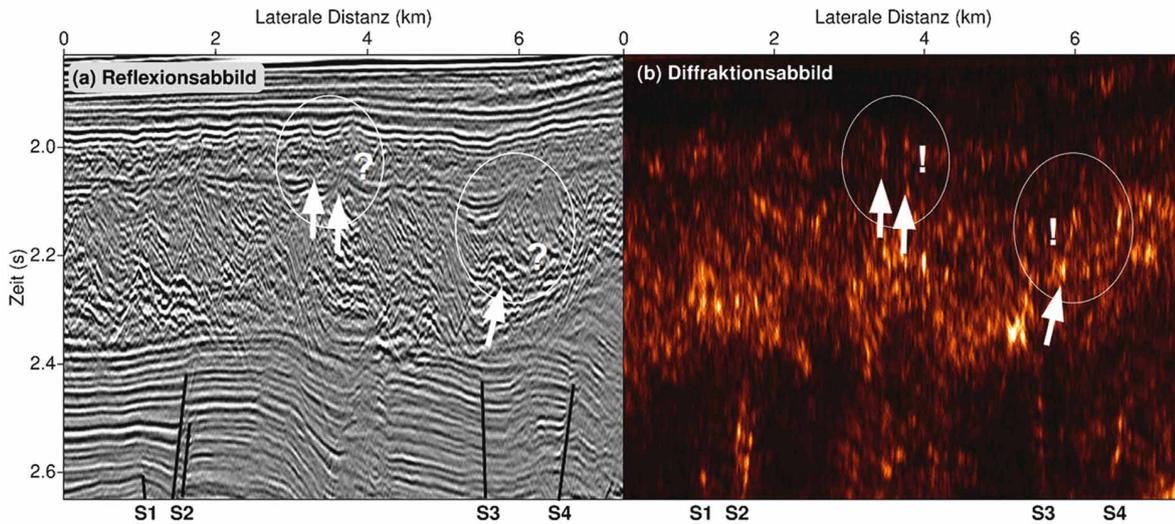


Abb. 2: Vergleich von seismischen Abbildungstypen im Levantebecken mit a) konventioneller Reflexionsabbildung nach Kirchhoff-Migration und b) neuartiger Diffraktionsabbildung. Komplementär werden horizontale Strukturen und Schichtgrenzen (a) sowie Störungen (S1 bis S4) und Heterogenitäten (b) hervorgehoben. Die weißen Ellipsen markieren beispielhaft Bereiche mit Störungen, die in der konventionellen Migration kaum interpretierbar sind (nach Schwarz und Krawczyk, 2020). Im Diffraktionsbild (b) sind diese als steilstehende, lineare Elemente zu erkennen.

oft nur indirekt über kleinräumige Heterogenitäten Aufschluss geben, kann mit Diffraktionen ein hochaufgelöstes, direktes Abbild von Bruch- und Störungszonen gewonnen werden, auch wenn diese selbst keine seismische Aktivität aufweisen. Die in Abb. 2 angedeuteten komplementären Eigenschaften reflexions- und diffraktionsbasierter Rekonstruktionen des Untergrunds begünstigen eine gemeinsame, integrierte Auswertung im Rahmen der Standortsuche für ein Endlager.

Seismik im Untertagelabor

Die Kombination von übertägig aufgenommener Reflexionsseismik und Detailinformationen aus einzelnen Vertikalbohrungen hat bei der Erkundung und Überwachung von Erdöl- und Erdgasreservoirs, in der Geothermie (Krawczyk et al., 2019) oder auch der geologischen Speicherung von CO₂ (Lüth et al., 2017) umfassende Daten zur Erstellung von Modellen und zur Beschreibung von Prozessen in den Reservoirs beigetragen. Ein Endlagerbergwerk muss über die

mehrere Jahrzehnte dauernde Einlagerungsphase sicher betrieben werden und, zusammen mit dem umgebenden Wirtsgestein, eine sichere Verwahrung des Abfalls über einen noch viel längeren Zeitraum gewährleisten. Deshalb ist eine sehr detaillierte Erkundung des betreffenden Standorts erforderlich, die ein rein übertägiger Ansatz nicht leisten kann.

Um die Lücke zwischen der relativ großräumigen Erkundung von der Oberfläche und den punktuell gesetzten Vertikalbohrungen (die an einem möglichen Endlagerstandort auf ein Minimum reduziert sein sollten) zu schließen, hat das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ ein modulares seismisches Erkundungssystem entwickelt (Giese et al., 2021). Dieses System erlaubt die Erkundung im Vor- bzw. Umfeld eines untertägigen Bauwerks (Tunnel, Stollen und Bergwerk) und ermöglicht über die Integration von flexiblen seismischen Quellen in verschiedenen Größen Messungen vom Tunnel oder Stollen aus. Die wesentlichen Komponenten dieses Messsystems sind kompakte seismische Quellen

(Impulsanregung sowie Anregung von exakt definierten Vibrationssignalen) sowie in Felsanker integrierte seismische Empfänger. Weitere bohrlochgestützte Quellen und Empfänger erlauben die Erweiterung der Messgeometrie um kurze Erkundungsbohrungen (bis rund 120 m Bohrlochtiefe) im Umfeld der Bauwerke.

Beispiele der reflexionsseismischen Abbildung von Strukturen im direkten Umfeld von unterirdischen Bauwerken, einem Stollen im Kristallingestein (Schweizer Alpen, Richter et al., 2018), einem Salzbergwerk im Werra-Revier in Hessen (Giese et al., 2021), sowie einem Felslabor im Tonstein (Mont Terri, Schweiz, siehe Infobox S. 21) sind in Abb. 3 zu sehen. Für diese Untersuchungen wurden mit Hilfe des am GFZ entwickelten untertageseismischen Systems (Systembeschreibung unter: <https://www.3duslab.com/>) Messungen in den unterirdischen Bauwerken durchgeführt. Eine noch genauere Charakterisierung der physikalischen Eigenschaften des Gesteins im Umfeld eines Bergwerks oder Stollens wird mit Hilfe der seismischen Tomographie erreicht (Abb. 5).

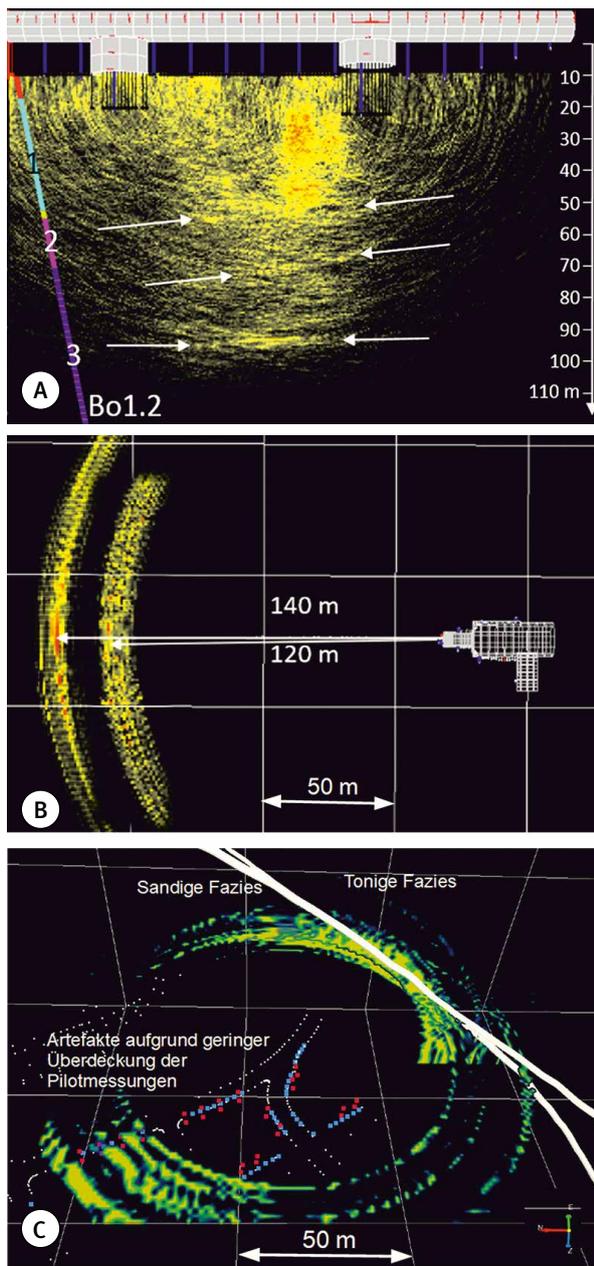


Abb. 3: Reflexionsseismische Umfeldabbildung in der untertägigen Erkundung mit Beispielen aus dem A): Kristallin (Piora-Sondierstollen, Richter et al., 2018), B): Salzgestein (Werra-Revier, Giese et al., 2021) und C): Tonstein (Felslabor Mont Terri). In allen drei geologischen Umgebungen ist eine strukturelle Abbildung prinzipiell möglich. Im Vordergrund steht dabei insbesondere die Detektion und Ortung von Heterogenitäten (z. B. potenziell wasserführenden Störungszonen) innerhalb einer Gesteinsformation.



Untertagelabore – Das Beispiel Mont Terri



Abb. 4: Seismische Messungen unter Tage im Felslabor Mont Terri (Foto: K. Krüger, GFZ)

Untertägige Labore werden in Gesteinsformationen eingerichtet, die sich grundsätzlich für die Endlagerung radioaktiver Abfälle eignen. Sie sind wichtig, um unter kontrollierten und gleichzeitig natürlichen Randbedingungen das komplexe Verhalten von Endlagersystemen zu untersuchen. Ein Beispiel hierfür ist das Felslabor Mont Terri, das seit 1996 unter der Leitung des Schweizer Bundesamts für Landestopographie (swisstopo) besteht (Abb. 4). Es befindet sich im Kanton Jura, nahe der Kleinstadt Saint-Ursanne. Für das Felslabor wurden rund 1200 m Stollen und Nischen aufgeföhrt, um eine Forschungsplattform für verschiedenste Experimente im Opalinuston zur Verfügung zu stellen.

Neben der Endlagerung werden im Rahmen eines internationalen Forschungsprojekts auch Experimente zu anderen geowissenschaftlichen Themen, z. B. zur geologischen CO₂-Speicherung, durchgeführt. Das Mont-Terri-Projekt besteht aus 22 Mitgliedern aus neun Nationen und wird durch swisstopo koordiniert. Die Partner sind für die Finanzierung und Durchführung der wissenschaftlichen Experimente im Felslabor verantwortlich. Die Helmholtz-Gemeinschaft, vertreten durch GFZ, UFZ, KIT, FZ Jülich und HZDR, ist seit dem 1. Juli 2018 Mitglied des Projekts. Neben der geophysikalischen Erkundung (siehe dieser Beitrag) sind die Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft an verschiedenen Experimenten zur Hydrogeologie, Mikrobiologie und zur Geochemie eines Endlagerkomplexes beteiligt.

Mehr Informationen auf der Website:

<https://www.mont-terri.ch/>

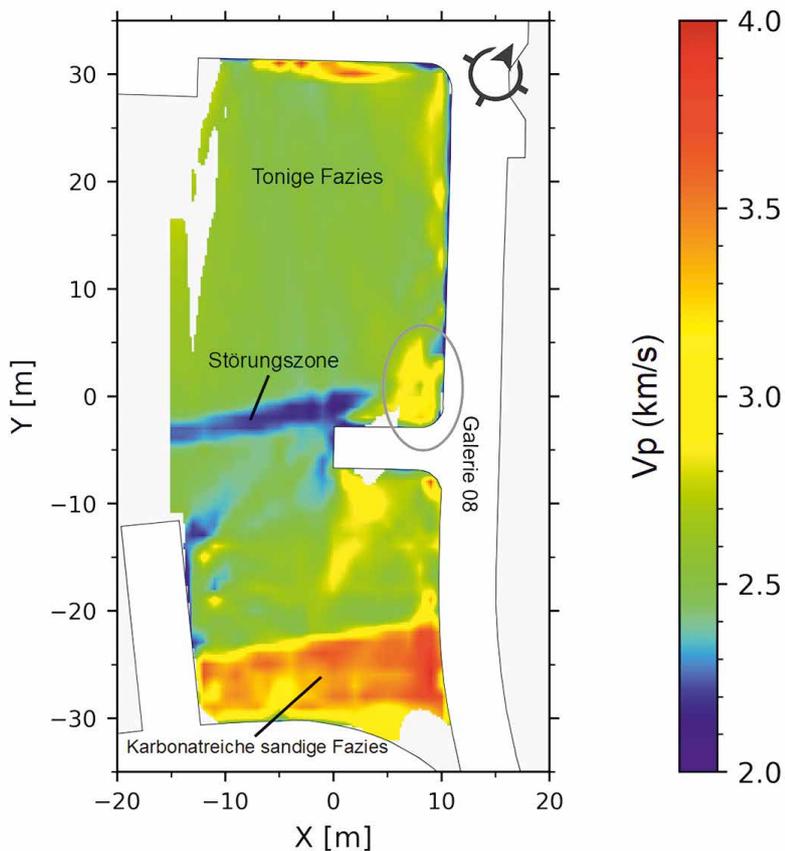


Abb. 5: Tomographische Durchschallung eines Teils der Tonsteinformationen im Mont-Terri-Felslabor. Anhand unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen (V_p) lassen sich verschiedene Typen des Opalinustons unterscheiden. Eine Störungszone ist durch besonders niedrige seismische Geschwindigkeiten gekennzeichnet. Im Verlauf der Störungszone befindet sich ein Gebirgsbereich, der von den tomographischen Messungen nicht gut abgebildet werden konnte (markiert durch eine Ellipse) und daher zu hohe seismische Geschwindigkeiten aufweist.

Für diese „Durchschallung“ wurden seismische Messpunkte um das zu untersuchende Gestein herum platziert, sodass eine direkte Analyse der Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen in diesem Gesteinskomplex ermöglicht wurde. Die Verteilung von Geschwindigkeiten in diesem Gesteinskomplex erlaubt die Erkennung von mechanisch stabilen und weniger stabilen Zonen. Aus dem seismischen Tomogramm lässt sich ein präzises geologisches Modell des direkten Umfelds eines Endlagers konstruieren. Eine wiederholte Durchführung dieser Durchschallungsmessungen erlaubt außerdem eine Überwachung des betreffenden Gesteinskomplexes, z. B. im Rahmen weiterer Baumaßnahmen oder in der frühen Phase der Einlagerung hochradioaktiven und Wärme entwickelnden Abfalls.

Fazit und Ausblick

Die seismische Erkundung von der Erdoberfläche ist eine der wesentlichen Komponenten der übertägigen Standorterkundung im Rahmen der Suche nach einem geeigneten Endlagerstandort für hochradioaktiven Abfall. Das Standortauswahlgesetz führt in seinen Mindestanforderungen Kriterien auf, welche die bisher eingesetzten seismischen Erkundungsverfahren vor neue Herausforderungen stellen. Die Auswertung der übertägigen Erkundung muss einen starken Fokus auf die Erkennung von Störungszone und anderen geologischen Strukturen, die einen negativen Einfluss auf die langfristige Stabilität eines Endlagers haben können, legen. Es existieren vielversprechende Ansätze zur Abbildung solcher kleinräumigen Strukturen, die, anders als die klassische reflexionsseismische Erkundung, noch keine breite

Anwendung außerhalb der Forschung gefunden haben. Eine Validierung dieser Ansätze mit weiteren Datensätzen sowie mit synthetischen Modellrechnungen unter besonderer Berücksichtigung von realistischen Szenarien für mögliche Strukturen eines Endlagerstandorts wird eine wichtige künftige Forschungsfrage sein. Aufgrund der physikalisch bedingten Begrenzungen der übertägigen Erkundung (Frequenz, Wellenlänge), werden auch fortgeschrittene Abbildungsverfahren möglicherweise nicht alle für ein unterirdisches Endlagergebäude kritischen Strukturen erfassen. Deshalb bleibt die untertägige Erkundung, mit zwar geringeren Reichweiten, dafür aber auch aufgrund der höheren Signalfrequenzen deutlich besserer Auflösung, ein weiterer wichtiger Baustein bei der Erkundung und auch Überwachung eines möglichen Endlagerstandorts.

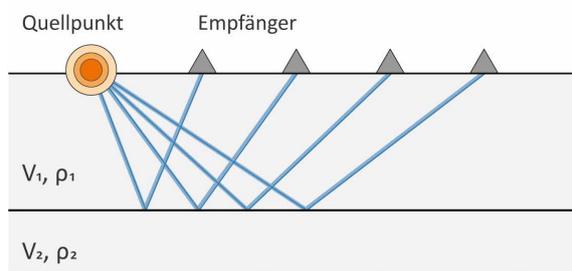


Reflexionen und Diffraktionen

In der seismischen Erkundung werden elastische Wellen verwendet, die von seismischen Quellen an oder nahe der Erdoberfläche angeregt wurden. An geologischen Schichtgrenzen, an denen sich die elastischen Eigenschaften (Geschwindigkeit V und Dichte ρ) der Gesteine ändern, wird ein Teil des elastischen Wellenfelds reflektiert. An Störungszonen oder anderen kleinräumigen Unregel-

mäßigkeiten im Untergrund treten Diffraktionen auf, d. h., das auf diese Unregelmäßigkeiten auftreffende Wellenfeld wird in alle Richtungen zurück gestreut (Abb. 6). Bei der konventionellen seismischen Datenbearbeitung werden die reflektierten Wellenfeldanteile hervorgehoben, während diffraktierte Anteile gezielt unterdrückt werden.

REFLEXION



DIFFRAKTION

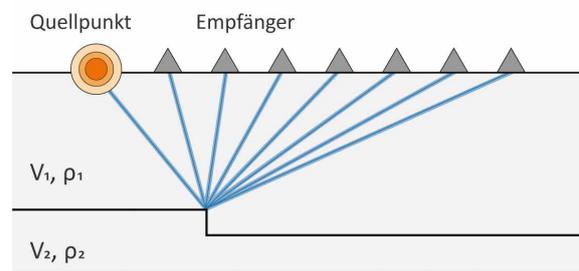


Abb. 6: Laufwege seismischer Wellen vom Quellpunkt zu seismischen Empfängern bei Reflexion (links) und Diffraktion (rechts)

Literatur

- Doornenbal, H., Alan, S., European Association of Geoscientists Engineers (Eds.). (2010). *Petroleum geological atlas of the Southern Permian Basin Area*. EAGE.
- Giese, R., Lüth, S., Richter, H., Wawerzinek, B., Jaksch, K., Esefelder, R. (2021). *3D-Underground Seismics in crystalline, salt and clay rocks NSG2021 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120046>
- Krawczyk, C., Stiller, M., Bauer, K., Norden, B., Henniges, J., Ivanova, A., Huenges, E. (2019). 3-D seismic exploration across the deep geothermal research platform Groß Schönebeck north of Berlin/Germany. *Geothermal Energy*, 7 (1). <https://doi.org/10.1186/540517-019-0131-x>
- Kühn, M., Hennig, T., Heidbach, O., Scheck-Wenderoth, M. (2021). Modelle simulieren die Zukunft. *System Erde*, 11 (2), 30–35. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.5>
- Lüth, S., Bergmann, P., Huang, F., Ivandic, M., Ivanova, A., Juhlin, C., Kempka, T. (2017). 4D Seismic Monitoring of CO₂ Storage During Injection and Post-closure at the Ketzin Pilot Site. *Energy Procedia*, 114, 5761–5767. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1714>
- Richter, H., Hock, S., Mikulla, S., Krüger, K., Lüth, S., Polom, U., Dickmann, T., Giese, R. (2018). Comparison of pneumatic impact and magnetostrictive vibrator sources for near surface seismic imaging in geotechnical environments. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.08.010>
- Schwarz, B. (2019). An introduction to seismic diffraction. In C. Schmelzbach (Ed.), *Recent Advances in Seismology* (Vol. 60, pp. 1–64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agph.2019.05.001>
- Schwarz, B., Krawczyk, C. (2020). Coherent diffraction imaging for enhanced fault and fracture network characterization. *Solid Earth*, 11 (5), 1891–1907. <https://doi.org/10.5194/se-11-1891-2020>
- Ziesch, J., Aruffo, C. M., Tanner, D. C., Beilecke, T., Dance, T., Henk, A., Weber, B., Tenthorey, E., Lippmann, A., Krawczyk, C. (2017). Geological structure and kinematics of normal faults in the Otway Basin, Australia, based on quantitative analysis of 3-D seismic reflection data. *Basin Research*, 29 (2), 129–148. <https://doi.org/10.1111/bre.12146>

Gesteinseigenschaften geben den Ton an

Steffi Genderjahn¹, Anja M. Schleicher^{1,2}, Valerian Schuster¹, Julia Mitzscherling¹, Dirk Wagner^{1,2}, Erik Rybacki¹, Georg Dresen^{1,2}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des Standortauswahlgesetzes dienen der Beschreibung der geologischen Gesamtsituation der Wirtsgesteine, sowie der Bewertung potenzieller Standortregionen für ihre Eignung als Endlager. Tonsteine verfügen unter anderem über eine geringe Durchlässigkeit für Flüssigkeiten und Gase, sowie über ein großes Isolations- und Rückhaltevermögen für Radionuklide. Aufgrund dieser und anderer positiver Eigenschaften werden Tonsteine als Wirtsgestein für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Betracht gezogen.

Tonstein, Steinsalz und Kristallingesteine zählen zu den potenziellen Wirtsgesteinen für die geologische Endlagerung von hochradioaktiven Abfallstoffen in Deutschland. Um einen sicheren Einschluss zu gewährleisten, muss die Eignung der jeweiligen Gesteinstypen an jedem individuellen Standort unter Einbeziehung aller geologischen, geotechnischen und technischen Barrierekenntwerten geprüft und bewertet werden. Dazu dienen die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach dem Standortauswahlgesetz (§ 24 StandAG; Kühn et al., 2021, S. 6 in diesem Heft).

Bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden in allen Gesteinsarten bereits vorhandene Referenz- oder gebietsspezifische Datensätze herangezogen und mit neu erhobenen Daten und Forschungsansätzen

Kernaussagen

- **Tonsteine** eignen sich aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit für Flüssigkeiten und Gase sowie einer hohen **Rückhalteeigenschaft gegenüber Radionukliden** als geologische Barriere für ein Endlager.
- Die Interaktion von Quellverhalten, Druckspannung und Mineralausfällung kann Wegsamkeiten wie Risse im Tonstein verschliessen. Die **Rissverheilung** wird durch die mineralogische Zusammensetzung bestimmt und ist abhängig vom Verfestigungsgrad.
- **Heterogenitäten** der Tonsteinformationen in Deutschland erfordern im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens eine Überarbeitung der Datenlage und deren gebietsspezifische sowie regionalgeologische Vervollständigung.

vervollständigt. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf die gebirgsmechanischen Gesteinseigenschaften, den Transport radioaktiver Stoffe im Gestein aufgrund von Grundwasserbewegung oder Diffusion, die Bildung von Fluidweg-

samkeiten beispielsweise durch Rissbildung im Gestein, die Gasbildung, die Temperaturbeständigkeit, das Rückhaltevermögen für Radionuklide und die hydrochemischen Verhältnisse gelegt (BGE, 2020a).



Abb. 1: Aufschlussfenster der Hauptstörungszone im Untertagelabor Mont Terri in der Schweiz. Diese tektonische Störungszone verläuft durch die tonige Fazies des Opalinustons. Sie ist gekennzeichnet durch ein dichtes Netzwerk von Scherflächen und Aufschiebungen und bietet die Möglichkeit, mechanische und hydraulische Eigenschaften vor Ort oder mit Bohrkernen im Labor zu untersuchen. (Foto: A. Schleicher, GFZ)

Ton als potenzielles Wirtsgestein

Tonsteine sind Sedimentgesteine, die aus verschiedenen geologischen Prozessen der Verwitterung, der Erosion, des Partikeltransports und anschließender Sedimentation und Versenkung resultieren. Als unverfestigte Tone werden sie überwiegend in aquatischen Systemen wie Meeren, Seen und Flüssen abgelagert. Zu Tonsteinen werden sie, indem sie durch die Überlagerung immer stärker kompaktiert und verfestigt werden. In der Regel sind Tonsteine sehr feinkörnig und bestehen zu über 50 % aus Tonmineralen wie z. B. Illit, Kaolinit, Chlorit, Illit-Smektit-Wechselagerungen und Smektit. Weitere mineralogische und organische Bestandteile sind Quarz, Feldspat, Karbonat, Oxide, Sulfide sowie Kohlenstoffverbindungen (Abb. 1 und 2).

Ein Tonstein kann je nach Ablagerungs- und Versenkungstiefe unterschiedliche Verfestigungsgrade durchlaufen, wobei dieser gesteinsbildende Prozess (Diagenese) über einen langen geologischen Zeitraum von vielen Millionen Jahren erfolgt. Bei bestimmten Druck- und Temperaturverhältnissen kann es dabei zu Phasenveränderungen und Mineralumwandlungen im Gestein kom-

men. Mit zunehmender Versenkung und Temperatur verringert sich unter anderem der Anteil von Smektit-Tonmineralen im Tonstein, mit gleichzeitiger Zunahme von Illit-Smektit-Wechselagerungen und einem anschließenden Übergang zu Illit (Sucha et al., 1993). Der Smektitanteil im Gestein ist somit wichtig bei der Bestimmung der Versenkungstiefe und der Paläotemperaturen des ungestörten Wirtsgesteins, ändert sich jedoch maßgebend, wenn die Gesteine durch Bruchflächen oder Klüfte gestört wurden (Schleicher et al., 2009).

Aufgrund der ausgedehnten Sedimentation und Versenkung entstehen mit der Zeit Tonsteinformationen mit Mächtigkeiten von mehreren Metern bis über hundert Metern. Diese sind jedoch oftmals unterbrochen von Lagen aus sandigem, siltigem, mergeligem, karbonatischem oder organischem Material. Aufgrund der fein- bzw. feinstkörnigen Textur und der mineralogischen Zusammensetzung weisen Tonsteine viele günstige Eigenschaften als Wirtsgestein für ein Endlager auf. Unter anderem sind sie nur wenig durchlässig für Flüssigkeiten und Gase. Diese Durchlässigkeit (Permeabilität) kann jedoch regional sehr unterschiedlich sein und ist vor-

allem abhängig von der Verfestigung und der Ungestörtheit des Gesteins, sowie vom Tonmineralgehalt. Eine weitere günstige Eigenschaft ist das sehr gute Aufnahmevermögen (Adsorptionsverhalten) migrierender Radionuklide und anderer chemischer Schadstoffe vor allem an den Tonmineraloberflächen (BGE, 2020a).

Das plastische Verformungsverhalten von Tonsteinen kann zur Schließung von Rissen und Brüchen führen (Selbstabdichtung). Diese dauerhafte Verformbarkeit unter Belastung wird als Duktilität bezeichnet und wird stark von der mineralogischen Zusammensetzung und der Quellfähigkeit bestimmter Tonminerale wie Smektit beeinflusst. Bei entsprechendem Porenwasserangebot können diese Tonminerale das Wasser in den Zwischenschichten einbinden und dadurch die vorhandenen Wegsamkeiten regulieren.

Die oben genannten Eigenschaften der Tonsteine und deren Tonminerale sind alle stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Zum Beispiel haben Temperatur, Lösungsschemie und pH-Wert einen großen Einfluss auf das Quellverhalten bestimmter Tonminerale. Mit



Kontakt: Anja M. Schleicher
(aschleic@gfz-potsdam.de)



Abb. 2: Bohrkern aus der tonigen und der sandigen Fazies des Opalinustons, genommen während einer Bohrkampagne im Untertagelabor Mont Terri in der Schweiz. In der tonigen Fazies sind die einzelnen Minerale aufgrund der feinkörnigen Textur mit dem bloßen Auge nicht mehr erkennbar (unten rechts).
(Fotos: A. Schleicher und J. Mitzscherling, GFZ)

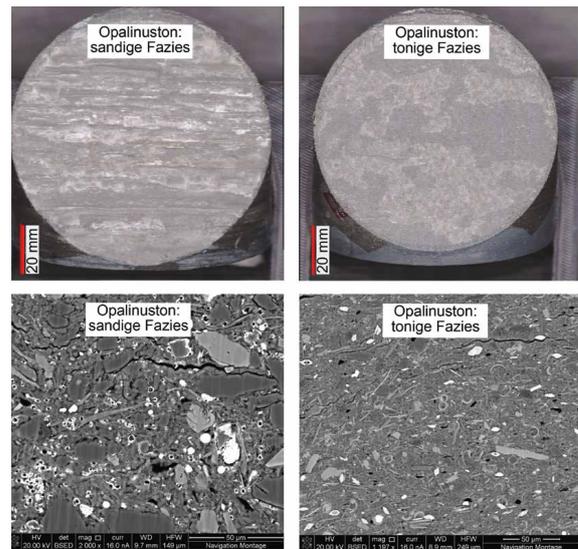


Abb. 3: Heterogenität der sandigen und der tonigen Fazies im Opalinuston aus dem Untertagelabor Mont Terri im Vergleich (Fotos: V. Schuster, GFZ)

steigender Temperatur verringert sich der Wassergehalt in den Zwischenschichten, und bei Temperaturen ab 120 °C kann es zu irreversiblen Phasenveränderungen kommen. Die Quellfähigkeit wird ebenfalls von der Salinität des Porenwassers oder dem gelösten Anteil organischer Substanzen beeinflusst. All diese Eigenschaften spielen, neben anderen gebirgsmechanischen Aspekten, auch bei der Festlegung der Maximaltiefe eines Endlagers eine große Rolle. Unter Berücksichtigung der Restwärme der Brennelemente und des geothermischen Gradienten sollte die Temperatur 100 °C nicht überschreiten. Die Mindestanforderungen nach StandAG legen eine Endlagertiefe ab 300 m fest, wobei eine Tiefe bis maximal 1500 m diskutiert wird (BGE, 2020b).

Tonsteinvorkommen in Europa und Deutschland

Tonsteine werden sowohl in Deutschland als auch in anderen Ländern in Europa als Wirtsgestein in Betracht gezogen, wenn sie den Richtlinien der jeweiligen

Länder entsprechen. Es kommen vor allem Tonsteinformationen aus dem Erdzeitalter des Jura, der Kreide und dem Tertiär in Betracht (BGE, 2020b). Dabei wird stets angenommen, dass das Endlager in jedem identifizierten Gebiet in einen Bereich mit möglichst homogenem Tonstein realisiert wird. Viele Tonsteinformationen sind jedoch sehr heterogen und können Lagen aus Sandstein, Mergel oder Karbonat beinhalten. Diese Heterogenität bedeutet, dass jede Tonformation, die für ein Endlager in Frage kommt, individuell untersucht und charakterisiert werden muss. Aufgrund der vorwiegend günstigen Eigenschaften des Tonsteins werden derzeit in Europa unterschiedliche Tonsteinformationen detailliert in Untertagelaboren untersucht.

Frankreich betreibt in Tournemire und in Bure Untertagelabore und untersucht Tonsteine aus dem Unteren Jura und aus der Callovo-Oxford-Formation des Oberen Jura. Dank internationaler Kooperationen können Forschungsergebnisse auf Juraformationen in Deutschland übertragen werden. Belgien forscht derzeit in einem

Untertagelabor in der Boom-Tonformation in Mol-Dessel. Der unverfestigte, oft heterogene Boom Clay ist mit dem Separienton (auch als Rupelton bezeichnet) Norddeutschlands vergleichbar.

Seit Juli 2018 ist die Helmholtz-Gemeinschaft Mitglied des internationalen Forschungsprojekts im Untertagelabor Mont Terri in der Schweiz. Unter Leitung des Schweizer Geologischen Dienstes swisstopo werden in diesem Felslabor im Nordosten der Schweiz die hydrogeologischen, geo(bio)chemischen und geotechnischen Eigenschaften des Opalinustons erforscht. Die Ablagerungen gehören zum Jura und haben ein Alter von 180 bis 200 Millionen Jahre. Aufgrund der großen mineralogischen Heterogenität wird der Opalinuston in Mont Terri in einen tonigen, sandigen und karbonatreichen Typ unterteilt (Abb. 3; siehe Lüth et al., 2021, S. 18 in diesem Heft). Diese so genannte Fazies sind das Resultat wechselnder Sedimentationsbedingungen wie Meerestiefe und Strömungsrichtung in einem flachen Meer von 20 bis 50 m Wassertiefe.

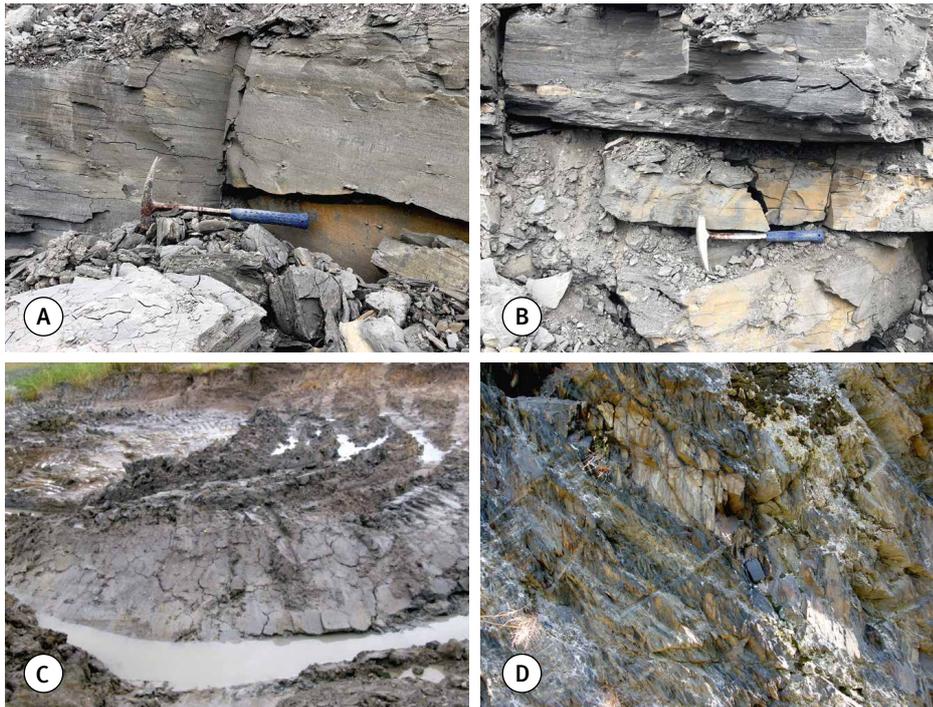


Abb. 4: Die mineralogischen und geochemischen Eigenschaften von Tonsteinen unterscheiden sich wesentlich: (a) und (b) anstehender Tonstein und Wechsellagerung aus mergeligem Ton bzw. tonigem Mergel aus der Tongrube Buttenheim, in der Lias Delta aus dem Jura aufgeschlossen ist. (c) Plastischer Ton aus der Tongrube Frielingen, in der Tone der Unterkreide (oberes Hauterive/unteres Barrem) anstehen. (d) Tonschiefer aus dem Rheinischen Schiefergebirge bei Braubach (Fotos: BGR Hannover)

Im Zwischenbericht Teilgebiete der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) wurden für Deutschland rund 130 000 km² der Bundesfläche als Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tonsteinformationen ausgewiesen (Vergleich Steinsalz: etwa 30 000 km² und kristallines Wirtsgestein 8100 km²) (BGE, 2020b). In Süddeutschland werden z. B. Tonsteine aus dem Mitteljura (Opalinuston-Formation) in der Schwäbischen Alb näher untersucht. In Norddeutschland finden sich tertiäre Tonvorkommen in etwa 60 % der Landesfläche, zudem wurden tonige Wirtsgesteine im Norddeutschen Becken in West-Mecklenburg und im Nordwesten Brandenburgs ausgewiesen.

Generell unterscheiden sich die mineralogischen und geochemischen Eigenschaften der jüngeren Tonsteine im Norddeutschen Becken wesentlich von denen der älteren, jurassischen Tonsteine im Alpenvorlandbecken. Dabei wird vor allem zwischen nicht verfestigtem oder halbfestem Ton und festem Tonstein unterschieden (Abb. 4). Unverfestigte Tone stammen in der Regel aus den jun-

gen erdgeschichtlichen Formationen des Tertiärs und Quartärs, wohingegen verfestigte tonige Sedimentgesteine hauptsächlich aus älteren geologischen Formationen des Meso- und Paläozoikums hervorgehen. Insbesondere im Hinblick auf die fazielle Variabilität der Tonsteinformationen ist es notwendig, die heterogene mineralogische Zusammensetzung, Durchlässigkeit, Porosität, den Diageneseegrad sowie die Wechsellagerungen mit anderen Sedimentgesteinen detailliert zu betrachten und weitere gebietsspezifische Daten bezüglich der Vorkommen von homogenen und heterogenen Tonsteinformationen zu erheben (Rausch, 2020).

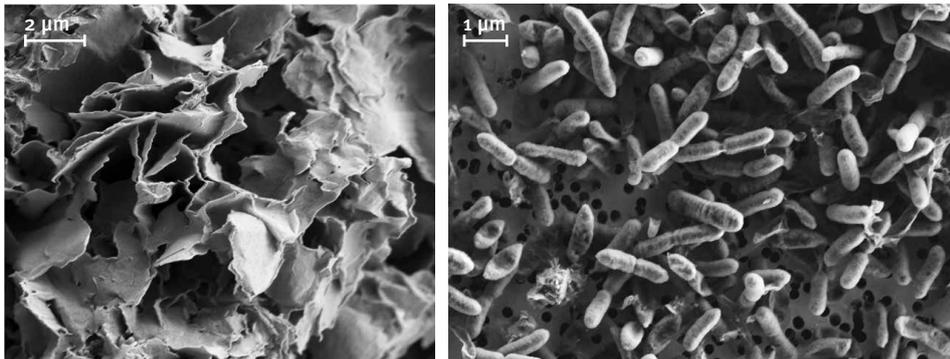
Geomechanische und mikrobiologische Charakterisierung

Forschende des Deutschen GeoForschungszentrums GFZ untersuchen die geomechanische, mineralogische, geochemische und mikrobielle Veränderung von Tonstein im Hinblick auf die oben genannten Abwägungskriterien in Europa und in Deutschland. Im Fokus

stehen dabei offene Fragen hinsichtlich Gesteinsdurchlässigkeit, Transportmechanismen, Erosionsraten sowie Element- und Fluidmobilisierung durch Lösungs- und Fällungsreaktionen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die Bedingungen für eine sichere Einlagerung von radioaktivem Abfall über eine Million Jahre herauszufinden und an den möglichen Standorten zu beurteilen. Im Vordergrund steht derzeit die Forschung an Bohrkernen der Opalinuston-Formation aus dem Untertagelabor Mont Terri (Schweiz; Lüth et al., 2021). Ein Teil der Forschung bezieht sich auf die räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Durchlässigkeit von Störungen im tonreichen Wirtsgestein, sowie auf Faktoren, die das lokale Spannungsfeld in der Schädigungszone von Endlager-Untertagebauwerken bestimmen. Von Interesse sind dabei vorrangig die Festigkeitseigenschaften der unterschiedlichen Fazies bei Temperaturen unter 200 °C, Rissverheilung und Risswachstum in anisotropen Tonsteinen. Bisherige Untersuchungen konzentrieren sich im Wesentlichen auf die sandige Fazies für die bislang, im Vergleich zur



Leben in der tiefen Biosphäre



*Abb. 5: Tonminerale und Organismen dargestellt mit der Rasterelektronenspektroskopie (REM) als bildgebendes Verfahren: Smektit-Tonminerale (links) und der Modellorganismus *Stenotrophomonas bentonitica* (rechts), welcher am GFZ eingesetzt wurde, um die Interaktion zwischen Ton und Bakterien zu erforschen. (Fotos: Matthias Schmidt, ProVIS, UFZ Leipzig)*

In den letzten Jahrzehnten haben verbesserte Messtechnologien ermöglicht, Mikroorganismen in Umgebungen nachzuweisen, die zuvor als lebensfeindlich galten. So ist es möglich, zusätzlich zu seismischen und geologischen Eigenschaften eines potenziell geeigneten Endlagerstandorts, biotische Prozesse in der tiefen unterirdischen Umgebung zu identifizieren und zu charakterisieren.

Lebensfähige (weitgehend ruhende) mikrobielle Gemeinschaften konnten beispielsweise in den Tonformationen Boom Clay und Opalinuston gefunden werden. Solche mikrobiellen Gemeinschaften können die Stabilität geologischer Gesteinsformationen beeinträchtigen, denn Mikroben besitzen die Fähigkeit, Gase wie Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff und Methan zu produzieren oder zu konsumieren. Durch anaerobe Korrosion von metallhaltigen Brennelementbehältern oder mikrobielle Vergärung organischer Verbindungen können große Gasmengen entstehen, die wiederum die Haltbarkeit der Lagerbehälter und das Wirtsgestein beeinträchtigen können.

In einem forschungsbereichsübergreifenden Projekt der Helmholtz-Gemeinschaft (iCross, siehe Seite 48 in diesem Heft) wird zudem daran geforscht, welche Rolle Mikroorganismen bei der Migration von Radionukliden spielen: hemmen oder fördern sie die Ausbreitung? Forschende des GFZ analysieren derzeit die mikrobielle Vielfalt im Opalinuston aus unterschiedlichen Tiefen. Die Herausforderung besteht darin, zu verstehen, welche mikrobiellen Aktivitäten in einem untertägigen Endlager ablaufen, wie sich diese über die Lebensdauer des Endlagers ändern können und welche positiven und negativen Auswirkungen sich daraus für die Integrität des Endlagers ergeben.

tonigen Fazies, wenig bekannt ist (Abb. 3). Geomechanische Laboruntersuchungen bei simulierten Drücken und Temperaturen bis zu mehreren Kilometern Tiefe zeigen, dass die sandige Fazies deutlich fester und elastisch steifer als die tonige Fazies ist. Trotz des relativ hohen Tongehalts ist das Deformationsverhalten trockener Proben eher spröde, was insbesondere für den untertägigen Ausbau relevant ist. Über längere (geologische) Zeiträume und im Fall des Eindringens von Fluiden erscheint spröde Deformation jedoch eher unwahrscheinlich. Andererseits zeigen Durchströmungsversuche an Proben mit simuliertem, präexistierendem Riss, dass die Rissverheilung stark von der mineralogischen Zusammensetzung bestimmt ist, was für die Durchlässigkeit von Tonstein als potenzielles Wirtsgestein wichtig ist (Schuster et al., 2021).

In mehreren Entsorgungskonzepten werden Bentonit-Tone als primäres Puffer- und Verfüllmaterial eingesetzt. Sie sind ein integraler Bestandteil der geotechnischen Barrieren zwischen Wirtsgestein

und mit radioaktivem Abfall beladenen Behältern. Am GFZ werden unter anderem die Wechselwirkungen zwischen Fluiden und Bakterien auf das Quellvermögen von Bentonit untersucht. Bislang konnte gezeigt werden, dass erhöhte Salzgehalte in Fluiden und veränderliche Temperaturen eine Minderung der Quellfähigkeit zur Folge haben. Die Quellfähigkeit von Tonsteinen kann durch viele Faktoren beeinflusst werden, einschließlich der Anwesenheit von Mikroorganismen. Während des Endlagerbaus werden Sauerstoff, Wasser, Hohlräume und Nährstoffe in das unterirdische System eingebracht, welche die mikrobielle Aktivität beeinflussen. Mikroorganismen können sich an extreme Umweltbedingungen wie hohe Temperaturen, ionisierte Strahlung oder hyperalkalische Bedingungen anpassen. Das Wachstum mikrobiellen Lebens beeinflusst also die physikalischen und geochemischen Bedingungen vor Ort (Infobox Leben in der tiefen Biosphäre S. 28). Daher ist auch das Vorkommen von lebensfähigen Mikroorganismen beim Endlagerstättenbau zu berücksichtigen und zu untersuchen.

Fazit und Ausblick

Eine fundierte und solide Datengrundlage ist für den sicheren Bau eines nuklearen Endlagers in jedem potenziellen Wirtsgestein dringend notwendig. Die Ausweisung der Teilgebiete im Tonstein im Zwischenbericht der BGE beruht zum großen Teil auf Referenzdatensätzen aus verfestigtem Tonstein in Deutschland und Europa. Dabei lassen sich die Ergebnisse jedoch nicht immer unmittelbar übertragen. Die angewandten Methoden, Messverfahren und Modelle sowie die Erkenntnisse aus den bisherigen Untersuchungen der Tonsteine dienen den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern als Grundlage für kommende detaillierte Analysen möglicher Standorte. Im weiteren Verlauf des Standortauswahlprozesses ist daher die Erhebung standortspezifischer Daten im Rahmen der über- und untertägigen Erkundung notwendig, um die Abwägungskriterien zu überprüfen und gegebenenfalls neu zu begutachten.

Literatur und Quellen

- BGE. (2020a). *Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG - Grundlagen*: Stand 01.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH 2020. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200506_2_Endfassung_Referenzdatensaeetze_zur_Anwendung_der_geowissenschaftlichen_Abwaegungskriterien_im_Rahmen_von_13_StandAG_im_AStV_2_.pdf
- BGE. (2020b). *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*: Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf
- Kühn, M., Heidbach, O., Heumann, A., Zens, J. (2021). Nadeln im Heuhaufen. *System Erde*, 11 (2), 6–11. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.1>
- Lüth, S., Esefelder, R., Richter, H., Jaksch, K., Schwarz, B., Wawerzinek, B., Giese, R., Krawczyk, C. M. (2021). Licht ins Dunkel bringen. *System Erde*, 11 (2), 18–23. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.3>
- Rausch, R. (2020). *Gutachten zur Anwendung der §§ 22-24 Standortauswahlgesetz für Standorte mit Wirtsgestein Tonstein anhand von Akteneinsicht bei der Bundesgesellschaft für Endlagerung*. Nationales Begleitgremium. https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Downloads/DE/Downloads_Gutachten/Gutachten_Ton_9_12_2020.pdf
- Schleicher, A. M., Warr, L. N., van der Pluijm, B. A. (2008). On the origin of mixed-layered clay minerals from the San Andreas Fault at 2.5–3 km vertical depth (SAFOD drillhole at Parkfield, California). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157 (2), 173–187. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0328-7>
- Schuster, V., Rybacki, E., Bonnelye, A., Herrmann, J., Schleicher, A. M., Dresen, G. (2021). Experimental Deformation of Opalinus Clay at Elevated Temperature and Pressure Conditions: Mechanical Properties and the Influence of Rock Fabric. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54 (8), 4009–4039. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02474-3>
- Šucha, V., Kraust, I., Gerthofferová, H., Peteš, J., Sereková, M. (2018). Smectite to Illite Conversion in Bentonites and Shales of the East Slovak Basin. *Clay Minerals*, 28 (2), 243–253. <https://doi.org/10.1180/claymin.1993.028.2.06>

Modelle simulieren die Zukunft

Michael Kühn^{1,2}, Theresa Hennig^{1,2}, Oliver Heidbach^{1,3}, Magdalena Scheck-Wenderoth^{1,4}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

³ TU Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Berlin

⁴ RWTH Aachen, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik, Aachen

Modelle und Simulationen erlauben eine Prognose, wie sich Prozesse in der Geosphäre unter Berücksichtigung der physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten in der Zukunft entwickeln. Sie sind die Grundlage, um Entwicklungsszenarien zu prüfen und darüber praktikable Entscheidungen treffen zu können. Nur so ist z. B. eine Quantifizierung potenzieller Radionuklidmigration im hydrogeologischen System des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und damit eine Bewertung des Rückhaltevermögens eines Endlagers für eine Million Jahre möglich.

Im Rahmen des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper fordert das Standortauswahlgesetz (StandAG, Anlage 2 zu § 24 Absatz 3): „Die barrierewirksamen Gesteine eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs müssen mindestens über eine Mächtigkeit verfügen, die den sicheren Einschluss der Radionuklide über einen Zeitraum von einer Million Jahren bewirkt. Das voraussichtliche Einschlussvermögen soll möglichst hoch und zuverlässig prognostizierbar sein. Es ist unter Berücksichtigung der Barrierewirkung der unversehrten Barriere mittels Modellrechnungen abzuleiten, sobald die hierfür erforderlichen geowissenschaftlichen Daten vorliegen, spätestens für den Standortvorschlag [...]“

Für diese zentrale Forderung des StandAG werden geologische Modelle benötigt, welche die statische, räumliche, dreidimensionale Struktur des Untergrunds

Kernaussagen

- **Modelle und Simulationen** sind der einzige Weg, **Zukunftsszenarien und Hypothesen** zu testen und zu bewerten, wie sich ein Endlagerstandort über einen Zeitraum von einer Million Jahren entwickelt.
- **Geologische Strukturmodelle** sind **Annäherungen an die Wirklichkeit**, die auf Beobachtungen beruhen. Sie sind eine Veredelung gesteinspezifischer Daten, basierend auf fachlicher Expertise.
- **Geologisches, physikalisches und geochemisches Prozessverständnis** ist vorhanden. Die Methoden müssen auf die Endlagerstandortsuche **transformiert und angepasst** werden.
- **Der Grad der Zuverlässigkeit der Modelle** ist wichtig, um die Belastbarkeit der Ergebnisse beurteilen zu können. Und er liefert Hinweise, wo neue Daten erhoben werden müssen.

beschreiben und abbilden (Abb. 1). Sie beinhalten als Ausgangsbedingungen die Verteilung der physikalischen und chemischen Gesteinseigenschaften und bieten die Möglichkeit, mit Simulationen der natürlichen und anthropogenen Pro-

zesse die Veränderungen innerhalb des Geosystems zu quantifizieren. Hierfür ist eine Reihe unterschiedlicher Komponenten notwendig (Abb. 2). Ein geologisches Modell gibt die Struktur des Systems und die Verteilung der Eigen-

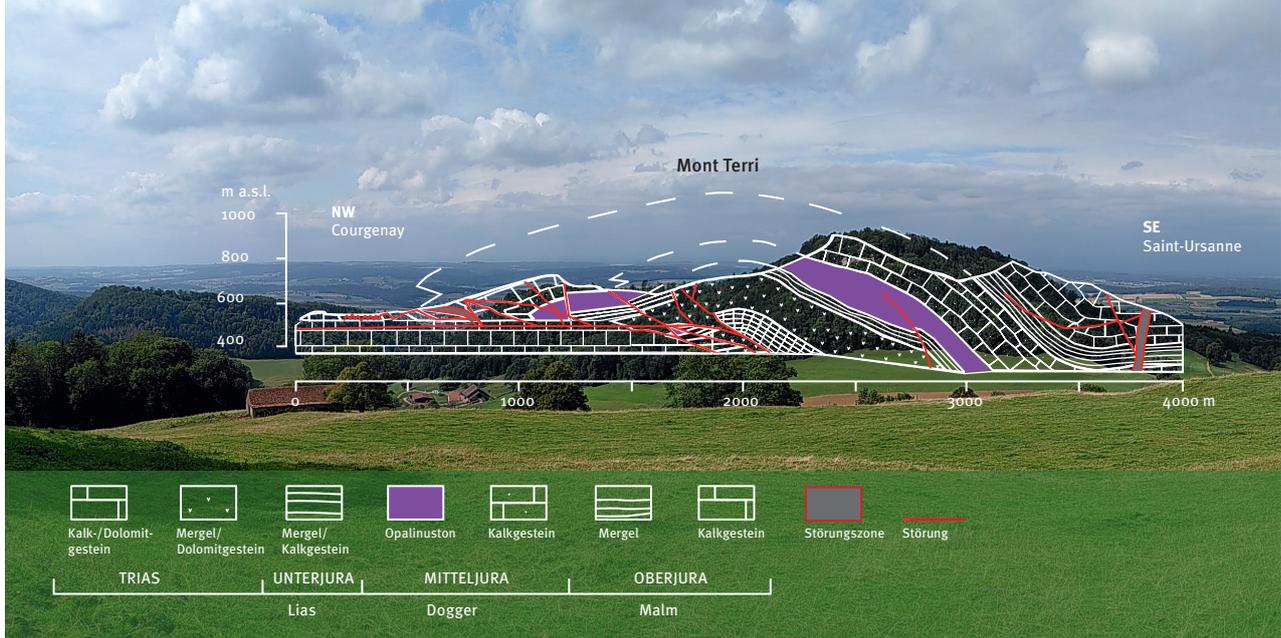


Abb. 1: Außenansicht und innere Struktur des Mont Terri (Schweiz), der das Untertagelabor für die Erforschung des Opalinustons als Wirtsgestein beherbergt (Foto: M. Kühn; Grafik: T. Hennig, beide GFZ)

schaften des Untergrunds wieder. Dabei liefern die initialen Feldgrößen, wie z. B. das großräumige Spannungsfeld (Heidbach et al., 2021, S. 12 in diesem Heft) und die lokale Druck- und Temperaturverteilung die Startwerte für die eigentliche Aufgabe: die Beschreibung der Dynamik des Systems, also der Entwicklung in der Zukunft.

Je nach Fragestellung müssen dafür unterschiedliche Prozesse mit Hilfe der computergestützten Analyse berücksichtigt werden. Zunächst wird ein qualitatives Konzept entwickelt. Für die Quantifizierung ist als Vermittler das mathematische System mit allen notwendigen Gleichungen notwendig. Die Lösung der Gleichungen erfordert im letzten Schritt das numerische System (Abb. 2). Ott et al. (2021, S. 36 in diesem Heft) zeigen z. B. die Entwicklung der Erdoberfläche und der direkt darunter liegenden Horizonte durch Erosionsprozesse, um den Nachweis zu erbringen, dass die abdeckenden Schichten eines Endlagers für radioaktive Abfälle nicht vor einer Million Jahren abgetragen werden. Ein weiteres Beispiel zur Quantifizierung der Radionuklidmigration im Rahmen der Fragestellung, wie mächtig ein Wirtsgestein sein sollte, ist die geochemische Simulation, die im hinteren Teil dieses Beitrags vorgestellt wird.

Die Komplexität der natürlichen geologischen Systeme wird bereits beim Auf-

bau des geologischen Modells deutlich. Bei der Modellbildung müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden, sodass nur die Haupt- und Regelungsfaktoren berücksichtigt werden, welche die physikalischen oder hydro-geochemischen Prozesse steuern. In Anlehnung an den Aphorismus von Albert Einstein „Alles sollte so einfach wie möglich dargestellt werden, aber nicht einfacher“ können und müssen Modelle nicht vollkommene Kopien des realen Systems darstellen, um einen praktischen Nutzen zu generieren. Die Ergebnisse der Simulationen mit einem Modell sollten aber zumindest teilweise beobachtbar oder experimentell überprüfbar sein. Zhu und Anderson (2002) stellen fest, dass ein Modell verifiziert werden muss, d. h., es muss geprüft werden, ob der für die Simulation verwendete Computercode die Gleichungen korrekt löst und frei von schwerwiegenden Fehlern ist. Im Allgemeinen muss ein Simulationsprogramm nicht vom Anwender verifiziert werden, da dies die Aufgabe der Entwicklerinnen und Entwickler ist. Es muss aber validiert werden, ob das angenommene Modell, also die Gleichungen im Computercode (Abb. 2), die den betrachteten Prozess beschreiben, tatsächlich die zu untersuchenden natürlichen Prozesse ausreichend präzise beschreibt. Als Endprodukt des Modellierungsprozesses enthält ein Computermodell alle Vereinfachungen und Annahmen, die in der Summe aller Schritte gemacht wur-

den, insbesondere in der Anfangsphase, in der die Modelle zur geologischen Struktur und der Gesteinseigenschaften erstellt sowie die Ausgangsbedingungen definiert werden.

Geologische, physikalische oder hydro-geochemische Modelle ermöglichen es, Daten, Konzepte und Prozesse zu integrieren und zu verstehen. Allerdings basieren z. B. die Modelle des reaktiven Stofftransports von Radionukliden auf verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen. Dies erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit unter anderem der numerischen Mathematik, Geologie, Hydrologie, Physik und Chemie. Der beste Weg, um Fehler zu vermeiden, besteht darin, die eigenen Ergebnisse stets kritisch zu hinterfragen. Modelle und Simulationen sind die einzige Möglichkeit, Szenarien und Hypothesen zu testen, um belastbare Prognosen zu erstellen, und um zu bewerten, wie sich ein Endlagerstandort in der Zukunft entwickelt.

Geologisches Modell als strukturelle Basis

Prozessmodelle enthalten sowohl zeitliche als auch räumliche Informationen, die mit ihrer Komplexität für Anwendungen in der realen Welt notwendig und erwünscht sind. Sie basieren strukturell auf den geologischen Modellen, welche die Geometrie des Gesamtsystems de-



Kontakt: Michael Kühn
(michael.kuehn@gfz-potsdam.de)

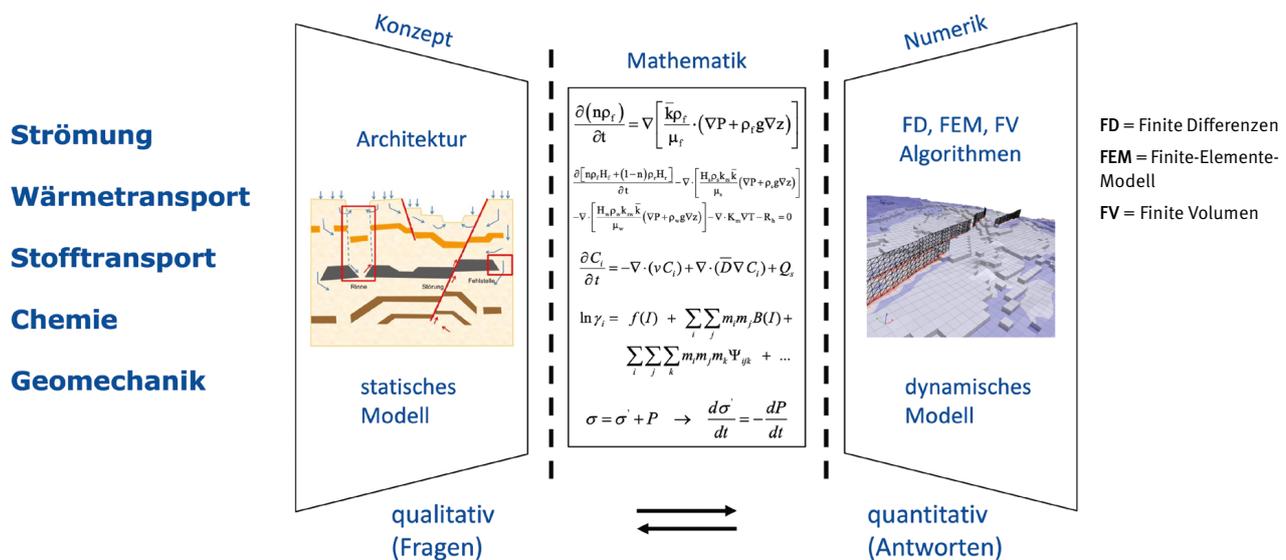


Abb. 2: Komponenten eines Geosystem-Modells: Architektur des statischen geologischen Modells, das mit seinen Eigenschaften auf Labordaten, Feldexperimenten und der Erkundung basiert. Das mathematische System dient als Vermittler zwischen dem qualitativen Konzept und den quantitativen Antworten der numerischen Lösung zur Simulation der natürlichen und anthropogenen physikalischen und chemischen Prozesse.

finieren. Grundlegende Prozesse (Abb. 2), die bei der gleichzeitigen und gekoppelten Simulation von Transport und Reaktion eine wichtige Rolle spielen, sind die Strömung der Fluide (Flüssigkeiten und Gase), der Wärmetransport (Energie), der Stofftransport (Substanzen und deren Sorption), chemische Reaktionen (Mineralumwandlung und radioaktiver Zerfall) und geomechanische Effekte (Deformation).

Statische geologische Modelle bilden die Basis für ein erfolgreiches Management des tiefen Untergrunds und um die dynamischen physikalischen und chemischen Prozesse in der Erdkruste zu verstehen. Die Eingangsdaten und Modellierungsmethoden richten sich nach der jeweiligen Zielsetzung. Generell gilt, dass die geologischen Modelle eine virtuelle Abfrage der Gesteinsarten und ihrer Eigenschaften ermöglichen.

Gesteine werden über Bohrungen gewonnen und dann geologisch, geophysikalisch und geochemisch untersucht. So ergeben sich über die Gesteinsanalysen des Bohrmaterials sogenannte Schichtenverzeichnisse. Sie werden für unterschiedliche Gesteinsarten aus einer Bohrung zu Einheiten zusammen-

gefasst. Diese sind wiederum die Basis für Profilschnitte und geologische Karten. Bei der Modellerstellung fließen schrittweise alle verfügbaren Daten ein: Bohrungsdaten, geophysikalische Messungen sowie geologische Karten und Profilschnitte.

Die Erkundung des geologischen Untergrunds ist notwendig, damit dieser nachhaltig genutzt werden kann. Um die Struktur des Untergrunds abzubilden, werden geophysikalische Messmethoden eingesetzt (Abb. 3). Der Untergrund wird z. B. mit seismischen Signalen „durchleuchtet“ und so indirekt „tomografisch“ untersucht (Lüth et al., 2021, S. 18 in diesem Heft). Mit Hilfe von Bohrungen werden Wasser- und Gesteinsproben gewonnen, welche die Möglichkeit bieten, das geologische Modell zu prüfen und zu verfeinern und die Gesteinseigenschaften zuzuordnen (Genderjahn et al., 2021, S. 24 in diesem Heft). Feldgrößen wie Gebirgsspannung, Fluiddruck und Temperatur werden in der Tiefe direkt gemessen. Über die Kombination und gemeinsame Interpretation aller Messergebnisse ergibt sich so am Ende ein Abbild des geologischen Untergrunds und eine Beschreibung der Ausgangsbedingungen (Abb. 3). Nur mithilfe der

Geophysik erreichen die geologischen Modelle die notwendige dreidimensionale, räumliche Auflösung. Zur Finalisierung des geologischen Modells bedarf es am Ende aber auch noch fachlicher Expertise und hinreichende Erfahrung. Fachliche Expertise ist hier essenziell, hat aber auch zur Folge, dass das Ergebnis von der bearbeitenden Person abhängt. Daher ist auch die umfangreiche und vollständige Dokumentation für eine bestmögliche Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der geologischen Modelle unbedingt erforderlich. Darüber hinaus müssen sie fortschreibungsfähig sein, weil im Laufe des Standortauswahlverfahrens immer wieder zusätzliche Daten verfügbar sein werden, u. a. durch die Erhebung im Rahmen der obertägigen und folgenden untertägigen Erkundungen (Kühn et al., 2021, S. 6 in diesem Heft). Je mehr Informationen konsistent integriert werden, umso größer ist die Genauigkeit. Der wirkliche Mehrwert der geologischen Modelle entsteht dadurch, dass sie Vorhersagen für Gebiete erlauben, die weniger gut erkundet sind.

Dreidimensionale geologische Modelle sind der Schlüssel, um Standortregionen in den identifizierten Teilgebieten auszuweisen. Einerseits liefern die vorhan-

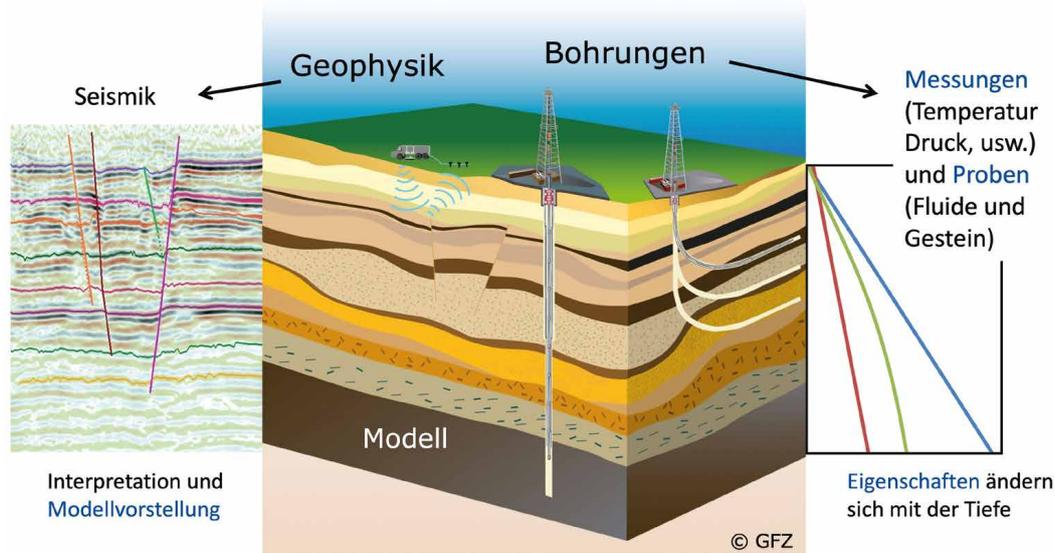


Abb. 3: Basierend auf verschiedenen Beobachtungstechnologien wird das geologische Modell des Untersuchungsgebiets erstellt. Direkte Messmethoden finden Anwendung in Bohrungen im Untergrund, aus denen Gesteins- und Fluidproben gewonnen werden (Genderjahn et al., 2021). Diese werden mit den Ergebnissen der indirekten Messmethoden, z. B. der Seismik (Lüth et al., 2021), kombiniert und interpretiert.

denen Bohrungen dafür die Fakten, andererseits stellen existierende Bohrungen aber auch ein Ausschlusskriterium bei der Endlagersuche nach dem Standortauswahlverfahren dar (Kühn et al., 2021). Es existiert eine weit entwickelte geophysikalische Methodik zur nichtinvasiven Erkundung des geologischen Untergrunds und der Integration des daraus generierten Wissens in die Modelle. Trotzdem wird eine Anpassung der Erkundungstechnologien notwendig sein, weil die bisherige Zielstellung der Erkundung des tieferen Untergrunds anderen Suchobjekten galt und die dabei explorierten spezifischen Gesteinsformationen grundlegend andere Eigenschaften besaßen, als die nun im Rahmen des Standortauswahlverfahrens in den Blick genommenen Wirtsgesteine. Dreidimensionale geologische Modelle stellen eine Veredelung von Daten dar und bilden eine wesentliche Entscheidungsgrundlage. Aus den gesammelten und erhobenen Daten werden Informationen extrahiert, welche in die Modelle überführt werden und am Ende eine Beurteilung mit Bezug zum Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ermöglichen.

Simulation der Radionuklidmigration im Wirtsgestein

Im Rahmen der Forschungsarbeiten am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ ist das folgende Beispiel entstanden. Es zeigt als Prozesssimulation eine Radionuklidmigration, also die mögliche Wanderung von radioaktivem Material aus dem Endlager durch das Wirtsgestein. Das Modell dazu schaut in die Zukunft und erlaubt eine Prognose, wie sich ein System bei gegebenen Ausgangsbedingungen über eine Million Jahre verhält. Beim Stofftransport von Radionukliden müssen gekoppelte physikalisch-chemische Prozesse in Raum und Zeit berücksichtigt werden. Zur zeitabhängigen Simulation dieser Prozesse wird als Basis das räumliche geologische Modell benötigt. Die hier vorgestellte Szenarienanalyse des Opalinustons wurde im Hinblick auf die Fragestellung durchgeführt, ob der einschlusswirksame Gebirgsbereich über eine ausreichende Mächtigkeit verfügt, die den Einschluss von Uran über einen langen Zeitraum garantiert. In Tonsteinen basiert das Konzept zur Lagerung hochradioaktiven Abfalls und der Isolierung der Radionuklide auf der extrem geringen Durchlässigkeit des

Gesteins für Gase und Flüssigkeiten, so dass der Transport nur durch Diffusion erfolgt, und zusätzlich auf dem Rückhaltevermögen, das sich aus der großen reaktiven Oberfläche darin enthaltener Tonminerale ergibt (Genderjahn et al., 2021).

Die Transporteigenschaften von Radionukliden werden in der Regel in Labor- oder In-situ-Experimenten unter geochemisch kontrollierten und konstanten Bedingungen bestimmt. Frühere numerische Studien haben für den Opalinuston am Mont Terri (Schweiz) aber gezeigt, dass die Uranmigration stark von Variationen in der Zusammensetzung des Porenwassers abhängt, die sich insbesondere aus der mineralogischen Heterogenität ergibt (Hennig et al., 2020; Hennig und Kühn, 2021). Die um das Wirtsgestein herum befindlichen Aquifere (Grundwasserleiter) stellen die hydrogeologischen Randbedingungen dar, zwischen denen sich geochemische Gradienten in dem über 200 m mächtigen, niedrig durchlässigen Tonstein (blaue Punkte, Abb. 4) durch diffusiven Austausch über Millionen von Jahren gebildet haben. Somit ist die Homogenität, wie in den Labor- und In-situ-

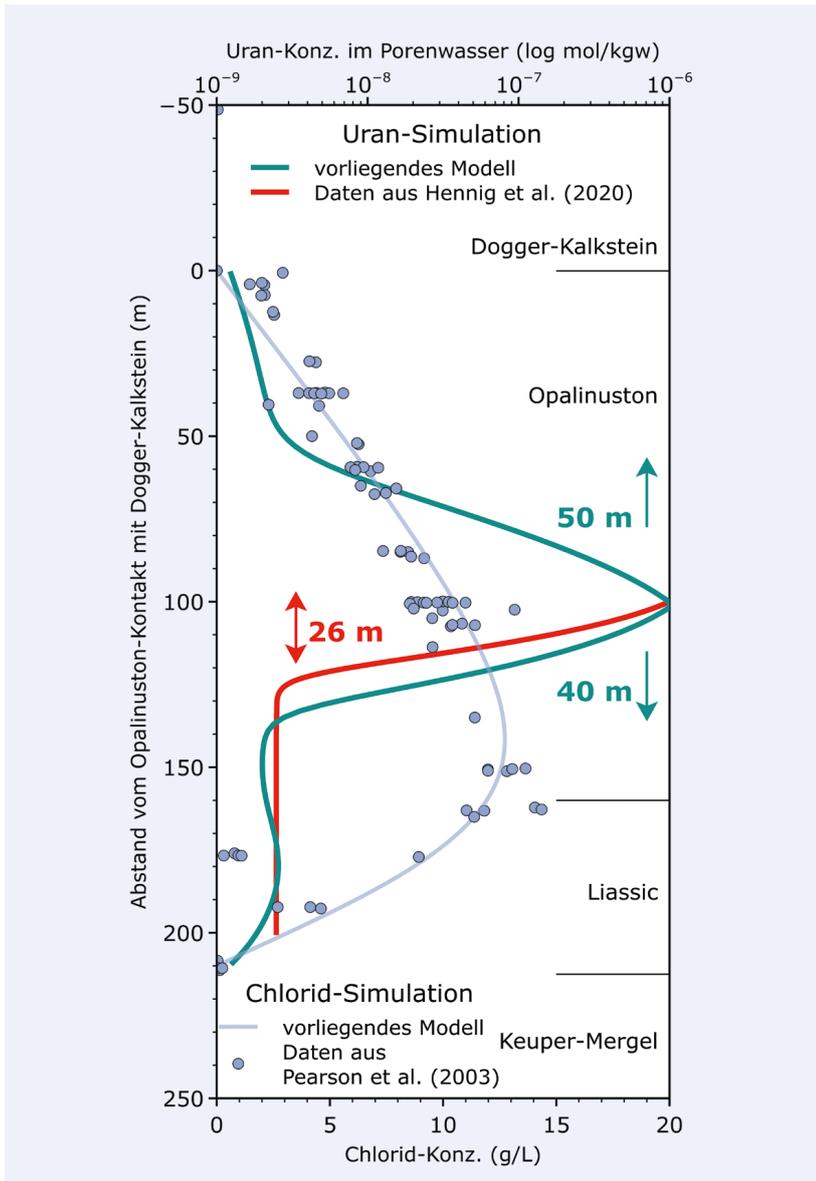


Abb. 4: Ergebnis der Modellierung der Radionuklidmigration im Opalinuston. Geochemische Gradienten im System des Mont Terri (blaue Punkte) verstärken die Uranmigration (grüne Linie) durch die Formation hindurch im Vergleich zur Simulation eines homogenen Systems (rote Linie). Das berechnete Chloridprofil (blaue Linie) stimmt mit Messdaten aus Bohrlochanalysen überein.

liert. Die Ergebnisse zeigen (grüne Linie, Abb. 4), dass Uran 50 m in Richtung des überliegenden Aquifers (Dogger) und 40 m in Richtung des darunter liegenden (Lias) migriert. Das bedeutet, dass sich im Vergleich mit einem homogenen System (rote Linie, Abb. 4), Uran wesentlich weiter durch die Formation bewegt, wenn geochemische Gradienten existieren.

Für die Erstellung geologischer Modelle und die darauf basierenden Prozesssimulationen ist die notwendige geologische, physikalische und geochemische Expertise vorhanden, erfordert aber in Teilen eine Transformation und Anpassung für die zu betrachtenden Szenarien und die Prüfung von Hypothesen im Rahmen der Endlagerstandortsuche. In diesem hier dargelegten Fall konnte gezeigt werden, dass das Uran innerhalb der theoretischen effektiven Rückhaltezone des Opalinustons verbleibt und angrenzende Grundwasserleiter nicht erreicht. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich wäre in diesem Fall eindeutig mächtig genug.

Experimenten angenommen, für die deutlich größere Ausdehnung der Wirtsgesteine nicht mehr zutreffend.

Mit eindimensionalen reaktiven Transportmodellen wurden unter Verwendung der Software PHREEQC (Parkhurst und Appelo, 2013) zunächst die heutigen Porenwasserprofile auf Grundlage der geologischen Entwicklung des Mont Terri simuliert. Das geologische Modell gibt vor, dass der Opalinuston zwischen triassischen und jurassischen Kalksteinen, Mergeln und Schiefer eingebettet ist. Die Süßwasserinfiltration in die den Tonstein umgebenden Aquifere und damit die Aktivierung des hydrogeologischen

Systems erfolgte erst nach Hebung des gesamten Komplexes während der Aufaltung des Juragebirges und der nachfolgenden Erosion. Die Ausgangsbedingungen wurden entsprechend der geologischen Entwicklung definiert. Das reaktive Transportmodell wurde mit Hilfe des an Feldproben gemessenen Chloridprofils kalibriert (blaue Punkte, Abb. 4). Weiterhin wurde die Uranmigration ausgehend von einer Quelle, die sich in der Mitte des gering durchlässigen Abschnitts mit dem Opalinuston befindet und ein potenzielles Endlager abbildet, für eine Million Jahre unter Berücksichtigung des geochemisch heterogenen Systems simu-

Integrierte Beurteilung der Ergebnisse

Die geologischen Strukturmodelle und Ausgangsbedingungen dienen als unabdingbare Berechnungsgrundlage für Prozesssimulationen für die Konzeption, Planung und Prognose komplexer Systeme. In einem dreidimensionalen Modell werden alle Erkundungsdaten zusammen dargestellt und ausgewertet. Daraus resultiert eine schlüssige Definition des unterirdischen Raums und es können Modelle für die Simulation physikalischer und chemischer Prozesse über die Zeit abgeleitet werden. Das ist die einzige Möglichkeit, um die Barriere-

” Geologische, physikalische, hydro-geochemische Systeme befinden sich zu keiner Zeit in einem stationären Zustand.

wirkung eines Wirtsgesteins für einen Zeitraum von einer Million Jahren zu prognostizieren.

Geologische, physikalische, hydrogeochemische Systeme befinden sich zu keiner Zeit in einem stationären Zustand, sondern sie durchlaufen fortwährend verschiedene Prozesse und Veränderungen. Daher liefert die Berechnung eines geochemischen oder reaktiven Transportmodells nicht nur Ergebnisse, sondern auch Ungewissheit über die Genauigkeit dieser Ergebnisse. Die Ungewissheit ist ein integraler Bestandteil der Modellierung und Simulation, der ebenso wichtig ist, wie jeder andere Aspekt einer Studie. Der Einsatz von Computermodellen hat verschiedene unerwünschte Effekte, die beurteilt und gegebenenfalls eliminiert oder reduziert werden müssen:

- Es können numerische Probleme im Programmcode selbst auftreten,
- die physikalischen und chemischen Phänomene sind ggf. nur unvollständig verstanden,
- die geologischen Eingangsdaten sind immer zu einem gewissen Grad ungenau,
- experimentell bestimmte Basisdaten unterliegen ebenfalls einem Messfehler und
- es können Daten fehlen, die für den Aufbau eines Modells benötigt werden.

Nun wäre die Frage möglich: Wozu überhaupt Modelle und Simulationen verwenden, wenn ihnen nur begrenzt vertraut werden kann? Ihre unbestreitbaren Vorteile:

- Modelle sind der einzige Weg, um belastbare Prognosen zu erstellen, und zu bewerten, wie sich ein Endlagerstandort in der Zukunft entwickeln wird,

- die Integration aller räumlichen und zeitlichen Aspekte,
- ein vertieftes Verständnis der beteiligten physikalischen und chemischen Prozesse (Strömung, Wärme, Transport, chemische Reaktionen, Mechanik) und
- eine Verbesserung der Möglichkeiten bei der Erkundung, Nutzung und dem Schutz des unterirdischen Raums.

Die Frage muss also lauten: Wie genau müssen die Modelle für die Endlagerstandortsuche sein, um belastbare, robuste Ergebnisse zu erzeugen? Je mehr qualitativ hochwertige, mit Fachexpertise analysierte und interpretierte Daten zur Verfügung stehen, desto genauer und zuverlässiger werden die Vorhersagen. Letztendlich ist daher zu klären, welche Daten wo gebraucht werden, um die Ungewissheiten der Modelle auf ein Niveau zu senken, dass eine ausreichende Verlässlichkeit für zukünftige Entwicklung eines Endlagerstandorts erlaubt.

Literatur

- Genderjahn, S., Schleicher, A. M., Schuster, V., Mitzscherling, J., Wagner, D., Rybacki, E., Dresen, G. (2021). Gesteinseigenschaften geben den Ton an. *System Erde*, 11 (2), 24–29. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.4>
- Heidbach, O., Ziegler, M., Morawietz, S., Reiter, K., Röckel, L., Cotton, F. (2021). Standortsuche im Spannungsfeld. *System Erde*, 11 (2), 12–17. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.2>
- Hennig, T., Kühn, M. (2021). Potential Uranium Migration within the Geochemical Gradient of the Opalinus Clay System at the Mont Terri. *Minerals*, 11 (10). <https://doi.org/10.3390/min11101087>
- Hennig, T., Stockmann, M., Kühn, M. (2020). Simulation of diffusive uranium transport and sorption processes in the Opalinus Clay. *Applied Geochemistry*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104777>
- Kühn, M., Heidbach, O., Heumann, A., Zens, J. (2021). Nadeln im Heuhaufen. *System Erde*, 11 (2), 6–11. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.1>
- Lüth, S., Esefelder, R., Richter, H., Jaksch, K., Schwarz, B., Wawerzinek, B., Giese, R., Krawczyk, C. M. (2021). Licht ins Dunkel bringen. *System Erde*, 11 (2), 18–23. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.3>
- Ott, R. F., Gailleton, B., Malatesta, L. C., Becker, L., Braun, J. (2021). Stabilität über eine Million Jahre. *System Erde*, 11 (2), 36–41. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.6>
- Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J. (2013). *Description of input and examples for PHREEQC version 3 : a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. <http://purl.fdlp.gov/GPO/gp037078>
- Zhu, C., Anderson, G. (2002). *Environmental applications of geochemical modeling*. Cambridge Univ. Press. http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/storage/2010/06/04/file_2/3790444.pdf

Stabilität über eine Million Jahre

Richard Ott¹, Boris Gailleton¹, Luca C. Malatesta¹, Lukas Becker¹, Jean Braun^{1,2}

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

² Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam

Die langfristige Sicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen beruht auch darauf, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich nicht durch Erosion in einem Zeitraum von einer Million Jahren freigelegt wird. Mit geologischen Daten und numerischen Modellen der Landschaftsentwicklung kann quantifiziert werden, wie schnell beispielsweise Gletscher, Flüsse und tektonische Prozesse die Landschaft verändern und wie wahrscheinlich es ist, dass ein Endlager durch diese Prozesse an die Erdoberfläche gelangt.

Ein wichtiges Kriterium bei der Suche nach einem geeigneten Endlager ist im Standortauswahlgesetz formuliert: „Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen sind in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich [...] mit dem Ziel zu konzentrieren und einzuschließen, diese Stoffe von der Biosphäre fernzuhalten. Für einen Zeitraum von einer Million Jahren muss im Hinblick auf den Schutz des Menschen und [...] der Umwelt sichergestellt werden, dass Expositionen aufgrund von Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind“ (StandAG, § 26).

Eine wichtige Fragestellung bei der Suche nach einem passenden Endlagerstandort ist daher auch die Abschätzung der Gefahr seiner potenziellen Freilegung durch Oberflächenprozesse in den nächsten eine Million Jahren – eine nahezu unvorstellbare Zeitspanne. Zum Vergleich: Erst vor dreihunderttausend Jahren ent-

Kernaussagen

- Ein Endlager muss für **eine Million Jahre** sicher sein. Dies bedeutet, dass in diesem Zeitraum die Formationen auch vor Erosion geschützt sind und keine radioaktive Strahlung in die Umwelt gelangt.
- Die Entscheidung, ob ein möglicher Standort diesbezüglich sicher ist, wird über Simulationen von numerischen Modellen getroffen, welche auf Basis der vergangenen Landschaftsentwicklung die **zukünftige Landschaftsentwicklung berechnen**.
- Um die Zukunft zu simulieren, müssen weitere Daten zur vergangenen Landschaftsentwicklung erhoben und die **Zusammenarbeit zwischen Fachleuten für Feld- und Laborarbeiten** und für Modellierungen intensiviert werden.

wickelte sich der Homo Sapiens im östlichen Afrika. Eine Million Jahre sind also dreimal so lange wie das Alter unserer eigenen Spezies. Forschende am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ sind darauf spezialisiert, das Erdsystem mit den Auswirkungen von Eiszeiten, Vulkanen, Flussabtragung und tektonischen

Verschiebungen für solche Zeitspannen zu modellieren und können daher dazu beitragen, einen potenziellen Endlagerstandort unter den oben genannten Rahmenbedingungen zu bewerten.

In den vergangenen eine Million Jahren wurde die Erdoberfläche etwa alle hun-

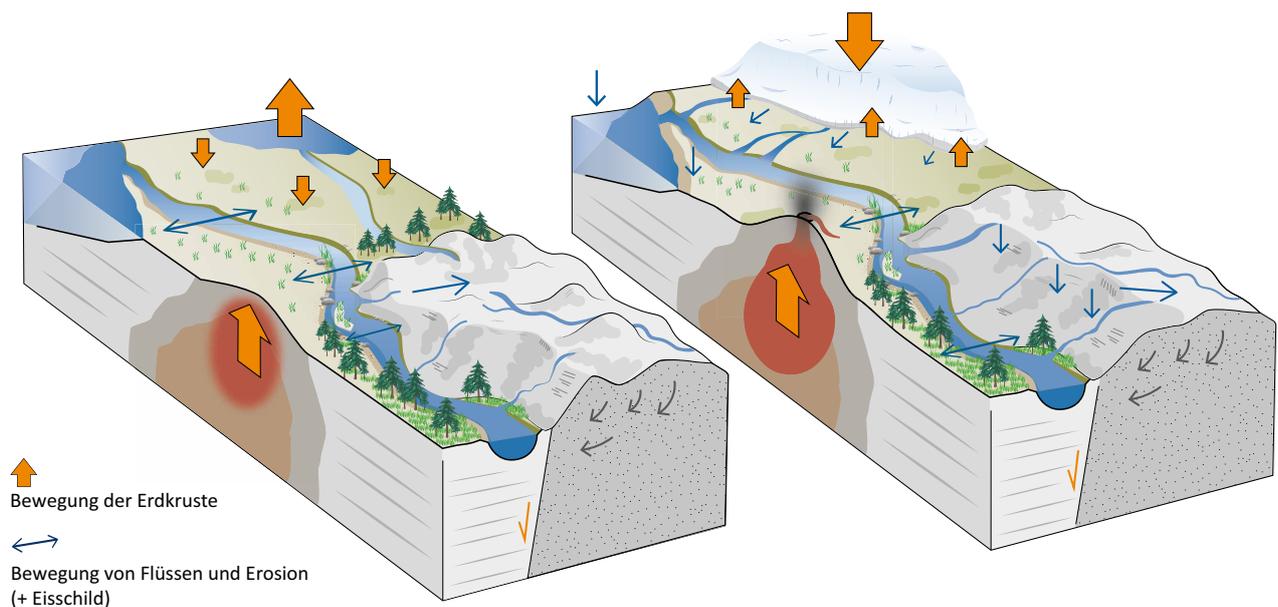


Abb. 1: Prozesse, die auf die Erdoberfläche während einer Million Jahren einwirken. Im Norden sorgt das Gewicht von Eisschilden für ein ständiges Auf und Ab der Erdkruste in regelmäßigen Zyklen. Im gleichen Takt fällt und steigt der Meeresspiegel. Gleichzeitig sorgen Vulkane und Plattentektonik für Verformungen der Erdkruste. Die ständige Bewegung der Erdoberfläche sorgt dafür, dass Flüsse ihren Lauf und damit ihre Abtragungsgebiete verlegen. (Grafik: P. Klinghammer, GFZ)

dertausend Jahre durch wiederholte Eiszeiten und einhergehende Vergletscherungen radikal verändert. Auf dem Höhepunkt der Vergletscherungen in Europa flossen die Gebirgsgletscher der Alpen in die Tiefebene hinab, während sich die Eisschilde von Skandinavien aus über Norddeutschland wälzten. Die Gletscher haben dabei relativ schnell tiefe Täler erodiert und große Gesteinsmassen abgetragen. Der Bodensee ist beispielsweise ein Resultat dieser Prozesse. Die großen Eisschilde waren so schwer, dass sie die Erdoberfläche um Kilometer niederdrückten (Abb. 1).

Vergletscherungen können auch in nicht vergletscherten Gebieten die Erosionsprozesse stark beeinflussen. Da Schnee und Regen während der Eiszeiten in den Gletschern und Eisschilden eingeschlossen sind, fließen sie nicht in den Ozean zurück, und der globale Meeresspiegel sinkt im Durchschnitt auf 125 m unter dem heutigen Stand. Dies hat zur Folge, dass Flüsse wie die Elbe oder der Rhein

weiter und in tiefere Lagen fließen müssen, um ihre eiszeitliche Mündung zu erreichen.

Darüber hinaus finden auch seltene und sehr seltene Naturereignisse über einen Zeitraum von bis zu einer Million Jahren statt. Vulkanausbrüche und starke Erdbeben sind in Deutschland äußerst selten, aber über lange Zeiträume betrachtet sind solche Ereignisse sehr wahrscheinlich (Heidbach et al., 2021, S. 12 in diesem Heft). Auf einer geologischen Zeitskala sind auch Flüsse sehr dynamisch und verlegen häufig ihren Lauf, was zu einer erheblichen Umgestaltung der Landschaft führt, indem schnell neue Täler eingeschnitten und große Mengen an Sedimenten über das Land bewegt werden.

Das GFZ hat sowohl Erfahrung in der Akquisition von Daten und der zeitlichen Rekonstruktion der hier genannten Prozesse, als auch in der Modellierung von zukünftigen Erdoberflächenprozessen, um die Langzeitintegrität eines poten-

ziellen Endlagerstandorts einzuschätzen. Daher muss zunächst die Veränderung der Landschaft in der Vergangenheit verstanden werden.

Geologische Geschichte Deutschlands während der letzten eine Million Jahre

Die Landschaft in Deutschland hat sich in den letzten eine Million Jahren stark verändert, wobei die Art dieser Veränderungen je nach Region unterschiedlich ist. Die Landschaft und Topographie Norddeutschlands wurde hauptsächlich durch das Vordringen der Eisschilde aus Skandinavien geprägt. In Mittel- und Süddeutschland waren plattentektonische Bewegungen, Vulkanismus und die Veränderung von Flussläufen die Hauptfaktoren für den topographischen Wandel.

Vor etwa 135 000 Jahren, während der vorletzten Eiszeit, war etwa die Hälfte der Landmasse Deutschlands von



Kontakt: Richard Ott
(richard.ott@gfz-potsdam.de)

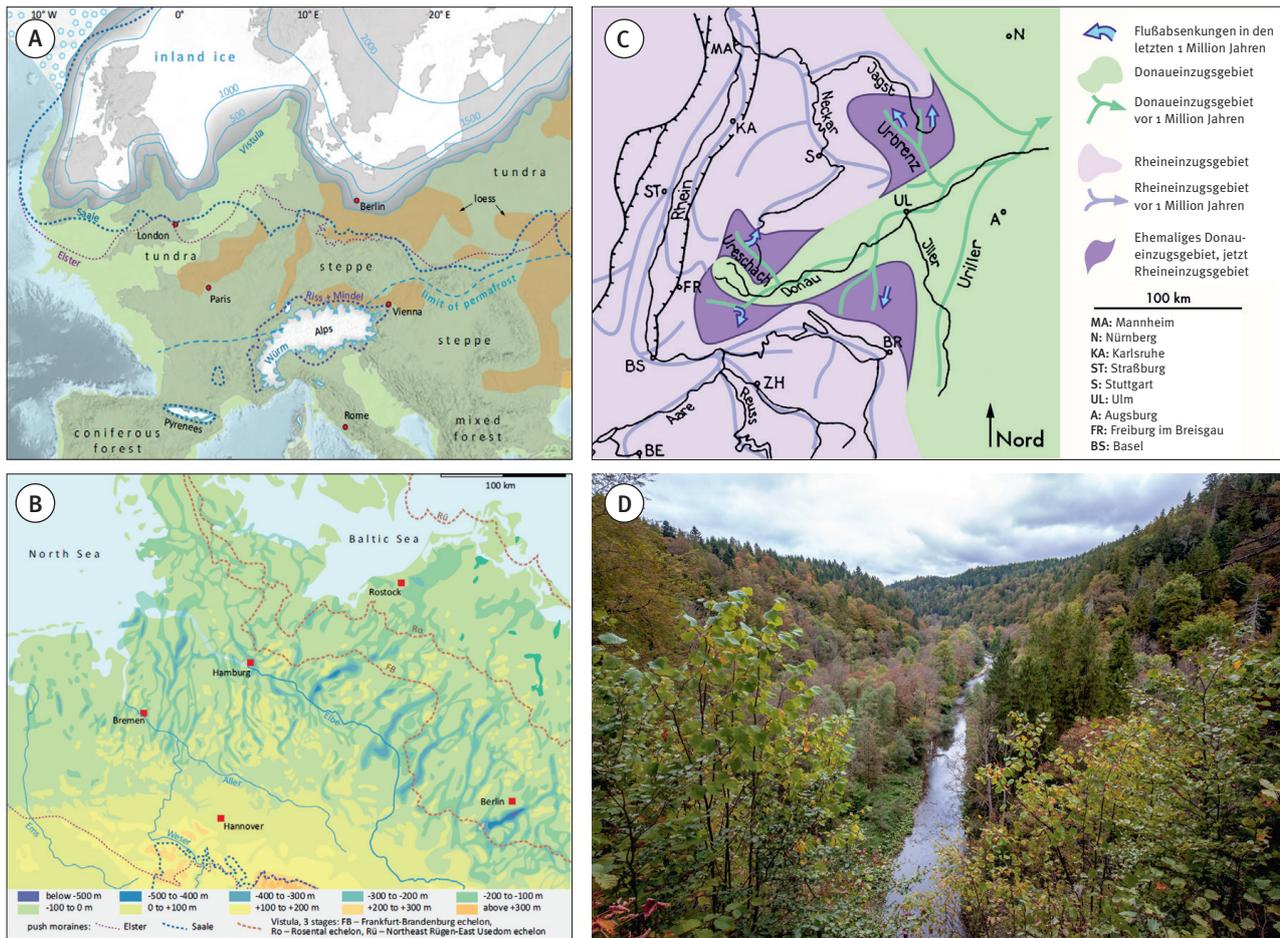


Abb. 2: A. Ausdehnung des Eises in Nordeuropa während der letzten Vergletscherung vor 23 000 Jahren (nach Meschede und Warr, 2019). Die Ausdehnung früherer Eiszeiten war sogar noch größer. B. Tiefe der heute zugeschütteten Gletschertäler, die sich während vergangener Eiszeiten formten (Daten von Stackebrandt, 2009, geändert von Meschede und Warr, 2009; gestrichelte Linie zeigt letzte Ausdehnung). C. Veränderung der Donau- und Rheineinzugsgebiete während der letzten eine Million Jahre (nach Villinger, 1998). D. Die Wutachschlucht wurde nach einer Flussablenkung innerhalb der letzten 10 000 Jahre eingeschnitten. (Foto: simonwhitehurst – stock.adobe.com).

Gletschern bedeckt, insbesondere der überwiegende Teil Norddeutschlands und der südliche Teil Bayerns lagen unter hunderten Metern Eis (Abb. 2a). Die Gletscher bewegten große Mengen an Material und haben auch durch Erosion Material abtragen. So wurden beispielsweise in Norddeutschland Täler geschaffen, die bis zu 450 m unter dem heutigen Meeresspiegel liegen (Abb. 2b). Diese wurden anschließend wieder mit lockerem Sediment gefüllt.

Das enorme Gewicht der Gletscher führt auch zu Veränderungen in der Topographie. Gebiete, die von einem Eisschild

bedeckt sind, sinken tiefer in den Erdmantel ein, wie ein Schiff unter zusätzlicher Last. Vor etwa 18 000 Jahren wurde die Landoberfläche Nordostdeutschlands unter dem Gewicht des Eises um mehrere hundert Meter niedergedrückt. Jetzt, da dieses Gewicht nicht mehr wirkt, heben sich Teile Nordostdeutschlands noch immer um etwa einen Millimeter pro Jahr, während sich die Gebiete, die vor dem Eisschild lagen, in dem gleichen Maße senken (Kierulf et al., 2014).

Auch die Bewegung der tektonischen Platten verändert die Landschaften im Laufe der Zeit. Die Alpen sind durch den

Zusammenstoß von Europa und Afrika entstanden, und die Fernwirkungen dieses Zusammenstoßes bestimmen die tektonischen Bewegungen in ganz Deutschland. Dieser Prozess ist heute noch aktiv und manifestiert sich durch Erschütterungen. Im Jahr 1356 wurden bei einem heftigen Erdbeben im Südwesten Deutschlands und in der Schweiz Hunderte von Menschen getötet und zahlreiche Gebäude zerstört. Die gegenwärtige Geschwindigkeit, mit der diese tektonischen Bewegungen in Gebieten wie dem Schwarzwald ablaufen, sind mittlerweile gut untersucht. Die vertikale Hebung und Senkung des Landes um



Landschaftsentwicklungsmodelle

Obwohl Flüsse, Gletscher und andere Systeme auf der Erdoberfläche sehr komplexen physikalischen Phänomenen unterliegen, kann ihr Verhalten über lange Zeiträume mit numerischen Landschaftsentwicklungsmodellen simuliert werden (Abb. 3). Bei diesen werden die Prozesse, die auf der Erdoberfläche stattfinden, in Abhängigkeit von geometrischen und halbempirischen mathematischen Beziehungen simuliert. Beispielsweise wird die Flusserosion als Funktion des Wasserabflusses und der topographischen Neigung approximiert und durch lokale Bedingungen (z. B. die Festigkeit des Gesteins) moduliert. Der Wasserabfluss von Flüssen wird mit Hilfe von Klimadaten berechnet. Die Verformung von Hängen hängt von der Steilheit und der Bodenstärke ab. Jüngere Forschungsarbeiten haben auch die Gletschererosion in die Landschaftsentwicklungsmodelle integriert. Die Forschungsarbeiten am GFZ konzentrieren sich nun auf die Integration von Prozessen, die besonders in Deutschland von großer Wichtigkeit sind, z. B. Grundwasserströme (wie in den Karstgebirgen Süddeutschlands), die das Verhältnis zwischen Einzugsgebiet und Flussabfluss verändern, oder Seen, die Flussläufe unterbrechen und als Sedimentablagerungsort dienen.

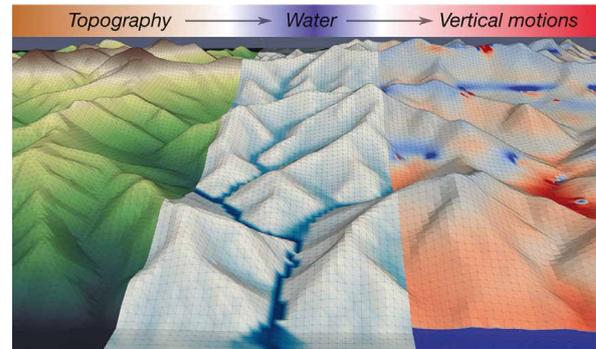


Abb. 3: Landschaftsentwicklungsmodelle können die Veränderung von Topographie, Wassertransport, Erdkrustenbewegung und viele weitere Prozesse simulieren. Sie ermöglichen, lange geologische Zeitspannen innerhalb weniger Minuten zu untersuchen.

den Schwarzwald liegt in der Größenordnung von einigen Dutzend bis einigen hundert Metern in einer Million Jahren. Vertikale Bewegungen der Landoberfläche können auch durch Vulkanismus verursacht werden. Vor etwa 13 000 Jahren brach in der Eifel ein Vulkan aus, der den Laacher See bildete. Eine Kombination aus diesem Vulkanismus und der Fernwirkung durch die tektonische Kollision in den Alpen ist wahrscheinlich für die anhaltende langsame Deformation der Erdkruste in Mitteldeutschland verantwortlich (Demoulin und Hallot, 2009). In der Eifel hebt sich der Boden mit einer Geschwindigkeit von einem Millimeter pro Jahr. Aber über eine Million Jahre hinweg führt dieser scheinbar sehr langsame Prozess zu einer Hebung von einem Kilometer. Die Oberflächenerosion würde sich fortsetzen, und das bedeutet, dass alles, was in weniger als tausend Metern Tiefe endgelagert wird,

im Laufe von einer Million Jahren wieder an die Oberfläche gebracht würde.

Die ständige Bewegung der Landoberfläche führt auch dazu, dass sich die Flussläufe verlagern. Vor etwa zwei Millionen Jahren floss der Alpenrhein sowie der größte Teil der heutigen Main- und Neckareinzugsgebiete noch zur Donau und in Richtung Schwarzes Meer und nicht wie heute in Richtung Nordsee (Villinger, 1998, Abb. 2c). Diese drastische Änderung der Flussläufe kann auch zur Bildung von tiefen Tälern führen, was wiederum die Freilegung eines geologischen Endlagers zur Folge haben könnte. Ein Musterbeispiel für eine solche Flussumleitung findet sich im Südschwarzwald, wo vor 18 000 Jahren die Umleitung der Donau über eine Zeitspanne der letzten 10 000 Jahre zur Bildung der 170 m tiefen Wutachschlucht führte (Hebestreit, 1995, Abb. 2d).

Modelle der Landschaftsentwicklung

Geologische Archive können vergangene Veränderungen aufzeigen und einen Rahmen für das Ausmaß der zu erwartenden Veränderungen geben. Um jedoch genauer vorhersagen zu können, wie sich die Landschaft in Deutschland über die nächsten eine Million Jahre entwickeln wird, muss auf Computersimulationen mittels numerischer Methoden zurückgegriffen werden (Abb. 3, Bovy et al., 2020). Diese sogenannten Landschaftsentwicklungsmodelle sind bewährte Instrumente, die von Forschenden entwickelt wurden, um vergangene Veränderungen in der Topographie, wie z. B. die Umlenkung von Flüssen, unter einer Vielzahl von tektonischen und klimatischen Szenarien zu reproduzieren (Infobox Landschaftsentwicklungsmodelle, oben). Phänomene, die in der

” Die Form der heutigen Landschaft ist bekannt und das Ziel ist es vorherzusagen, wie sie sich in den nächsten eine Million Jahren entwickeln wird.

Natur über Tausende bis Millionen von Jahren ablaufen, werden so in Modellen beobachtbar.

Jedes Modell hängt jedoch von einer Vielzahl von Parametern ab, z. B. dem Klima, der Erosionsbeständigkeit des Gesteins und den tektonischen Hebungs- und Senkungsraten. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgt durch die Simulation der vergangenen Landschaftsentwicklung bis zu den heutigen Landformen anhand von geologischen Aufzeichnungen.

Die Abschätzung der Gefahr einer potenziellen Freilegung eines Endlagers durch Oberflächenprozesse in den nächsten eine Million Jahren erfordert ein entgegengesetztes Vorgehen: Die Form der heutigen Landschaft ist hier bekannt und das Ziel ist es vorherzusagen, wie sie sich in den nächsten eine Million Jahren entwickeln wird. Ähnlich wie Klimaforscher, die versuchen, die Entwicklung des Erdklimas in den nächsten 100 Jahren vorherzusagen, können Prognosen zur Landschaftsentwicklung erstellt und eine Reihe plausibler Szenarien entworfen werden. Diese können wiederum in Karten der geschätzten

vertikalen Bodenbewegungen und der Erosionsbeträge mit Mindest- und Höchstwerten umgesetzt werden.

Vorhersage der Landschaftsentwicklung

Für die Bewertung der Langzeitintegrität eines potenziellen Endlagerstandorts muss zunächst viel Forschungsarbeit investiert werden. Die Prozesse, welche die Langzeitintegrität beeinflussen, sind gut verstanden. Es gibt aber nur wenige belastbare Daten zur vergangenen Landschaftsentwicklung in Deutschland. Diese Daten sind aber unverzichtbar, um Vorhersagemodelle für die Zukunft zu generieren. Am GFZ werden die Prozesse erforscht, welche die Landschaften bei ihrer Entstehung, Entwicklung und ihrem Verschwinden formen. Dazu werden auch die Geschwindigkeiten dieser Vorgänge gemessen als Grundlage für Computermodelle, mit denen die Veränderung der Erdoberfläche simuliert werden kann.

Um die Kalibrierung der Modelle zu verbessern, müssen zunächst die be-

stehenden, kosmogen bestimmten Expositionsalter von Landschaftsformen und Erosionsraten (Infobox Kosmogene Nuklide S. 41) auf unerforschte Gebiete in Deutschland und angrenzende Regionen erweitert werden. Dies führt zu einer schrittweisen Verfeinerung insbesondere derjenigen Modellparameter, welche die Erosionsrate in Abhängigkeit von messbaren geometrischen Variablen wie Hangneigung, Krümmung oder der Fläche von Flusseinzugsgebieten steuern (Infobox Landschaftsentwicklungsmodell S. 39).

In welcher Weise die Modellparameter von der Gesteinsart abhängen, ist noch nicht abschließend erforscht. Eine Antwort darauf könnten Ergebnisse von Laborexperimenten liefern, die derzeit am GFZ durchgeführt werden und die speziell auf diese Frage ausgerichtet sind. In diesen Experimenten werden kreisförmige Gesteinsplatten in einem experimentellen, verkleinerten Fluss einer beschleunigten Erosion ausgesetzt.

Die Modellierungsergebnisse liefern den Entscheidungstragenden in Politik, Forschung und Gesellschaft Schätzungen zur Oberflächenerosion. Dabei ist es wichtig, dass die Ungewissheiten der Modelle so gering wie möglich sind. Dies erfordert den Ausbau der bestehenden Infrastruktur, wie beispielsweise der Labore für die Analyse kosmogener Nuklide und der Rechenanlagen, aber auch die Förderung der Zusammenarbeit zwischen Fachleuten für Feld- und Laborarbeiten und für Modellierungen, wie sie am GFZ vorhanden sind.



Kosmogene Nuklide

Eines der wissenschaftlichen Instrumente, mit denen sich feststellen lässt, wie schnell Flüsse und Landschaften erodieren, basiert auf kosmogenen Nukliden. Dies sind Atome, die sich in Gesteinen bilden, wenn sie kosmischer Strahlung ausgesetzt sind. Diese hochenergetischen Teilchen interagieren mit Gestein und Boden knapp unterhalb der Erdoberfläche und erzeugen kosmogene Nuklide mit Raten, die in der Größenordnung von einigen wenigen bis zu zehn Atomen pro Gramm Gestein pro Jahr liegen (ein Gramm Gestein enthält normalerweise etwa 10^{22} Atome). Wenn eine Landschaft schnell erodiert, werden Gestein und Boden an der Erdoberfläche zügig abgetragen und in den nächstgelegenen Fluss gespült. Das erodierte Material liegt nur eine kurze Zeit nahe der Oberfläche, wo es mit kosmischer Strahlung interagieren kann, und reichert daher wenige kosmogene Nuklide an (Abb. 4). Mit hochempfindlichen Massenspektrometern wird die Konzentration solcher kosmogenen Nuklide in heutigen Flusssedimenten gemessen, und anhand dieser Konzentrationen kann abgeschätzt werden, wie schnell oder langsam die Landschaft über mehrere tausend Jahre erodiert. Dies gibt schließlich Aufschluss darüber, wie schnell verschiedene Flusssysteme Täler einschneiden, sich seitlich bewegen und umgeleitet werden.

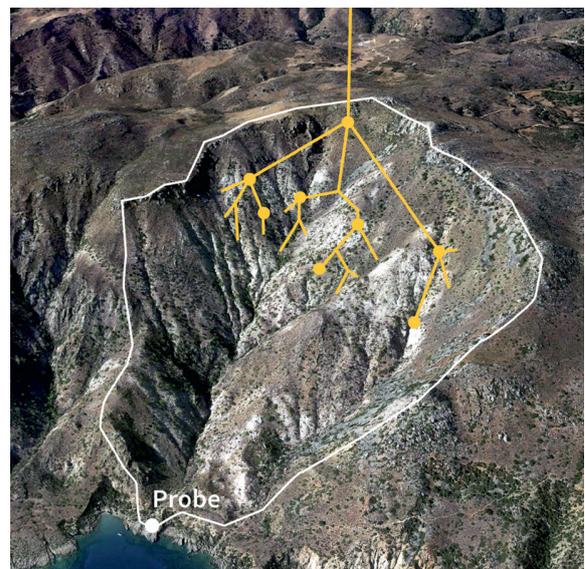


Abb. 4: Die Erdoberfläche ist kosmischer Strahlung ausgesetzt. Je langsamer die Erosion abläuft, desto mehr kosmogene Nuklide werden nahe der Erdoberfläche angereichert. Dies ist in Flusssedimenten messbar und erlaubt die Erosionsrate von einem Einzugsbecken zu bestimmen. (Grafik: P. Klinghammer, GFZ; Hintergrund: Google Earth)

Literatur

- Bovy, B., Braun, J., Cordonnier, G., Lange, R., Yuan, X. (2020). *The FastScape software stack: reusable tools for landscape evolution modelling* EGU General Assembly 2020, Online. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9474>
- Demoulin, A., Hallot, E. (2009). Shape and amount of the Quaternary uplift of the western Rhenish shield and the Ardennes (western Europe). *Tectonophysics*, 474 (3–4), 696–708. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.05.015>
- Hebestreit, C. (1995). *Zur jungpleistozänen und holozänen Entwicklung der Wutach (SW-Deutschland)*. Inst. und Museum für Geologie und Paläontologie.
- Heidbach, O., Ziegler, M., Morawietz, S., Reiter, K., Röckel, L., Cotton, F. (2021). Standortsuche im Spannungsfeld. *System Erde*, 11 (2), 12–17. <https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.2>
- Kierulf, H. P., Steffen, H., Simpson, M. J. R., Lidberg, M., Wu, P., Wang, H. (2014). A GPS velocity field for Fennoscandia and a consistent comparison to glacial isostatic adjustment models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119 (8), 6613–6629. <https://doi.org/10.1002/2013jbo10889>
- Meschede, M., Warr, L. N. (2019). *The geology of Germany: a process-oriented approach*. Springer.
- Stackebrandt, W. (2009). Subglacial channels of Northern Germany—a brief review. *Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 160 (3), 203–210. <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2009/0160-0203>
- Villinger, E. (1998). Zur Flußgeschichte von Rhein und Donau in Südwestdeutschland. *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, 80, 361–398. <https://doi.org/10.1127/jmoghv/80/1998/361>

„Ich wünsche mir, dass sich junge Menschen in den Suchprozess einbringen“



Fridays for Future und Forschende zum Thema Endlagersuche sind sich in vielen Dingen einig: Josef Zens (am Kopfende) im Gespräch mit Anna Ducksch und Simon Jüngling (vorne) sowie Sophia Morawietz und Dr. Moritz Ziegler (hinten).

Josef (Zens, GFZ): Zum Aufwärmen: Könnt ihr kurz erklären, was euch bewegt hat, euch jeweils zu engagieren?

Anna (FFF): Als sich die Bewegung Fridays for Future 2018 gegründet hatte, fing ich an, mich genauer mit dem Thema Klima zu befassen. Ich habe mich eingelesen, und da wurde mir erst klar, wie dramatisch die Klimakrise tatsächlich ist.

Simon (FFF): Das ging mir ähnlich. Potsdam bietet ja beste Voraussetzungen dafür, mit Wissenschaftler*innen ins Gespräch zu kommen, die zum Klima forschen. Mir ging es wie Anna, das Wissen hat sich übersetzt in Angstgefühle.

Anna (FFF): Anstatt in der Angst zu verharren, wollten wir uns engagieren, etwas bewegen und dafür auf die Straße gehen, dass sich in der Gesellschaft etwas ändert.

Moritz (DD): Mein Engagement kommt jetzt nicht unbedingt aus der Angst heraus. Ich war öfter auf Konferenzen und Seminaren zu meinem Fach. Dabei ist mir aufgefallen, dass man sich als junger Mensch meistens an den älteren Forschenden

orientiert und überlegt, ob das, was man sagt, gut ankommt. Und dann gab es ein Schlüsselerlebnis, als ich bei einem Treffen nur mit annähernd Gleichaltrigen zusammen war. Ich habe gemerkt, wie toll es ist, ausschließlich auf Augenhöhe zu reden. Das wollte ich fortsetzen. Und so kamen Sophia und ich auf die Idee, eine Tagung anzubieten speziell für junge Leute, die wie wir selbst zum Thema Endlager forschen.

Sophia (DD): Blöd nur, dass wir mit unserer Idee der Decay Days zwei Monate vor Corona landeten. Und jetzt sind wir beide in Elternzeit.

JZ (GFZ): Warum der Name Decay Days?

Sophia (DD): Das ist eine Anspielung auf den radioaktiven Zerfall, auf Englisch Decay, und gleichzeitig Akronym für DEep GeologiCAI RepositorY, also Endlager. Wir wollten uns mit so einem Nachwuchstreffen gerade auch international vernetzen. Dieser Austausch fehlte uns bei den bisherigen Formaten. Rein von der europäischen Gesetzgebung ist die Endlagersuche in jedem Land individuell geregelt.

JZ (GFZ): Ich könnte mir vorstellen, dass man bei einer Party auf Wohlwollen stößt, wenn man sich als Mitglied der Fridays for Future zu erkennen gibt. Aber mit Endlagerforschung ...

Moritz (DD): Naja, das Zeug ist da, jetzt muss es halt weg. Und wir forschen, damit es am sichersten verwahrt wird. Klar gucken einen die Leute schon mal komisch an, wenn man erzählt, was man macht. Aber wenn ich erkläre, wieso, dann finden es die meisten gut.

JZ (GFZ): Wie ist das bei Fridays for Future: Spielen Atomenergie und Endlagerung eine Rolle in euren Debatten?

Simon (FFF): Nein, der Fokus liegt klar auf den erneuerbaren Energien. Ich selbst habe mich erst einmal zur Endlagerung informieren müssen für das heutige Gespräch. Kernenergie wird auch in der Klimabewegung kontrovers diskutiert, aber eher nachrangig.

Anna (FFF): Bei uns geht es in erster Linie um Klima und um Klimagerechtigkeit. Atomenergie kommt höchstens dann ins Spiel, wenn es um den Vergleich von Emissionen geht. Wo ich eine Verbindung sehe, ist die Frage nach Gerechtigkeit, wenn es um Standortauswahl für ein Endlager geht.

JZ (GFZ): Würdet ihr es akzeptieren, wenn ein Endlager in die Nähe eures Wohnortes kommen sollte?

Anna (FFF): Wenn das das Ergebnis der wissenschaftlichen Suche und der demokratischen Debatte ist, ja.

Simon (FFF): Ja.

Sophia (DD): Das ist interessant, was ihr sagt. Das deckt sich mit meinen Erfahrungen bei den bisherigen Beteiligungsformaten in der Endlagersuche. Junge Menschen scheinen eher in den Prozess zu vertrauen als ältere.

JZ (GFZ): Hast du eine Erklärung dafür?

EIN EXPERIMENT: Vier junge Menschen unterhalten sich über ihr jeweiliges Engagement. Zwei sind bei den Fridays for Future in Potsdam aktiv, die anderen beiden sind Nachwuchsforschende am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ und organisieren zudem vom Potsdamer Telegrafenberg aus Treffen – die Decay Days – für Nachwuchsforschende, die zum Thema Endlagersuche arbeiten. Beide Themen haben viel gemeinsam: Klimaschutz wird kontrovers und bisweilen hoch emotional diskutiert, das gilt auch für das Thema Endlagersuche. Beide Themen sind mit Ängsten verbunden. Und beide Themen betreffen vor allem nachfolgende Generationen.

Was wissen die einen von den anderen? Warum engagieren sie sich? Interessieren sie sich für das jeweils andere Thema?

Wir einigen uns für das Interview auf das kollegiale Du. Um das Lesen zu erleichtern, stellen wir hinter die Namen die Zugehörigkeit in Klammern (Fridays for Future, kurz FFF, und Decay Days, abgekürzt DD).

Sophia (DD): Ich habe den Eindruck, dass bei den Diskussionsveranstaltungen viele ältere Menschen dabei sind, die gegen Gorleben und CASTOR-Transporte demonstriert haben und

die ihr Erbe gefährdet sehen. Damals lief ja auch einiges falsch, sodass an vielen Stellen eine Vertrauensbasis fehlt. Die Jungen wollen harte Fakten, am besten eine Zusammenstellung mit Fragen und Antworten, und dann möglichst schnell in die Umsetzung.

Simon (FFF): Dabei könnten wir eine Linie ziehen zwischen den Anti-Atom-Demos der letzten Jahrzehnte und den Fridays for Future. Die Belange der Umweltbewegung haben sich verändert und doch verstehe ich uns als eine Art Nachfahren der damaligen Proteste. Deren Fokus auf Kernenergie statt fossiler Energie sehe ich heute aber sehr kritisch.

JZ (GFZ): Das erklärt aber noch nicht den Unterschied beim Vertrauen in den politischen Prozess.

Anna (FFF): Ich habe den Eindruck, die Stimmen der Bürger*innen werden in diesem Prozess gehört und die Bedenken finden Raum.

Moritz (DD): Das ist auch meine Erfahrung. Ich finde das Konzept hinter dem Suchprozess gut, ob es wirklich so umgesetzt wird, muss sich noch zeigen.



Anna J. Ducksch und Simon Jüngling engagieren sich in der Fridays-for-Future-Ortsgruppe Potsdam.

Sophia Morawietz und Dr. Moritz Ziegler sind Nachwuchsforschende in der GFZ-Sektion 2.6 Erdbebengefährdung und dynamische Risiken.



Anna (FFF): Ein Unterschied ist auch, dass die Klimakrise akuter ist und ein weltweites Risiko birgt. Wir haben wirklich Angst davor, was passiert, wenn Kipppunkte erreicht und überschritten werden.

JZ (GFZ): Es ist also das Klimarisiko der Zukunft, das euch bei den „Fridays“ Angst macht und emotionalisiert ...

Anna und Simon (FFF): Ja, genau ...

Sophia und Moritz (DD): Uns auch! (Sophia: So alt sind wir nun auch nicht.)

Alle lachen

JZ (GFZ): ... und wovor habt ihr konkret Angst?

Anna (FFF): Einerseits ist da die Ungewissheit vor dem, was kommt. Und dann zugleich das Tempo und die Wucht, mit der Szenarien aus der Klimaforschung immer schneller Wirklichkeit werden.

Simon (FFF): Hinzu kommt, dass die Veränderung, die wir jetzt erleben, das Ergebnis dessen ist, was wir vor Jahrzehnten in die Atmosphäre gepustet haben. Wir wissen, dass unsere heutigen Emissionen erst in zehn bis dreißig Jahren ihren vollen Effekt entfalten werden. Das vorherrschende Gefühl ist: Es wird noch schlimmer.

Moritz (DD): Ich hab' vor meinem inneren Auge den Westantarktischen Eisschild, der ja bereits als destabilisiert gilt. Den sehe ich ins Meer rutschen ...

Sophia (DD): Man muss gar nicht auf Ereignisse weit weg schauen, um Angst zu bekommen oder betroffen zu sein. Hitzewellen, Dürren, die Flut im Ahrtal: All das trifft einen persönlich. Die Auswirkungen der Klimakrise werden direkt spürbar.

Simon (FFF): Eigentlich müsste die Wissenschaft doch jeden Monat einmal auf den Tisch hauen und auf die Klimakrise aufmerksam machen.

JZ (GFZ): Das tut eine ganze Reihe von Forschenden seit Jahrzehnten. Viele sind dafür massiv in den Medien angefeindet worden, bis hin zu Anspielungen auf die Nazi-Zeit. Ihr kennt doch sicher die Vorwürfe der „Öko-Diktatur“.

Simon (FFF): Und doch bleibt Kommunikation aus der Wissenschaft absolut wichtig. Schweigen in der öffentlichen Diskussion kann doch keine Option sein, sonst schweigen wir uns in die Katastrophe. Ich sehe da auch den Journalismus in der Pflicht. Wir brauchen Journalismus, der sich mit Wissenschaft auskennt.

Sophia (DD): Mai Thi [Nguyen-Kim] ist da ein gutes Beispiel. Die ist Wissenschaftlerin und erreicht jetzt ein Millionenpublikum. So was wünsche ich mir viel mehr, gerade auch im öffentlich-rechtlichen Rundfunk. Die Medien sollten ein Basiswissen schaffen, damit informiert diskutiert werden kann.

JZ (GFZ): Nicht alle haben so ein Talent wie Mai Thi.

Simon (FFF): Aber Wissenschaft darf nicht einfach bei der Publikation einer Studie aufhören. Die Ergebnisse müssen verständlich gemacht werden, ich würde sogar sagen, mindestens auf zwei Arten – einmal für Wissenschaftsjournalist*innen und fachlich tiefer Interessierte, einmal so, dass es auch Kinder verstehen. Wie soll denn sonst Vertrauen in die Wissenschaft wachsen?

Moritz (DD): Wobei ich davor warnen möchte, der Wissenschaft blind zu vertrauen. Es ist sehr wichtig, die Ergebnisse der Forschung immer wieder zu hinterfragen und neue Erkenntnisse zu berücksichtigen. Das haben wir bei Corona gut gesehen. Alle haben dazugelernt.



Simon Jüngling, Sophia Morawietz, Anna J. Ducksch und Dr. Moritz Ziegler (v. links nach rechts)

JZ (GFZ): Wie ist das bei den Beteiligungsformaten bei der Endlagersuche, werden da Forschungsergebnisse hinterfragt?

Sophia (DD): Nein, da geht es weniger um ein Vertrauen oder Nicht-Vertrauen in die Wissenschaft und deren Ergebnisse, sondern eher um ein Nicht-Vertrauen in den politischen Prozess und die Institutionen. Da wird manchmal erbittert diskutiert.

Moritz (DD): Stimmt. Wir als Wissenschaft sind da eigentlich fein raus, denn die Zweifel richten sich gegen die Politik und das Verfahren als solches. Ich finde das schade, denn es wäre spannend, mit der Bevölkerung über Forschungsergebnisse zu diskutieren.

JZ: Wie schätzt ihr das Verfahren ein?

Sophia (DD): Der Anspruch an den Suchprozess ist, dass er so solide konzipiert ist, dass er nicht von einigen wenigen Menschen torpediert werden kann. Es ist als selbsthinterfragend und lernend angelegt. Das finde ich gut.

Anna (FFF): Und wer beteiligt sich daran? Überwiegend die, die ein Endlager blöd finden?

Sophia (DD): Das würde ich nicht sagen. Es besteht ja ein Grundkonsens, dass man ein Endlager braucht. Da gibt es höchstens mal Einzelstimmen, die grundsätzlich dagegen sind.

Moritz (DD): Am Anfang konnte man schon den Eindruck haben, dass vor allem alteingesessene Bürgerinitiativen Leute entsenden.

Sophia (DD): Inzwischen empfinde ich das anders. Nach dem ersten Zwischenbericht beteiligen sich zunehmend Kommunalvertreter*innen, ich erinnere mich an eine Bürgermeisterin, die mitdiskutierte, aber auch viele andere. Es ist jetzt ein gewisses Betroffenheitslevel erreicht.

Simon (FFF): Was ich da aber fürchte, ist eine Haltung „Endlager ja, nur nicht bei mir“, das „Not-in-my-backyard-thinking“, wie ich es bei Windkraftanlagen erlebe, so eine Anti-Haltung.

JZ (GFZ): Seid ihr deshalb bei den Fridays for Future nicht „against“ und „anti“, sondern „for“?

Anna (FFF): Moment! Wir sind schon Anti-Kohle ...

Simon (FFF): ... und Anti-SUV.

Anna (FFF): Aber es stimmt, das „for“ in „Fridays for Future“ ist wichtig. Wir sind vor allem für Klimagerechtigkeit. Für eine Verkehrswende. Wir wollen uns „für“ etwas engagieren, nicht dagegen.

Sophia (DD): Da sind wir wieder bei den unterschiedlichen Generationen und Sichtweisen. In der Endlagersuche geht es ja um ein Bauwerk, das uns persönlich nicht oder kaum mehr betreffen wird, sondern die nachfolgenden Generationen. Insofern wünsche ich mir sehr, dass sich die jungen Menschen in den Prozess der Suche einbringen.

Simon (FFF): Ich habe da ein Vertrauen in den Prozess und wünsche mir hier einen starken Staat. Ich weiß, das klingt komisch, aber ich denke, die Fridays for Future und mit ihnen viele andere wünschen sich in Klimafragen einen starken Staat.

Anna (FFF): Ja, genau, und weniger Lobbyismus, wie wir ihn bei der Kohle erlebt haben.

Das Interview führte Josef Zens (GFZ). ■

(alle Fotos: Reinhardt & Sommer)

Wir werden den Dialog suchen

von Oliver Heidbach, Michael Kühn, Leni Scheck-Wenderoth und Josef Zens

Atommüll ist uns unheimlich. Der nukleare Abfall macht uns Angst. Zudem gehören wütende Demonstrationen gegen Wiederaufbereitungsanlagen, gegen CASTOR-Transporte und gegen eine unterirdische Endlagerung zum kulturellen Gedächtnis in Deutschland. Aber, wie es ein junger Forscher aus dem GFZ salopp ausdrückte: „Das Zeug ist da – und jetzt muss es weg.“

Nur wohin damit? Wohin mit einer strahlenden Altlast, die über Hunderttausende von Jahren lebensgefährlich bleiben wird? Diese Frage können weder „die Politik“ noch „die Wissenschaft“ allein beantworten. Vielmehr müssen Politik, Wissenschaft und Bewohnerinnen und Bewohner in Regionen, die für einen Endlagerstandort in Frage kommen, in einen Dialog eintreten und ein Ergebnis aushandeln. Die deutsche Politik hat hierfür ein weltweit einmaliges Verfahren auf den Weg gebracht, das diesen Prozess ermöglichen soll – und auf dem Weg zu einer Lösung auch Raum bietet für Nachjustierungen. Klar ist: Der Untergrund ist die beste aller Optionen. Und ebenfalls klar ist: Wir müssen uns als Land der Verantwortung stellen und können den Müll nicht einfach exportieren. Also müssen wir einen Standort finden.

Der naturwissenschaftliche Teil der Suche ist für sich genommen bereits eine enorme Herausforderung. Geowissenschaften müssen sich mit ihren Teildisziplinen der Geologie, Geophysik und Geochemie der Aufgabe stellen, einen Ort im Untergrund zu identifizieren, der für eine Million Jahre Sicherheit gewährleistet. In diesem für Menschen unvorstellbaren Zeitraum wird sich die Landschaft im heutigen Deutschland massiv verändern, so wie sie das auch in den letzten eine Million Jahren getan hat. Das können wir

uns aus der jüngsten Erdgeschichte und aus historischen Aufzeichnungen erschließen. Es ist 12 000 Jahre her, dass in der Eifel ein Vulkan ausbrach – ungefähr so stark wie der Pinatubo. Noch nicht einmal 300 Jahre ist es her, dass ein Erdbeben der Stärke 6,4 die Gegend um Düren im heutigen Nordrhein-Westfalen erschütterte.

„Das Zeug ist da – und jetzt muss es weg.“

Das heißt, in den kommenden tausend Jahrtausenden wird es schwere Erschütterungen geben, vielleicht bricht ein Vulkan aus und ziemlich sicher kommt eine neue Eiszeit. Zuvor jedoch wird der Meeresspiegel weiter steigen und die Inseln im Wattenmeer überfluten. Das Land wird sich immer noch dort heben, wovon rund 20 000 Jahren ein kilometerdicker Eispanzer die Erdkruste mehrere hundert Meter tief eingedellt hatte. Und die Plattentektonik deformiert die Erdkruste und wird unsere Landschaft, wenn auch langsam, verändern.

Derlei Szenarien müssen mit unserem heutigen Wissen über die geologische Entstehung und Beschaffenheit des Untergrunds kombiniert werden. Dazu brauchen wir Bohrungen, um die Gesteine und deren geochemische Eigenschaften direkt zu charakterisieren. Wir werden geophysikalische Signale auswerten, um daraus indirekt eine Art „Ultraschallaufnahme des Untergrunds“ zu erstellen und wir werden mit allen

verfügbaren Daten unsere Modelle anwenden, erweitern und verbessern. Wir kooperieren dazu mit Einrichtungen auf der ganzen Welt, um die drei für Deutschland infrage kommenden Wirtsgesteine so genau wie irgend möglich zu erforschen: In Deutschland wissen wir bereits sehr viel über Steinsalz, aus der Schweiz kommen Ergebnisse zu Tonstein und aus Skandinavien zum Kristallin.

Es sind nicht einmal mehr zehn Jahre bis zur geplanten endgültigen Standortentscheidung. Bis dahin ist es die Aufgabe der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), aus den vorhandenen Daten der geologischen Dienste der Bundesländer, der Bundesbehörden und der Forschungseinrichtungen die Gebiete in Deutschland mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation für die Errichtung eines Endlagers immer weiter einzugrenzen und immer genauer auf ihre Eignung zu prüfen. Momentan steht fest, dass rund die Hälfte unseres Landes nicht geeignet ist, einen Endlagerstandort aufzunehmen.

Auf dem Weg des Standortauswahlverfahrens müssen die Akteurinnen und Akteure mit den Aufsichtsbehörden, der Wissenschaft und der Öffentlichkeit darüber sprechen, mit welchen Methoden und aus welchen Gründen Gebiete ausgeschlossen oder ausgewählt werden. Wir werden zumindest von unserer Seite aktiv in den Dialog mit Bürgerinnen und Bürgern eintreten, um sie über die Forschungsfragen und unsere Antworten ebenso zu informieren wie über die Grenzen unseres Wissens. Wir verstehen uns als Teil dieses einmaligen Prozesses der Standortsuche und als Mitglieder der Gesellschaft, die den Atommüll erzeugt hat. ■

Kontakt:
endlagerforschung@gfz-potsdam.de

Forschungslandschaft Endlager



[stock.adobe.com](https://www.adobe.com/stock)

Verglichen mit der Situation in anderen Ländern ist die Forschungslandschaft zur „Endlagerproblematik“ in Deutschland komplex. Auf Bundesebene sind drei Ministerien für die Forschung zur nuklearen Entsorgung zuständig: Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Beim BMUV sind die beiden Hauptakteure bei der Standortsuche für ein Endlager angesiedelt. Dies sind die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mit dem Auftrag, den bestmöglichen Standort zu suchen und das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), um die Ergebnisse der BGE zu prüfen. Beide Einrichtungen entwickeln zur Erfüllung ihrer Aufgaben Forschungsprogramme mit direktem Bezug zum jeweiligen Aufgabenbereich. Diese führen sie z. T. selbst durch oder geben sie in Auftrag.

Das BMWK fördert Forschungsvorhaben im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms zu Themen der nuklearen Entsorgung. Dies umfasst insbesondere die „anwendungsorientierte Grundlagenforschung“, hat aber auch das explizite Ziel der Nachwuchsförderung

im Sinne der von der Bundesregierung als notwendig erachteten Kompetenzentwicklung in Themen der kerntechnischen Sicherheit. Thematisch gibt es Überschneidungen mit den Forschungsthemen der BGE und dem BASE. Die Projekte können von Hochschulen, außeruniversitären Forschungseinrichtungen oder auch Unternehmen durchgeführt werden.

Im Gegensatz bzw. als Ergänzung dazu, finanziert das BMBF Vorhaben zur nuklearen Entsorgung primär über die Haushaltsförderung der Helmholtz-Gemeinschaft. Daneben werden Projekte zum Rückbau kerntechnischer Anlagen unterstützt. Die Bandbreite der Projekte reicht von sehr grundlegenden wissenschaftlichen Themen bis hin zu sehr angewandten technischen Entwicklungen. Auch hier sind universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen mit einem Fokus auf Nachwuchsförderung aber auch Unternehmen eingebunden.

Die grundsätzliche Struktur und die Zusammenarbeit der verschiedenen Forschungseinrichtungen in Deutschland befinden sich derzeit in einer Phase der Weiterentwicklung, da in den letzten Jahren mit der BGE und dem BASE neue Akteure hinzugekommen sind und die Umsetzung des StandAG neue Erfordernisse mit sich bringt. Es werden zurzeit neue Forschungsagenden und -pläne erstellt, hinsichtlich derer sich die unterschiedlichen Institutionen organisieren müssen. In dem Rahmen ist eine dynamische Entwicklung zu beobachten und es sind in naher Zukunft weitere Veränderungen zu erwarten. So ist beispielsweise zurzeit eine gemeinsame Arbeitsgruppe der wissenschaftlichen Akademien dabei, ein Positionspapier

zum Forschungsbedarf im Thema zusammenzutragen. Zu der Forschungsförderung finden Ressorttreffen der Ministerien statt, in denen thematische Zuweisungen diskutiert werden. Ziel ist, Überschneidungen und Doppelförderungen auszuschließen. Darüber hinaus werden Expertengremien einberufen, die relevante Forschungsthemen für Förderprogramme zusammenstellen.

Noch ist in der Forschungs- und Forschungsförderungslandschaft nicht immer eine klare thematische Zuordnung zu erkennen. Durch koordinierte Absprachen untereinander könnte das vorhandene Potenzial aller beteiligten Einrichtungen besser genutzt werden. Auch ist die Priorisierung von Forschungsaufträgen aufgrund fehlender Transparenz der Entscheidungsprozesse nicht immer nachvollziehbar und eine Qualitätssicherung mitunter nicht gewährleistet. Vergaberechtliche Randbedingungen machen Auftragsforschung teilweise schwierig. Gleichmaßen wichtig sind die Wissenschaftsgebiete, welche die gesellschaftlichen Dimensionen des Endlagerprojekts mit Forschungserkenntnissen begleiten. Hierfür braucht es Forschung in Kommunikationswissenschaft, Didaktik, Sozialwissenschaft, Psychologie und Rechtswissenschaft in Bezug auf den Dialog mit der Gesellschaft, der Beteiligung der Öffentlichkeit am Verfahren und die Gestaltung von Entscheidungsfindungsprozessen.

Mit dem Neustart der Standortsuche hat sich eine grundlegend veränderte Gesamtsituation ergeben, die noch immer einen Findungsprozess durchläuft, mit den Zielen, die Expertise aller Beteiligten optimal zu nutzen und den bestmöglichen Standort zu finden. ■

Helmholtz-Zentren im Forschungsverbund iCross



Aufgeschnittenes Modell eines Endlagerbehälters aus Stahl für verbrauchte Brennelemente, der in Bentonit (Tonmineral) eingebettet in einem Stollen lagert; Beispiel aus dem Untertagelabor Mont Terri, Schweiz. (Foto: M. Kühn, GFZ)

Ein Beispiel für einen von BMBF und Helmholtz geförderten Forschungsverbund zu Thema Endlagerstandort ist iCross, Integrität von Endlagern für nukleare Abfälle – Übergreifendes Systemverständnis und Analyse.

Die im Jahr 2017 vom Bundestag verabschiedete Verfahrensweise zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle sieht vor, dass alle drei möglichen Wirtsgesteine also Steinsalz, Kristallin und Tongesteine als Standort für ein geologisches Tiefenlager untersucht werden sollen. Diese Gesteinstypen haben sehr unterschiedliche physikalisch-chemische Eigenschaften, so dass die Einlagerungskonzepte unterschiedlich sein müssen. Diese umfassen die ingenieurtechnische Barriere, also den Kanister, in denen der radioaktive Abfall eingebunden ist, die geotechnische Barriere, also das Füllmaterial zwischen Kanister und dem Wirtsgestein und die geologische Barriere, also das Wirtsgestein selber und die darüber liegenden Schichten. Aufgrund der Verschiedenheit der drei Wirtsgesteine müssen unterschiedliche Endlagerkonzepte untersucht werden mit dem Ziel vergleichend die bestmögliche Sicherheit zu erreichen. Im Projekt iCross, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, FKZ 02NUK053) und der Helmholtz-Gemeinschaft (SO-

093) gefördert wird, werden Endlagerkonzepte auf unterschiedlichen Skalen vom Nahfeld am Kanister bis hin zum Fernfeld auf Kilometerskala und darüber hinaus untersucht. Dabei arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Nuklear-, Geo- und Biowissenschaften sowie aus Chemie, Physik und Informatik im Rahmen des forschungsbereichsübergreifenden Projekts (Energie sowie Erde & Umwelt) zusammen, um die Interaktion der unterschiedlichen Prozesse über viele Skalen hinweg zu verstehen und in Modellen abzubilden (Bosbach et al., 2021, <https://sand.copernicus.org/articles/1/85/2021/>).

Parallel zu den Modellrechnungen werden mit neuartigen Laborexperimenten bislang unzureichend verstandene Prozesse untersucht und damit die entsprechende Wissensbasis grundlegend erweitert. Die daraus gewonnenen wichtigen Kenngrößen werden in den Modellen verwendet, um Prognosen zur Entwicklung der unterschiedlichen Endlagerkonzepte zu simulieren. Dabei müssen Prozesse auf der Nanoskala bis hin zu Endlagerentwicklungen im regionalen Maßstab mit der notwendigen Genauigkeit berücksichtigt werden. Das Konsortium aus fünf Helmholtz-Zentren (Forschungszentrum Jülich (FZ), Koordination), Deutsches GeoForschungszentrum (GFZ), Helmholtz-Zentrum Dres-

den-Rossendorf (HZDR), Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)) beteiligt sich auch aktiv am internationalen, experimentellen Programm im Untergrundlabor Mont Terri (Schweiz, Opalinuston). Hier liegt der Schwerpunkt auf der Wirtsgesteinsformation Tonstein, die in der Bundesrepublik bisher nicht im Fokus der Endlagerforschung stand.

Eine weitere Besonderheit des verfolgten wissenschaftlichen Ansatzes im Projekt iCross ist die Einbindung moderner Methoden der Informationswissenschaften in dem z. B. die umfangreichen Datensätze und Simulationen visuell interaktiv bearbeitet und die komplexen Prozessabläufe im geologischen Kontext sichtbar und somit erfassbarer gemacht werden. Diese 4D-Visualisierung kann in Zukunft auch ein wertvolles Instrument für die Wissenschaftskommunikation sein, um die Prozesse, die in einem Endlager ablaufen, begreifbar zu machen.

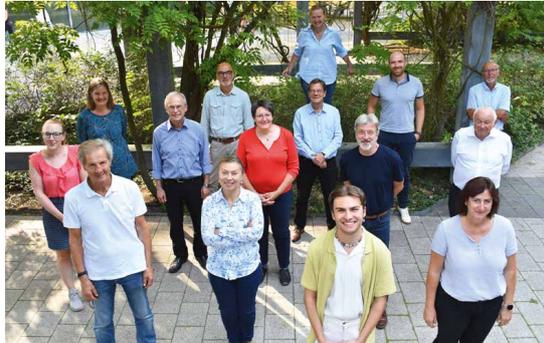
Die Langzeitvision dieser Helmholtz-Initiative ist die Etablierung eines multidisziplinären Kompetenzzentrums als Plattform für die Endlagerforschung mit hoher internationaler Sichtbarkeit. Dabei wird eine enge Kooperation mit allen an der Endlagerproblematik beteiligten Forschungseinrichtungen sowie den entsprechenden Genehmigungsbehörden und Ministerien angestrebt. ■

Vertrauen aufbauen – Das Nationale Begleitgremium

Das Nationale Begleitgremium (NBG) begleitet das Standortauswahlverfahren für die Endlagersuche insbesondere hoch radioaktiver Abfälle als unabhängiges, pluralistisch zusammengesetztes, gesellschaftliches Gremium gemäß Standortauswahlgesetz § 8. Aufgabe des Nationalen Begleitgremiums ist die vermittelnde und unabhängige Begleitung des Standortauswahlverfahrens, insbesondere der Öffentlichkeitsbeteiligung, mit dem Ziel, Vertrauen in die Verfahrensdurchführung aufzubauen. Es kann sich unabhängig und wissenschaftlich mit sämtlichen Fragestellungen das Standortauswahlverfahren betreffend befassen, die zuständigen Institutionen jederzeit befragen und Stellungnahmen abgeben. Es kann dem Deutschen Bundestag Empfehlungen zum Standortauswahlverfahren geben.

Die Mitglieder erhalten Einsicht in alle Akten und Unterlagen des Standortauswahlverfahrens des Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), des Vorhabenträgers, der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und der geologischen Dienste der Länder. Die Beratungen des NBG finden zum größten Teil öffentlich statt. Alle Beratungsergebnisse werden publiziert und sind für die Öffentlichkeit verfügbar.

Die Mitglieder dürfen weder einer gesetzgebenden Körperschaft des Bundes oder eines Landes noch der Bundes- oder einer Landesregierung angehören; sie dürfen keine wirtschaftlichen Interessen in Bezug auf die Standortauswahl oder die Endlagerung im weitesten Sinne haben. Die Amtszeit eines Mitglieds beträgt drei Jahre. Eine Wiederberufung ist zweimal möglich. Das Nationale Begleitgremium besteht aus 18 Mitgliedern. Zwölf von ihnen sollen anerkannte Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens



Das Nationale Begleitgremium ist ein unabhängiges, pluralistisch zusammengesetztes gesellschaftliches Gremium. (Foto: NBG, Aygül Cizmecioglu)

sein. Sie werden vom Deutschen Bundestag und vom Bundesrat auf der Grundlage eines gleichlautenden Wahlvorschlages gewählt; daneben werden sechs Bürgerinnen oder Bürger, darunter zwei Vertreterinnen oder Vertreter der jungen Generation, die zuvor in einem dafür geeigneten Verfahren der Bürgerbeteiligung nominiert worden sind, von der Bundesministerin oder dem Bundesminister für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV).

Vier Fachgruppen (FG) des NBG erarbeiten Konzepte und Empfehlungen und nehmen Themen en détail unter die Lupe: FG I Öffentlichkeitsbeteiligung, FG II Geologie und Grundlagendaten, FG III Strahlenschutz und Sicherheit sowie FG IV Selbsthinterfragendes Verfahren.

Hierbei begleitet die Fachgruppe II Geologie und Grundlagendaten kritisch den Umgang mit allen geowissenschaftlichen Aspekten des Verfahrens und setzt sich für größtmögliche Transparenz ein. Dazu begleitet und koordiniert die FG II z. B. die Arbeit der Sachverständigengruppe, die im Namen des NBG auch jene geologischen Daten einsehen kann, die nicht öffentlich zugänglich sind.

Das neue Geologiedatengesetz trat am 30. Juni 2020 in Kraft und unterscheidet zwischen staatlichen und nichtstaatlichen geologischen Daten, unterteilt in

drei Kategorien. Jede Kategorie hat eigene Fristen, welche deren öffentliche Bereitstellung regeln. Nach wie vor können nicht (sofort) alle geologischen Daten veröffentlicht werden – entweder weil z. B. die Fristen zur Veröffentlichung noch nicht abgelaufen sind oder weil in Einzelfällen z. B. das Interesse eines Unternehmens an der Geheimhaltung der Daten höher eingestuft wird, als das öffentliche Interesse. Hier regelt das Gesetz, dass das NBG das Recht auf Dateneinsicht hat: Konkret haben die Mitglieder des Nationalen Begleitgremiums (NBG) und bis zu fünf vom NBG beauftragte externe Sachverständige die Möglichkeit, die Daten einzusehen, zu bewerten und in Gutachten Stellung dazu zu nehmen, ob diese Daten im Standortauswahlverfahren zutreffend bewertet und sachgerecht berücksichtigt worden sind.

Zurzeit ist Prof. Magdalena Scheck-Wenderoth, Direktorin des GFZ-Departments Geosysteme, als Person des öffentlichen Lebens in das Nationale Begleitgremium berufen und ist Mitglied der Fachgruppe II. Prof. Michael Kühn, Leiter der GFZ-Sektion Fluidsystemmodellierung, und Prof. Michael Weber, Leiter der ehemaligen GFZ-Sektion Geophysikalische Tiefensondierung, sind durch das NBG beauftragte Sachverständige, die Dateneinsicht nehmen und stichprobenhaft die Arbeitsweise der BGE nachvollziehen und bewerten. ■



Weiterführende Informationen im Internet zur **Endlagerung** hochradioaktiver Abfälle



» Nationales Begleitgremium (NBG)

Unter [↗ https://www.nationales-begleitgremium.de](https://www.nationales-begleitgremium.de) sind allgemeine Informationen zum Gremium und zur Endlagersuche in Deutschland zu finden. In der Rubrik „**Endlagersuche**“ werden das Verfahren und die Hintergründe detailliert vorgestellt.



» Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE)

Die BGE hält umfangreiche Informationen auf der Website [↗ https://www.bge.de](https://www.bge.de) bereit.

In der Rubrik „**Endlagersuche**“ stellt sie das Standortauswahlverfahren vor:

[↗ https://www.bge.de/de/endlagersuche/standortauswahlverfahren](https://www.bge.de/de/endlagersuche/standortauswahlverfahren)



» Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE)

Das umfangreiche Informationsmaterial des BASE auf [↗ https://www.base.bund.de](https://www.base.bund.de) soll helfen, die komplexen Zusammenhänge des Standortauswahlverfahrens zu verstehen.

In der Rubrik „**Themen/Endlagersuche**“ stellt BASE verständlich aufbereitetes Material zur Verfügung:

[↗ https://www.base.bund.de/DE/themen/soa/soa_node.html](https://www.base.bund.de/DE/themen/soa/soa_node.html)



» NAGRA

Die NAGRA (Schweizer Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) stellt unter [↗ https://www.nagra.ch/de/download-center](https://www.nagra.ch/de/download-center) deutschsprachige Hintergrundinformationen in der Kategorie

„**Broschüren**“ zur Verfügung. Darunter beispielsweise die Themenhefte

„**Tongesteine**“ [↗ https://www.nagra.ch/de/themenheft-tongesteine](https://www.nagra.ch/de/themenheft-tongesteine),

„**Erdbeben**“ [↗ https://www.nagra.ch/de/themenheft-erdbeben](https://www.nagra.ch/de/themenheft-erdbeben) sowie

„**Langzeitsicherheit**“ [↗ https://www.nagra.ch/de/themenheft-langzeitsicherheit](https://www.nagra.ch/de/themenheft-langzeitsicherheit).



Netzwerk

Worauf die Wissenschaft nach der Hochwasserkatastrophe 2021 Antworten finden muss



Verstopfung eines kleinen Zuflusses der Ahr durch hölzerne Abfälle (Foto: M. Dietze, GFZ)

Am 14. Juli 2021 fielen in der Eifel in nur 22 Stunden zwischen 60 und 180 mm Regen, eine Menge, die sonst in mehreren Monaten fällt, und die zu katastrophalen Überflutungen geführt hat. Die Ereignisse waren weitaus zerstörerischer, als bestehende Modelle vorhergesagt hatten. Forschende des GFZ machen dafür eine Reihe von Effekten verantwortlich, die bisher in Mitteleuropa kaum aufgetreten und daher in diesen Regionen noch nicht genug berücksichtigt wurden. Dazu gehört insbesondere das Mitreißen von Totholz und Sedimenten, beides Effekte, die mit fortschreitendem Klimawandel weiter an Bedeutung gewinnen dürften. Über die Mechanismen, die die Auswirkungen der Flut verstärkt haben, berichten Dr. Michael Dietze und Dr. Ugur Öztürk in der Zeitschrift *Science*. Sie geben auch einen Ausblick auf ein neues Forschungsvorhaben, das hier ansetzt, um künftige Vorhersagen realistischer zu gestalten.

Die Forschenden waren im Rahmen eigener Untersuchungen in der Eifel zufällig Zeugen dieser Überflutung. Was sie selbst erlebten, war allerdings nur ein kleiner Ausschnitt der eigentlichen Katastrophe, die in den Tälern von Ahr, Erft

und Rur ihren Lauf nahm. Die Flut in den Tälern der Eifel war weitaus gewaltiger, schneller und unberechenbarer, als das für ein solches Ereignis in der Mitte Europas bislang angenommen wurde. Die Ursachen dafür sind vielfältig und uns durchaus bekannt, allerdings bisher nicht aus Mitteleuropa, sondern aus Wüsten und den Tropen.

Der Regen konnte nicht mehr in den durch wochenlang auftretende Regenfälle schon gesättigten Untergrund einsickern. Er war auch zu stark, um dann nur als dünner Wasserfilm die Hänge herunterzulaufen. Stattdessen verwandelten sich Hänge regelrecht in breite Flüsse und transportierten das Wasser statt mit einer Geschwindigkeit von einigen Zentimetern plötzlich mit einigen Metern pro Sekunde, also bis zu hundert Mal schneller. Dadurch konnte es in den Haupttälern viel schneller zu einer Flutwelle zusammenlaufen.

Zusätzlich entwickelte das Wasser eine enorme Erosionskraft: Zum einen grub es sich in die Hänge und konnte in den so erzeugten Erosionsrinnen nochmals schneller abfließen. Zum anderen mobilisierte es erhebliche Mengen Sediment

und Totholz. Einmal in den Tälern angekommen, trieben die Baumstämme und Äste auf die zahlreichen Brücken zu, die es z. B. im Ahrtal gibt. Dort verfangen sie sich und führten zu sogenannten Verkläusungen. Dadurch wurde der Abfluss behindert, das Wasser staute sich und erreichte auch höher gelegene Gebiete.

Mit anhaltendem Klimawandel werden Niederschlagsereignisse wie das am 14. Juli 2021 häufiger. Daher muss die Forschung jetzt beginnen, durch Starkregen ausgelöste Hochwässer nicht nur als Phänomen von zuviel schnell fließendem Wasser zu verstehen, sondern auch die damit einhergehenden selbstverstärkenden Effekte einzubeziehen, die teilweise ebenfalls durch den Klimawandel begünstigt werden. Dazu gehören die Zerschneidung der Hänge vor allem in den oberen Einzugsgebieten, die Mobilisierung von Totholz und von erodierten vitalen Bäumen sowie deren Rolle bei der Verkläusung von menschlicher Infrastruktur. Außerdem müssen neue gekoppelte Gefahren identifiziert und berücksichtigt werden.

Mit einem kürzlich bewilligten Projekt, gemeinsam finanziert durch das GFZ und das Graduiertenkolleg NatRiskChange der Universität Potsdam, werden diese Gebiete gezielt befliegen, um die Landschaft aus Flugzeugen heraus mittels Laser abzuscanen. Daraus entstehen dann hochaufgelöste 3D-Modelle der veränderten Landschaft. Sie können mit bestehenden Datensätzen verglichen werden, die bereits vor der Flut gewonnen wurden. ■

Originalstudie: Dietze, M., Öztürk, U. (2021). A flood of disaster response challenges. *Science*, 373, 6561, 1317–1318. DOI: [10.1126/science.abm0617](https://doi.org/10.1126/science.abm0617)

Wie wird eine Flut zur Katastrophe?



Hochwasser in Altenahr-Kreuzberg (Creative Commons CC0 1.0)

Was sind die Ursachen und die Auswirkungen von Hochwasserkatastrophen an Flüssen? Dieser Frage ist eine internationale Gruppe von Forschenden um den GFZ-Hydrologen Prof. Bruno Merz in einem Übersichtartikel im Fachjournal *Nature Reviews Earth and Environment* nachgegangen. In den 1990-er Jahren ist die Zahl der Todesopfer durch Flusshochwasser weltweit gesunken, dagegen sind die Schadenssummen stark angestiegen. Die Forschenden führen den Rückgang der Opferzahlen auf eine verbesserte Flutwarnung, technische Schutzmaßnahmen und ein geschärftes Gefahrenbewusstsein zurück.

Im langjährigen Mittel werden jedes Jahr 125 Millionen Menschen von einer Hochwasserkatastrophe an einem Fluss getroffen: Sie müssen ihre Häuser verlassen, erleiden finanzielle Verluste, werden verletzt oder sogar getötet. Am dramatischsten sind Ereignisse, wo Dämme oder Deiche plötzlich brechen, und Sturzfluten wie jüngst in Deutschland und Belgien. Die weltweiten ökonomischen Schäden durch Hochwasser in Höhe von rund 100 Milliarden US-Dollar resultieren sowohl aus großen Überschwemmungskatastrophen als auch aus vielen kleineren, weniger dramatischen Ereignissen.

Zu den Ursachen zählen sozio-ökonomische Gründe ebenso wie natürliche,

allen voran der Klimawandel. Damit jedoch aus einem Extremwetterereignis eine Flutkatastrophe wird, kommen weitere Bedingungen dazu, etwa ein fehlendes Bewusstsein für Gefahren oder nicht vorhandene bzw. versagende Schutz- und Warnsysteme. Es muss daher in erster Linie um die Verminderung der Verletzlichkeit von Kommunen gehen. Wie kann nun die Verletzlichkeit weiter gesenkt werden? Die Forschenden fokussieren hier auf die weniger augenfälligen Maßnahmen. So müsse vor allem das Element der Überraschung betrachtet werden. Hier könne eine Klassifizierung von Gebieten nach „Anfälligkeit für Überraschungen“ helfen. Es gehe auch darum, im Vorfeld Extremszenarien zu entwickeln. Zur Risikominimierung trage auch eine Politik des „besseren Wiederaufbaus“ bei. Ein Schlüssel zum besseren Verständnis von Flutkatastrophen liege in der Vergangenheit – historische Katastrophen bergen wertvolle Lehren und müssen deshalb mehr als bisher in aktuelle Datensätze eingehen. ■

Originalstudie: Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C. J. H., Bates, P., Bertola, M., Kemter, M., Kreibich, H., Lall, U., Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2, 592–609. DOI: 10.1038/s43017-021-00195-3

Neue Web-Plattform zur Planung der Hochwasservorsorge in Städten

Starkregen und Hochwasser machen zurzeit Schlagzeilen. Überschwemmungen, aber auch steigende Meeresspiegel und Sturmfluten stellen in Bezug auf die wirtschaftlichen Schäden zusammen mit Stürmen die größte Naturgefahr dar und können auch Leib und Leben bedrohen. SaferPlaces, ein neuer Webservice zur Überflutungsvorsorge, soll Städte und Gemeinden künftig dabei unterstützen, gefährdete Bereiche zu identifizieren sowie Schutz- und Vorsorgemaßnahmen systematisch und effizient zu planen, etwa an Gebäuden, Deichen oder durch Schaffung von Versickerungsflächen. Das interaktive Online-Tool wird im Rahmen der EU-Initiative Climate-KIC unter Mitwirkung des GFZ entwickelt und ist bereits als Prototyp abrufbar. Es stützt sich auf offene Daten und basiert auf neuen klimatischen, hydrologischen und hydraulischen, topografischen und ökonomischen Modellierungstechniken. ■



Weitere Informationen auf der Projektwebsite (englisch): www.saferplaces.co
Der **Prototyp des Web-Service** ist erreichbar unter: platform.saferplaces.co

Genauere Abschätzung erwartbarer Hochwasserschäden



Rheinhochwasser 2018 in Köln (CC BY 4.0 International)

Durch die Europäische Hochwasserrichtlinie sind die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union verpflichtet, Risikomanagementpläne für alle Gebiete mit potenziell signifikantem Hochwasserrisiko zu erstellen. Solche landesweiten Hochwasserrisikobewertungen sind darüber hinaus wichtig, um Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zu unterstützen. Um Gelder im Hochwasserschutz bestmöglich einzusetzen und Investitionen zu priorisieren, werden Entscheidungshilfen zurate gezogen, z. B. Kosten-Nutzen-Analysen. Für solche Entscheidungshilfen sind umfassende, großmaßstäbliche Risikobewertungsmodelle unverzichtbar.

Mit dem Regionalen Hochwassermodell (RFM) wurden nun erstmals räumlich konsistente Hochwasserrisikoabschätzungen für die Bereiche „Wohngebäude“, „Gewerbe“ und „Landwirtschaft“ in Deutschland abgeleitet. Es handelt sich um ein prozessbasiertes Hochwasserrisikomodell, welches die Sektion Hydrologie des GFZ entwickelt hat. Es koppelt den Wettergenerator, der räumlich konsistente Niederschlagsfelder liefert, mit den hydrologischen und hydrodynamischen Modellen, welche Prozesse wie die Überflutung von Deichen und die Wasserspeicherung im Hinterland be-

rücksichtigen. Die resultierenden Überschwemmungskarten, welche die Überschwemmungstiefen als auch die Überschwemmungsdauer anzeigen, werden mit räumlich hochaufgelösten sektorspezifischen Vermögenswerten (Gewerbe, Wohngebäude, Landwirtschaft) verschnitten. Auf dieser Grundlage schätzen detaillierte Hochwasserschadensmodelle die Schäden an den betroffenen Objekten. Das RFM erstellt einen Hochwasserereignis-Katalog auf Basis von 5000 simulierten Jahren. Aus diesem Katalog werden Hochwasserrisikokurven pro Wirtschaftszweig abgeleitet. Das Modell berücksichtigt räumliche Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Einzugsgebieten, welche in vergleichbaren Modellen typischerweise ignoriert werden. Diese Berücksichtigung verhindert die Überschätzung der Schäden von Ereignissen mit einem hohen Wiederkehrintervall, die mehrere Einzugsgebiete betreffen, da diese hier nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Die Berücksichtigung der Abhängigkeiten ermöglicht somit eine realistischere Beurteilung des Hochwasserrisikos.

Anhand der Hochwasserrisiko-Kurven wird der erwartete jährliche Schaden für Deutschland auf 529 Mio. Euro geschätzt.

Die finanziellen Schäden bei einem Hochwasser, mit welchem nur alle 200 Jahre gerechnet werden muss, belaufen sich auf 8,865 Mrd. Euro. Der gewerbliche Sektor hat mit etwa 60 % das größte Gesamtrisiko, gefolgt vom Wohnsektor. Der landwirtschaftliche Sektor ist vor allem von häufigen Hochwassern betroffen, trägt aber nur zu weniger als 3 % zum Gesamtrisiko bei. Auf Elbe, Donau und Rhein und ihre Einzugsgebiete entfällt etwa 90 % des Gesamtrisikos.

Die Ergebnisse bestätigen die Investitionsentscheidungen des nationalen Hochwasserschutzprogramms und unterstreichen die Notwendigkeit, Unsicherheiten in der Hochwasserrisikobewertung auch für Extremereignisse zu quantifizieren, zu kommunizieren und weiter zu reduzieren. Die vorgestellten Ergebnisse sollten als erste Abschätzungen betrachtet werden, die als Maßstab für zukünftige deutschlandweite Hochwasserrisiko-bewertungen dienen können. ■

Originalstudie: Sairam, N., Brill, F., Sieg, T., Farrag, M., Kellermann, P., Nguyen, V. D., Lüdtke, S., Merz, B., Schröter, K., Vorogushyn, S., Kreibich H. (2021). Process-Based Flood Risk Assessment for Germany. *Earth's Future*, 9, 10. <https://doi.org/10.1029/2021EF002259>

Die seismische Chronik einer Sturzflut

Erdbebenmessgeräte könnten Teil eines Frühwarnsystems für Flutkatastrophen werden

Die wissenschaftliche Beschreibung des katastrophalen Bergsturzes vom 7. Februar 2021 im indischen Dhauri-Ganga-Tal liest sich wie ein gerichtsmedizinischer Bericht. Ein Bergsturz und die anschließende Flut hatten mindestens hundert Menschen getötet und zwei Wasserkraftwerke zerstört. In der Fachzeitschrift *Science* zeichnen Forschende des GFZ gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen des Nationalen Geophysikalischen Forschungsinstituts Indiens (NGRI) die Katastrophe anhand der Daten eines Netzes von Seismometern nach.

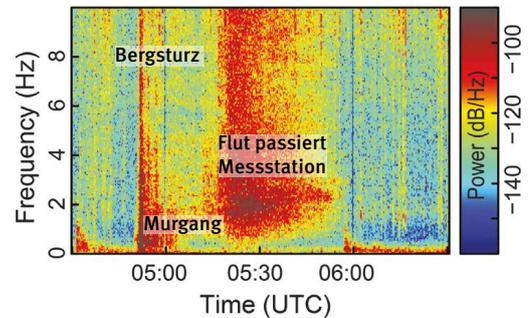
Am Sonntag, 7. Februar 2021, um kurz vor halb elf Uhr vormittags, begannen mehr als 20 Mio. Kubikmeter Eis und Gestein aus 5500 m Höhe ins Tal des Ronti Gad zu stürzen. Seismometer registrierten das Signal um 10:21 Uhr und 14 Sekunden Ortszeit. 54 Sekunden später traf die Masse in 3730 m Höhe auf den Talboden und verursachte einen Aufprall, der einem Erdbeben der Stärke 3,8 entsprach. Im Tal mobilisierte die Mischung aus Gestein und Eis Schutt und zusätzliches Eis, das sich vermischt mit Wasser als gigantischer Murgang durch die Täler der Flüsse Ronti Gad und Rishi Ganga wälzte. Erstautorin Dr. Kristen Cook vom GFZ schätzt, dass die Masse zunächst mit fast 100 km pro Stunde bergab schoss; nach etwa zehn Minuten verlangsamte sich die Bewegung auf knapp 40 km pro Stunde. Um 10:58 Uhr und 33 Sekunden erreichte die Flut eine wichtige Straßenbrücke bei Joshimath. Innerhalb von Sekunden stieg das Wasser dort um 16 m. 30 km weiter unten im Tal verzeichnete die Pegelstation Chinka einen Sprung des Wasserstandes um 3,6 m, und weitere 60 km weiter stieg der Pegel noch um 1 m.

Auf der Grundlage der von den seismischen Stationen aufgezeichneten Bodenerschütterungen identifizierten die Forschenden drei verschiedene Phasen der

Flutkatastrophe. Phase 1 war der Bergsturz und sein massiver Aufschlag auf den Talboden. Es folgte Phase 2 mit der Mobilisierung enormer Mengen an Eis, Geröll und Schlamm, die als eine verheerende Wand aus Material durch ein enges und gewundenes Tal raste. In dieser Phase blieb viel Material zurück und die Energie nahm rasch ab. Diese Phase dauerte etwa 13 Minuten. Phase 3 war eher flutartig, mit gewaltigen Wassermassen, die flussabwärts flossen und große Felsbrocken von bis zu 20 m Durchmesser mit sich führten.

Die wichtigste Erkenntnis: Die Daten der seismischen Instrumente eignen sich als Grundlage für ein Frühwarnsystem, das vor dem Eintreffen solcher katastrophalen Murgänge warnt. Dazu ist die Verfügbarkeit eines dichten seismischen Netzes, wie es von indischen Forschenden am NGRI betrieben wird, Voraussetzung. Die Vorwarnzeit eines solchen Systems für Standorte in Tälern hängt von der Entfernung und der Geschwindigkeit der Strömungsfront flussabwärts ab. Joshimath z. B., wo der Flusspegel während des Hochwassers um 16 m anstieg, lag 34,6 km flussabwärts vom Erdrutsch. Das bedeutet, dass die Menschen dort etwa eine halbe Stunde vor dem Eintreffen der Flut gewarnt worden sein könnten. Für weiter flussaufwärts gelegene Regionen, in denen die Welle nur wenige Minuten nach dem Erdrutsch eintraf, hätte die Zeit möglicherweise immer noch ausgereicht, um Kraftwerke abzuschalten.

Der Grund, warum ein solches Warnsystem nicht schon lange entwickelt wurde, sind die unterschiedlichen Anforderungen an seismische Messstationen, die dazu führen, dass viele Stationen der weltweiten und regionalen Erdbebenetze



Spektrogramm an der seismischen Station AUL, die den Bergsturz und die darauf folgende Flut am 7. Februar 2021 aufgezeichnet hat (aus: Cook et al., 2021, *Science*, vol 374, issue 6563; Nachdruck mit Genehmigung von AAAS)

weniger geeignet sind, um Felsstürze, Murgänge oder große Überschwemmungen zu erkennen. Gleichzeitig helfen Stationen, die Hochwasser und Murgänge in ihrer unmittelbaren Umgebung überwachen sollen, nicht so gut bei der Erkennung von Ereignissen in der Ferne. Die Lösung, an der die GFZ-Forschenden gemeinsam mit ihren Kolleginnen und Kollegen in Indien und Nepal arbeiten, ist ein Kompromiss: An strategisch günstigen Stellen müssten Stationen eingerichtet werden, die das Rückgrat eines Hochgebirgs-Flutwarnsystems bilden. Weitere Analysen von Sturzfluten und Murgängen werden dazu beitragen, besser zu verstehen, wie seismische Signale bei der Frühwarnung helfen können. ■

Originalstudie: Cook, K. L., Rekapalli, R., Dietze, M., Pils, M., Cesca, S., Rao, N. P., Srinagesh, D., Paul, H., Metz, M., Mandal, P., Suresh, G., Cotton, F., Tiwari, V. M., Hovius, N. (2021). Detection and potential early warning of catastrophic flow events with regional seismic networks. *Science*, 374, 6563, 87–92. DOI: 10.1126/science.abj1227

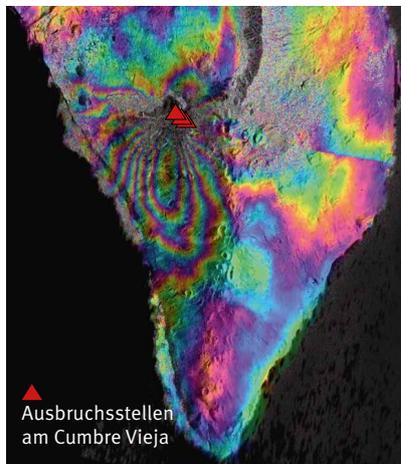
GFZ-Taskforce am Vulkanausbruch auf La Palma

Das GFZ hat eine Taskforce eingerichtet und ein Team nach La Palma entsandt, um einen Beitrag zur schnellen Einschätzung der Vulkaneruptionen und Erdbeben auf der Insel zu liefern. Gemeinsam mit spanischen Institutionen untersuchen die Forschenden das Zusammenspiel der Eruption mit den Beben und Oberflächenverformungen. Sie nutzen dazu Messgeräte vor Ort ebenso wie Satellitenaufnahmen und die Infrastruktur und Software von GEOFON, dem weltweiten Erdbebenmessnetz des GFZ.

Nach fünfzig Jahren Ruhephase und einer drei Jahre andauernden seismisch aktiven Phase begann am 19. September 2021 eine neue Vulkaneruption am Cumbre Vieja auf der Insel La Palma. Mit Satellitenradar stellten die Forschenden des GFZ großräumige Verformungen fest, die auf einen Druckanstieg in der Tiefe hindeuten. Der Ausgangspunkt der Eruption lag an der mittleren Westflanke des vulkanischen Rückens von Cumbre Vieja, nur unweit nördlich der Eruption des Jahres 1949. Der Lavastrom ist über 6,5 km lang, stellenweise über 2 km breit und an manchen bis zu 25 m mächtig. Er hat



Task Force des GFZ vor dem Lavastrom des Cumbre Vieja auf La Palma am 5. Oktober 2021: Dr. Nicole Richter, Dr. Alina Shevchenko und Carla Valenzuela Malebran (Foto: GFZ-Task Force)



über 3000 Häuser und zahlreiche Straßen zerstört. Die Lava erreichte nach einem Weg durch bewohnte Gebiete die Küste am 28. September 2021.

Die Lage vor Ort war angespannt: Gewaltige Aschewolken am Eruptionskrater und der Kontakt der über 1000 °C heißen Lava mit dem Meerwasser brachte das Wasser zum Verdampfen und auch die darin enthaltenen Salzmoleküle. Diese reagierten zu teils giftigen und ätzenden Gasen. Plötzliche Dampfgasexplosionen oder feinste Asche und Glaspartikel, die durch den starken Wind über viele Kilometer verfrachtet wurden, waren weitere Gefahren.

Die komplexen Ereignisse sind nicht leicht zu entschlüsseln. Deshalb hat das GFZ ein Forschungsteam zusammengestellt, um sowohl mit Daten aus der Fernerkundung und Computeranalysen als auch mit vor Ort erhobenen Daten die Lage einzuschätzen. Die Forscherinnen aus der GFZ-Taskforce Dr. Nicole Richter, Dr. Alina Shevchenko und Carla Valenzuela Malebran sind bereits wenige Tage nach Beginn der Eruption aufgebrochen. Sie hatten zahlreiche wissenschaftliche Instrumente wie Seismometer, Neigungsmesser, Drohnen und Thermalkameras im Gepäck.

Europäische Satelliten erlauben einen detaillierten Blick auf La Palma. Der Sentinel-1-Satellit nutzt Radaraugen, die bei Tag und Nacht funktionieren, sogar durch Wolken blicken und den Boden abtasten können. Das Bild zeigt den Vergleich von zwei Radarbildern, ein sogenanntes Radar-Interferogramm. Farbige Ringe (engl. „Fringes“) sind Bereiche erhöhter Bodenverformung zu Beginn des Ausbruchs zwischen 16. und 22. September 2021. Je enger die Fringes beieinander liegen, desto stärker ist der Gradient der Verformung. Seit September hat die Bodenverformung an der westlichen Flanke der Insel deutlich nachgelassen.

Die seismischen Stationen sind inzwischen online und liefern Daten. Diese Arbeiten wurden möglich durch die Zusammenarbeit innerhalb des GFZ und sind eng mit den Aktivitäten anderer Institute in Spanien und in Deutschland verzahnt. Beispielsweise planen Forschende des GFZ und des GEOMAR in Kiel eine kombinierte Vermessung der Ereignisse an Land (GFZ) und im Meer (GEOMAR). Auch werden die seismischen Daten nun am GFZ empfangen und gleichzeitig an den Partner IGN in Spanien übertragen. Das erleichtert die Lagebestimmung der Erdbeben. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend. Sie zeigen eine Anhäufung der Erdbeben in rund 12 km Tiefe, weit entfernt vom Eruptionsherd. Weisen sie auf eine Magmakammer hin? Wie hängen die Eruptionen mit den Erdbeben und der Oberflächenverformung zusammen? Das sind die Fragen, denen die GFZ-Forschenden der Fachrichtungen Vulkanologie und Geophysik gemeinsam mit ihren spanischen und deutschen Kolleginnen und Kollegen nachgehen, nachdem sich der Vulkan Mitte Dezember 2021 wieder zur Ruhe gelegt hat. ■

Wann Erdbeben Vulkanausbrüche auslösen

Neue Klassifizierung von Vulkanen identifiziert Schlüsselmechanismen und hilft bei künftigen Überwachungsstrategien

Vulkanausbrüche können von Erdbeben ausgelöst werden. Allerdings ist dies vergleichsweise selten der Fall und passiert nur, wenn der Vulkan bereits zum Ausbruch bereit ist. Das zeigen Forschende um Gilles Seropian von der University of Canterbury, Neuseeland, unter Mitwirkung von Prof. Thomas Walter vom GFZ anhand einer Vielzahl bereits vorhandener Daten und Studien. Sie haben analysiert, unter welchen Umständen damit gerechnet werden muss und welche Mechanismen dem zugrunde liegen. Ihre neue Klassifizierung von Vulkanen stellen sie im Fachmagazin *Nature Communications* vor. Daraus ergeben sich auch neue Ansätze für die Überwachung von Vulkanen.

Wie und wann es in der Folge von Erdbeben zu Eruptionen kommen kann, wird bereits lange diskutiert, ist aber noch unzureichend systematisch erforscht. Das interdisziplinäre Team hat nun den aktuellen Wissensstand dazu zusammengetragen und analysiert. Dabei haben sie Daten von vulkanischen Labormodellen ebenso betrachtet wie von Infrarot-Satellitenüberwachung und komplexe mathematische Erdbebenmodelle. Die Forschenden mussten die entsprechenden Daten auswählen, vergleichen und die relevanten Ergebnisse zu einem einzigen Modell kombinieren, das die wichtigsten Aspekte abdeckt. Das Ergebnis: Eine neue Klassifikation von Vulkanen, die es ermöglicht, die Auswirkungen verschiedener Erdbebenszenarien systematisch mit vulkanischen Aktivitäten zu verbinden.

Erdbeben entstehen durch plötzliche Brüche in der Erdkruste. Es gilt zu verstehen, wie die dadurch entstehenden Spannungen so in Vulkanen wirken, dass es zu einer Eruption kommen kann. Dabei werden sowohl statische Spannungen

betrachtet, die dauerhaft sind und überwiegend in der näheren Umgebung des Epizentrums wirken, als auch dynamische, die vorübergehender Natur sind und sich über größere Distanzen fortpflanzen können. Auch Vulkane sind sehr vielfältig – in Bezug auf die Struktur des Untergrunds und der Oberfläche, ihre chemische Zusammensetzung, die Art der Eruption oder deren Vorläufersignale. Im Rahmen ihrer Analyse haben die Forschenden drei Schlüsselparameter für die Reaktion von Vulkanen auf Erdbeben identifiziert: Zum einen die Viskosität des Magmas. Es kann flüssig wie Öl sein oder so zäh, dass es ein ganzes Gebäude trägt. Zum zweiten ist es wichtig, wie leicht Gas aus dem Vulkan entweichen kann. Wenn Gas in der Tiefe eingeschlossen ist, kann sich Druck aufbauen und später zu einer Explosion führen. Und zum dritten spielt es eine entscheidende Rolle, ob hydrothermale Systeme vorhanden sind. So werden Bereiche in einem Vulkan bezeichnet, in denen Wasser von dem darunter befindlichen Magma zu Dampf erhitzt wird. Die Studie zeigt, dass insbesondere die hydrothermalen Systeme sehr empfindlich auf Erdbeben reagieren.

Die Zeitskalen, auf denen Reaktionen eines Vulkans auf ein Erdbeben zu erwarten sind, können sehr unterschiedlich sein, ebenso die räumlichen Entfernungen: Bei rund der Hälfte der Vulkanausbrüche mit auslösendem Erdbeben fand die Reaktion erst Monate nach dem Beben statt. Aber auch zwei bis fünf Jahre später können noch Auswirkungen festgestellt werden. Auf der räumlichen Skala finden sich Entfernungen von bis zu 1000 km. Das Auslösen von Unruhephänomenen wie verstärkter Bebenaktivität, Entgasung, Wärmestrom oder Absenkung wurde auch noch in Entfernungen von 10 000 km beobachtet. Aber



Der Vulkan Karymski in Kamchatka
(Foto: T. Walter, GFZ)

nicht hinter jeder zeitlichen und räumlichen Korrelation zwischen einem Erdbeben und einem Vulkanausbruch steckt auch ein kausaler Zusammenhang.

Insgesamt zeigten die Analysen, dass Vulkanausbrüche eher selten direkt von Erdbeben ausgelöst werden. Dafür muss bereits eine gewisse Ausbruchsbereitschaft vorhanden sein. Dennoch unterstreicht diese Arbeit die Notwendigkeit, Vulkane nach einem großen Erdbeben detailliert zu überwachen. Denn das Beben kann die nächste Eruption vorantreiben. Die Ergebnisse der Studie liefern nützliche Informationen für Überwachungsstrategien und tragen zur Verbesserung der vulkanischen Gefahrenabschätzung bei. ■

Originalstudie: Seropian, G., Kennedy, B. M., Walter, T. R., Ichihara, M., Jolly, A. D. (2021). A review framework of how earthquakes trigger volcanic eruptions. *Nature Communications*, 12, 1004. DOI: [10.1038/s41467-021-21166-8](https://doi.org/10.1038/s41467-021-21166-8)

Langsame und reguläre Erdbeben wechselwirken in der Nähe von Istanbul



Einbau eines Bohrloch-Strainmeters in einer GONAF-Bohrung in der Türkei. Diese Geräte können komplementär zu klassischen Seismometern auch langsame Deformationen im Untergrund bis zu der Dimension eines Atomdurchmessers (10^{-10} m) messen. (Foto: M. Bohnhoff, GFZ)

Erdbeben dauern typischerweise nur wenige Sekunden, manchmal allerdings laufen die Verschiebungen im Untergrund auch in Zeitlupe ab. Das Verständnis von sogenannten langsamen Beben und ihres Zusammenspiels mit kurzen, teils heftigen Erschütterungen ist von entscheidender Bedeutung für die Bestimmung der seismischen Gefahr und des daraus resultierenden Risikos. Eine internationale Gruppe um Dr. Patricia Martínez-Garzón vom GFZ hat eine Studie in der Fachzeitschrift *Seismological Research Letters* veröffentlicht, in der sie dieses Zusammenspiel von unterschiedlichen seismischen Ereignissen nahe der Millionenmetropole Istanbul untersucht.

Die Armutlu-Halbinsel ist aktuell das seismisch aktivste Gebiet direkt südlich der dicht besiedelten Megastadt Istanbul. Die Region ist Teil der Nordanatolischen Verwerfung, die Eurasien von der Anatolischen Platte trennt. Diese geologische Verwerfung ist eine große tektonische Plattengrenze, an der katastrophale Erdbeben auftreten. Das letzte große Erdbeben dieser Art ereignete sich 1999 in der Nähe von Izmit und führte zu fast 20 000 Toten. Ein Teil der Verwerfung, der zwischen Istanbul und Armutlu verläuft, wird derzeit als „seismische Lücke“ bezeichnet, weil dort gewissermaßen eine verdächtige Ruhe herrscht.

Die Region gilt daher als überfällig für ein großes Erdbeben.

2019 konnten in dieser Region erstmals langsame Erdbeben beobachtet werden, und zwar dank spezieller Bohrloch-Deformationsmessgeräte, die von Forschenden des GFZ in Zusammenarbeit mit der türkischen Katastrophenschutzbehörde (AFAD) und dem US-amerikanischen Institut UNAVCO installiert wurden. Um die langsamen Deformationsprozesse der Erdkruste mit den herkömmlichen, also spürbaren und kurzen Erdbeben in der Region in Verbindung zu bringen, wurde auf der Armutlu-Halbinsel im Rahmen des GONAF-Plattenrandobservatoriums des GFZ das verdichtete seismische Netz SMARTnet eingerichtet.

Die Geräte zeichneten im Zusammenhang mit einem herkömmlichen Erdbeben der Stärke 4,6 im Dezember 2018 ein weiteres 30-tägiges langsames seismisches Ereignis auf, vermutlich eine Verschiebung von Gesteinsblöcken in einigen Kilometern Tiefe. Diese wiederum aktivierte dann den flacheren Teil derselben Verwerfung. Danach blieb dieselbe Verwerfung ein ganzes Jahr lang seismisch aktiv, mit mehr als tausend Erdstößen. Die Studie nimmt diese Beobachtungen als Ausgangspunkt. Sie kommt zu dem Schluss, dass die höheren Seismizitäts-

raten innerhalb des Jahres nach dem 4,6-Ereignis durch das Auftreten der langsamen Verschiebung im Untergrund sowie durch die Umverteilung von tektonischen Spannungen nach dem Hauptbruch begünstigt werden. Die Deformationsmessgeräte in der Nähe der aktiven Verwerfung ermöglichten die Identifizierung des langsamen Kriechsignals, das vermutlich in geringer Tiefe auftrat und über Wochen verteilt die Energie eines Bebens der Stärke 5,5 freisetzte.

Wie sich das langsame Kriechereignis auf den Spannungszustand der nahegelegenen Verwerfungen und die seismische Lücke vor Istanbul auswirkt, muss noch im Detail untersucht werden. Die Ergebnisse werden es ermöglichen, das regionale Erdbebenrisiko besser zu verstehen und zu quantifizieren, insbesondere für die 15-Millionen-Einwohner-Stadt Istanbul. ■

Originalstudie: Martínez-Garzón, P., Durand, V., Bentz, S., Kwiatek, G., Dresen, G., Turkmen, T., Nurlu, M., Bohnhoff, M. (2021). Near-Fault Monitoring Reveals Combined Seismic and Slow Activation of a Fault Branch within the Istanbul–Marmara Seismic Gap in Northwest Turkey. *Seismological Research Letters*, 92 (6), 3743–3756. DOI: 10.1785/0220210047

Flussläufe als Kohlenstoffsenken

Rund 8500 Jahre dauert es, bis ein Sandkorn aus den Anden über das argentinische Tiefland in den Río Paraná gespült wird. Die 1200 km weite Reise im Río Bermejo wird von vielen Pausen in Flussauen unterbrochen, wo das Körnchen zum Teil über Jahrtausende abgelagert und dann wieder weiter transportiert wird. Begleitet wird der Sand von organischem Kohlenstoff, eingespült aus Boden und Pflanzen. Damit gewinnt der Transport im Wasser Relevanz für das Klima: Flüsse tragen den Kohlenstoff, der zuvor über Photosynthese aus der Atmosphäre aufgenommen wurde, als Sediment ins Meer, wo er über Jahrtausende unschädlich für das Klima eingelagert wird.

Forschende des GFZ haben die einzelnen Prozesse der Reise erstmals quantifiziert und berichten darüber im Fachjournal *Nature Geoscience*. Wichtiges Ergebnis der Arbeit: Es sind insbesondere ungestört mäandrierende Abschnitte eines Flusses, die Sediment zusammen mit dem Kohlenstoff ablagern und wieder aufnehmen und dann weiter ins Meer transportieren. ■



Mäander des Río Bermejo (Foto: K. Cook, GFZ)

Originalstudie: Repasch, M., Scheingross, J. S., Hovius, N., Lupker, M., Wittmann, H., Haghypour, N., Gröcke, D. R., Orfeo, O., Eglinton, T. I., Sachse, D. (2021). Fluvial organic carbon cycling regulated by sediment transit time and mineral protection. *Nature Geosciences*. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00845-7>

Der Puls des Toten Meeres

Umliegendes Land reagiert auf Schwankungen des Wasserspiegels



Messstationen mit Klimasensoren und GNSS-Ausrüstung am Rand des Toten Meeres (Foto: J. Wickert, GFZ)

Das Tote Meer schrumpft. Die Ursachen dafür sind vielfältig: Klimawandel trägt ebenso dazu bei wie menschliche Übernutzung der Ressource Wasser. Der sinkende Wasserspiegel hat eine ganze Reihe gefährlicher Folgen. So führt nachfließendes süßes Grundwasser dazu, dass Salze im Boden gelöst werden und dadurch Erdfälle („sink holes“) entstehen. Es kommt aber auch zu großflächigeren Absenkungen der Landoberfläche. Forschende aus einem interdisziplinären Team mehrerer Sektionen des GFZ haben zusammen mit Kolleginnen und Kollegen aus Hannover, Kiel und Padua zum ersten Mal einen direkten Zusammenhang zwischen der Abnahme des Wasserspiegels, der Verdunstung und der Landabsenkung nachgewiesen. Sie berichten darüber in der Fachzeitschrift *Scientific Reports*.

Das Team nutzte dabei ein breites Instrumentarium – von Messverfahren die auf dem globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) beruhen über Radarsatelliten bis hin zu Pegel- und Klimastationen vor Ort. Die Forschenden zeigten, dass sich die feste Erde mit einer zeitlichen Verzögerung von etwa acht Wochen synchron zu Schwankungen der Wasseroberfläche und des Grundwasserspiegels auf und ab bewegt. Der Trend geht dabei jedoch klar in eine Richtung: abwärts. Rund 1 m pro Jahr

sinkt der Wasserspiegel des Toten Meeres, und rund 15 cm pro Jahr senkt sich das Land. Zuflüsse durch Regenfälle in den umliegenden Bergen und über den Jordan verursachen kurzfristige Erhöhungen des Seespiegels. Wasserentnahme aus den Zuflüssen für die Landwirtschaft, Abpumpen des Salzwassers zur Gewinnung von Kalium und die Verdunstung in der großen Hitze kehren die Bilanz jedoch dauerhaft ins Negative.

Die Kopplung der Landabsenkung an das schwindende Wasser ist seit langem bekannt. Dass aber die Bewegung der Landoberfläche mit den hydro-meteorologischen Schwankungen so direkt zusammenhängt, ist neu. Für die Landwirtschaft, den Tourismus und die Infrastruktur in der Region sind die Landabsenkungen und der Wasserverlust sehr bedrohlich. Die Messungen zeigen zum ersten Mal, wie eng Land, Wasser und Atmosphäre hier miteinander verbunden sind. ■

Originalstudie: Vey, S., Al-Halbouni, D., Haghshenas Haghghi, M., Alshawaf, F., Vüllers, J., Güntner, A., Dick, G., Ramatschi, M., Teatini, P., Wickert, J., Weber, M. (2021). Delayed subsidence of the Dead Sea shore due to hydro-meteorological changes. *Scientific Reports*. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-91949-y>

Quecksilber wird unter grönländischem Eisschild freigesetzt

Etwa zehn Prozent des globalen Fluss-Exports dieser giftigen Substanz in Ozeane entstammen dieser Region.



Eisberge auf Nuup Kangerlua (Grönland, Foto: Rue Perkins)

Die Verschmutzung mit Quecksilber ist aufgrund seiner toxischen Wirkung ein Thema von globaler Bedeutung. Insbesondere in arktischen Organismen wurden bereits hohe Werte gemessen – mit beunruhigenden Auswirkungen auf Ökosysteme und die Nahrungskette. Bislang wurde der Grönländische Eisschild hierbei nicht berücksichtigt. Nun zeigen Forschende um Dr. Jonathan Hawkins vom GFZ und der Florida State University, dass Schmelzwässer im Südwesten Grönlands erhebliche Mengen Quecksilber in den arktischen Ozean transportieren. Aufgrund der großen nachgewiesenen Mengen gehen die Forschenden davon aus, dass sie geologischen Ursprungs sind. Ihre Messungen stellen sie im Fachjournal *Nature Geoscience* vor.

Quecksilber reichert sich in der Nahrungskette an und wird durch den Verzehr von Fisch und Meeresfrüchten zu einer Gefahr für den Menschen. Die mit den Folgen für Umwelt und Gesundheit verbundenen sozio-ökonomischen Kosten werden auf mehr als fünf Milliarden US-Dollar pro Jahr geschätzt. Eine signifikante Verschlimmerung dieser Proble-

matik geht auf das Konto von fossiler Energieerzeugung, Industrie, Bergbau und Verkehr. Aber es gibt auch natürliche Quellen wie die Emissionen von Vulkanen, Feuer und die Verwitterung von Gesteinen. Die Arktis erweist sich in beiderlei Hinsicht als besondere Problemzone: Der Quecksilbergehalt in Meeresorganismen ist dort in den vergangenen 150 Jahren um eine Größenordnung gestiegen. Über die Atmosphäre gelangen Staubteilchen und Aerosole in diese Region, und der Klimawandel und die damit verbundene Erwärmung der Arktis führen zu höheren Einträgen durch mehr und stärkere Schmelzwässer.

Die Quelle des Quecksilbers ist wahrscheinlich die Erde selbst, am Boden des Eisschildes. Darauf deuten u. a. Vergleichsdaten von der Schneeoberfläche und aus dem Eis hin. ■

Originalstudie: Hawkins, J. R., Linhoff, B. S., Wadham, J. L. et al. (2021). Large subglacial source of mercury from the southwestern margin of the Greenland Ice Sheet. *Nature Geosciences*, 14, 496–502. DOI: 10.1038/s41561-021-00753-w

Regenfälle verändern arktischen Kohlenstoffkreislauf

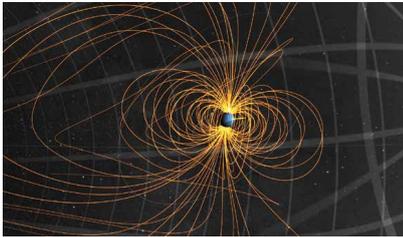
Arktische Flüsse werden zunehmend auch von Regen und nicht nur von Schneeschmelze gespeist. Das führt zu einer stärkeren Wechselwirkung der Gewässer mit Pflanzen und Boden – und damit zu einem stärkeren Eintrag von Nährstoffen, Kohlenstoff und anderem organischen wie anorganischen Material. Das zeigen Forschende um Dr. Joanne Heslop vom GFZ und Casey Beel, Ph.D. von der Queens University, Kingston (Kanada) in einer Studie, die im Fachmagazin *Nature Communications* erschienen ist. Sie haben mehr als zehn Jahre umfassende Daten über Wetterereignisse, Fließgewässer und deren biogeochemische Zusammensetzung analysiert. Potenzielle Auswirkungen betreffen einerseits Wasserqualität und Nahrungskette und andererseits die Freisetzung von Treibhausgasen wie CO₂ und Methan. Somit sind die Daten wichtig für die Verbesserung von biogeochemischen und Klimamodellen. ■



Stark strömender Fluss in der Hoch-Arktis (Foto: Scott Lamoureux, Queens University)

Originalstudie: Beel, C. R., Heslop, J. K., Orwin, J. K., Pope, M. A., Schevers, A. J., Hung, J. K. Y., Lafrenière, M. J., Lamoureux, S. F. (2021). Emerging dominance of summer rainfall driving High Arctic terrestrial-aquatic connectivity. *Nature Communications*, 12, 1448. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21759-3>

Superionisches Eis: Neues zu Magnetfeldern von Uranus und Neptun

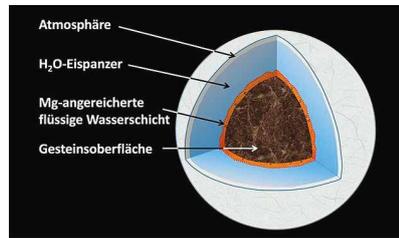


Das Magnetfeld des Neptun ist, wie das der Erde, nicht statisch sondern variiert über die Zeit. (Illustration: NASA's Scientific Visualization Studio)

Eis ist nicht gleich Eis. Die feste Form von Wasser kommt in mehr als einem Dutzend verschiedener Strukturen vor. Superionisches Eis ist eine besondere kristalline Form, halb fest, halb flüssig und elektrisch leitend. Ihre Existenz wurde auf Basis diverser Modelle vorhergesagt und bereits unter Laborbedingungen beobachtet. Die genauen Voraussetzungen für ihre Existenz werden unter Forschenden aber noch kontrovers diskutiert. Ein Team von Wissenschaftlern um Dr. Vitali Prakapenka von der University of Chicago, dem auch Dr. Sergey S. Lobanov vom GFZ angehört, hat nun Struktur und Eigenschaften von zwei superionischen Eis-Phasen (Eis XVIII und Eis XX) vermessen. Sie brachten Wasser in einer laserbeheizten Diamant-Stempelzelle auf extrem hohe Drücke und Temperaturen. Dabei wurden die Proben hinsichtlich Struktur und elektrische Leitfähigkeit untersucht. Die Ergebnisse sind im Fachmagazin *Nature Physics* erschienen. Sie können möglicherweise auch dazu beitragen, die ungewöhnlichen Magnetfelder der stark wasserhaltigen Planeten Uranus und Neptun zu erklären. Weitere Untersuchungen sollen die innere Struktur und das Magnetfeld der beiden Gasplaneten noch besser aufklären. ■

Originalstudie: Prakapenka, V.B., Holtgrewe, N., Lobanov, S.S., Goncharov, A. (2021). Structure and properties of two superionic ice phases. *Nature Physics*. DOI: 10.1038/s41567-021-01351-8

Wie Wasser auf Eis- planeten den felsigen Untergrund auslaugt



Schnittdiagramm eines wasserreichen Sub-Neptun-Exoplaneten (Grafik: S. Speziale, GFZ)

Die Mechanismen der Wechselwirkung zwischen Wasser und Gestein an der Erdoberfläche sind gut verstanden, auch das Bild des Kreislaufs von H_2O im tiefen Innern terrestrischer Planeten wird immer besser. Nicht bekannt ist, was an der Grenzfläche zwischen heißem Wasser und der tiefen Gesteinshülle von Wasserisplaneten bei Drücken und Temperaturen passiert, die um tausende Male höher sind als am Boden der tiefsten Ozeane auf der Erde. In unserem Sonnensystem sind Neptun und Uranus als Eisriesen klassifiziert; sie haben eine dicke äußere Wassereisschicht über einer tiefen Gesteinsschicht. Es ist nach wie vor offen, ob die Temperatur an der Grenzfläche hoch genug ist, um flüssiges Wasser zu bilden. Ein internationales Team von Forschenden unter GFZ-Beteiligung führte eine Reihe von Experimenten durch, die zeigen, wie Wasser bei Drücken zwischen 20 und 40 GPa Magnesiumoxid aus Ferropentasil und Olivin auslaugt. Dies entspricht dem bis zu 400 000-fachen des Atmosphärendrucks auf der Erde und Versuchstemperaturen >1230 °C, Bedingungen, wie sie in den tiefen Ozeanen an der Grenze zum Gestein der Sub-Neptun-Eisplaneten vorherrschen. Die Erkenntnisse eröffnen neue Szenarien für die thermische Entwicklung großer eisiger Planeten. ■

Originalstudie: Kim, T., Chariton, S., Prakapenka, V., Pakhomova, A., Liemann, H.-P., Liu, Z., Speziale, S., Shim, S.-H., Lee, Y. (2021). Atomic-scale mixing between MgO and H_2O in the deep interiors of water-rich planets. *Nature Astronomy*. DOI: 10.1038/s41550-021-01368-2

Können Astronauten unbeschadet zum Mars fliegen?



Aufbruch zum Mars: Die gefährliche Weltraumstrahlung kann ausreichend gut abgeschirmt werden, wenn Zeitpunkt und Dauer der Reise stimmen. (Illustration: „Mars“ Kevin M. Gill, CC BY 2.0)

Die Weltraumstrahlung ist eines der Hauptprobleme bei der Planung bemannter Weltraummissionen. Für den Menschen gefährlich sind sowohl energetische Teilchen der Sonne als auch die galaktische kosmische Strahlung. Ein internationales Team um Prof. Yuri Shprits vom GFZ sowie Michail Dobynde vom Skolkovo Institute of Science and Technology in Moskau hat anhand von Simulationen gezeigt, unter welchen Bedingungen eine Mission zum Mars machbar ist. Hierfür betrachteten die Forschenden die verschiedenen Strahlungstypen und ihre Ausbreitung im Weltraum sowie in ein Raumfahrzeug mit einer Modellperson. Die ermittelten Rahmenbedingungen: Der Schutzschild des Raumschiffs sollte ausreichend dick sein, um die mitfliegenden Menschen vor der Strahlung zu schützen, eine gewisse Dicke aber nicht überschreiten, da sonst im Material zu viele Sekundär-Partikel erzeugt werden. Selbst mit einem optimal konstruierten Raumfahrzeug sollte die Reise insgesamt nicht länger als vier Jahre dauern. Bester Zeitpunkt für den Start ist während des Maximums im Zyklus der Sonnenaktivität. Durch sie wird die gefährliche kosmische Strahlung am besten abgeschirmt. Die Ergebnisse sind im Fachmagazin *Space Weather* erschienen. ■

Originalstudie: Dobynde, M. I., Shprits, Y. Y., Drozdov, A. Y., Hoffman, J., Li, J. (2021). Beating 1 sievert: Optimal radiation shielding of astronauts on a mission to Mars. *Space Weather*, 19. <https://doi.org/10.1029/2021SW002749>

Chancen und Grenzen von Künstlicher Intelligenz in der Klimamodellierung

Erdsystemmodelle sind die wichtigsten Werkzeuge, um den physikalischen Zustand der Erde quantitativ zu beschreiben und – beispielsweise im Rahmen von Klimamodellen – vorherzusagen, wie er sich in Zukunft unter dem Einfluss der menschlichen Aktivitäten verändern könnte. Wie die vermehrt eingesetzten Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) helfen können, diese Prognosen zu verbessern, und wo die Grenzen der beiden Ansätze liegen, hat ein internationales Team um Dr. Christopher Irrgang vom GFZ in einem Perspektiven-Artikel für das Journal *Nature Machine Intelligence* ausgeführt. Ein wesentlicher Vorschlag: beide Ansätze zu einer selbstlernenden „Neuronalen Erdsystemmodellierung“ zu verschmelzen.

Das System Erde ist ein komplexes Zusammenspiel aus vielen miteinander gekoppelten Einflussphasen und -faktoren. Es ist daher eine große Herausforderung, künftige Entwicklungen in diesem System vorherzusagen, wie es etwa im Rahmen der Forschungen zum Klimawandel erforderlich ist.

Klassische Erdsystemmodellierung

Die klassischen Erdsystemmodelle (ESM) basieren auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Mithilfe mathematischer und numerischer Methoden wird aus dem Zustand eines Systems zu einem gegenwärtigen oder vergangenen Zeitpunkt der Zustand des Systems zu einem zukünftigen Zeitpunkt berechnet (vgl. Beiträge von Ott et al., S. 36 sowie Kühn et al., S. 30 in diesem Heft).

Erdsystemmodelle haben sich in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich verbessert. Ihre Leistungsfähigkeit zeigt sich z. B. darin, dass sie die Entwicklung der mittleren globalen Temperatur seit Beginn der Datennahme sehr gut nachzeichnen können. Und mittlerweile sind auch Aussagen über Auswirkungen des Klimawandels auf regionaler Ebene mög-

lich. Doch auch die Vorhersagen der neuesten Modelle sind mit Unsicherheiten behaftet. So neigen sie beispielsweise dazu, die Stärke und Häufigkeit von Extremereignissen zu unterschätzen. Forschende befürchten, dass in bestimmten Teilsystemen der Erde abrupte Veränderungen auftreten könnten, sogenannte Kippelemente im Klimasystem, welche die klassischen Modellierungsansätze bisher nur schlecht vorhersagen.

Ansätze des Maschinellen Lernens

Die Herausforderungen der klassischen ESM-Ansätze, aber auch die immer größeren verfügbaren Mengen gesammelter Erdbeobachtungen öffnen das Feld für den Einsatz Künstlicher Intelligenz. Dahinter verbergen sich z. B. Methoden des Maschinellen Lernens (ML) wie Neuronale Netze, Zufallswälder oder Support-Vektor-Maschinen. Ihr Vorteil: Die selbstlernenden Systeme benötigen keine Kenntnis über die physikalischen Gesetze und Beziehungen. Stattdessen werden sie an großen Datensätzen für bestimmte Aufgaben trainiert und lernen die dahinter liegenden Systematiken selbst. Ein neuronales Netz lässt sich beispielsweise darauf trainieren, Muster in Satellitenbildern zu erkennen und zu klassifizieren.

Inwieweit dieser selbstlernende Ansatz allerdings tatsächlich die klassischen Modellierungsansätze erweitern oder sogar ersetzen kann, bleibt abzuwarten. Denn auch das Maschinelle Lernen hat – noch – seine Tücken. Viele der heutigen ML-Anwendungen für die Klimawissenschaften sind Proof-of-Concept-Studien, die in einer vereinfachten Umgebung funktionieren. Ein weiterer entscheidender Aspekt: Wie bei einer Black Box sind zwar Input und Output bekannt, aber die dahinterstehenden Prozesse zur Erkenntnisgewinnung nicht. Es bereitet Probleme, die Ergebnisse auf physikalische Konsistenz zu prüfen, auch wenn sie plausibel erscheinen. Nach Meinung des



Autorenteams sind Interpretierbarkeit und Erklärbarkeit wichtige Themen im Zusammenhang mit maschinellem Lernen, die künftig verbessert werden müssen, um die Transparenz und das Vertrauen in die Methode zu stärken. Insbesondere wenn die Ergebnisse der Vorhersagen eine wichtige Grundlage für politische Entscheidungen bilden, wie das im Rahmen der Klimaforschung der Fall ist.

In der vorliegenden Veröffentlichung schlägt das Team um den studierten Mathematiker einen dritten Weg vor: die Vernetzung der beiden zuvor besprochenen Ansätze zu einer „Neuronalen Erdsystemmodellierung“. Auf diese Weise könnten die jeweiligen Stärken kombiniert und ihre Grenzen ausgedehnt werden. Aktuell, so resümieren die Forschenden, seien KI und der hybride Ansatz noch mit vielen Limitierungen und Fallstricken behaftet und es sei bei weitem nicht klar, dass der aktuelle Hype um den Einsatz der Künstlichen Intelligenz – zumindest allein – die offenen Probleme der Erd- und Klimaforschung lösen wird. In jedem Fall aber lohne es sich, diesen Weg zu beschreiten. Dafür müsse es allerdings eine enge Zusammenarbeit zwischen der Klima- und Geoforschung auf der einen und den KI-Fachleuten auf der anderen Seite geben. ■

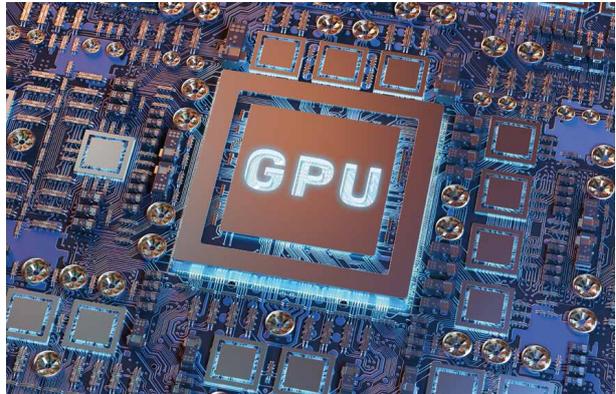
Originalstudie: Irrgang, C., Boers, N., Sonnewald, M., Barnes, E. A., Kadow, C., Staneva, J., Saynisch-Wagner, J. (2021). Towards neural Earth system modelling by integrating artificial intelligence in Earth system science. *Nature Machine Intelligence*, 3, 667–674. DOI: 10.1038/s42256-021-00374-3

Mehr Rechenpower für das GFZ

Das GFZ erhält einen neuen Hochleistungscomputer. Die GPU-Einheit dient unter anderem der schnelleren und hochgenauen Berechnung von Erdbebenstärken und -orten, der quantenmechanischen Berechnung von Mineraleigenschaften oder der Modellierung von Landschaften. GPU steht für Graphics Processing Unit und bezeichnet eine Art von Rechnern, die dank der parallelen Verarbeitung von Daten besonders gut für Bildverarbeitung, Modellierung und maschinelles Lernen geeignet sind. Der Rechnerknoten wird mit 600 000 Euro vom Land Brandenburg über den Zukunftsinvestitionsfonds gefördert. Mit dem neuen GPU-Cluster kann das GFZ den Herausforderungen, die die Wissenschaft an die IT heranträgt, künftig besser und schneller begegnen. Insbesondere profitieren Forschende im Bereich des Maschinellen Lernens und der Künstlichen Intelligenz von dem Cluster.

Die neuen technologischen Möglichkeiten sollen für die Lösung zukünftiger Herausforderungen im Bereich Erde und

Umwelt genutzt werden. Einsatzmöglichkeiten im Umfeld des GFZ sind beispielsweise zeitkritische Massendatenberechnungen von Geodaten, Modellierungen und Simulationsberechnungen für Analysen und Vorhersagen sowie Echtzeit-Warnsysteme für Naturgefahren wie Tsunami, Sturm- und Regenfällen oder Vulkanaktivitäten. Weitere Anwendungen betreffen geotechnische Monitoringsysteme zur Beobachtung von Rutschungen, Fundamenten und Brücken sowie das Katastrophen-Management für Naturereignisse oder von Menschen verursachte Katastrophen. Künftig soll die Rechenleistung auch den Nachbarinstituten auf dem Potsdamer Telegrafenberg zur Verfügung gestellt werden.



Nahaufnahme einer modernen GPU-Karte mit Schaltkreis als 3D-Rendering (sdecoret – stock.adobe.com)

Das GPU-System wird im Serverraum des jüngst eingeweihten „GeoBioLab“ auf dem Campus Telegrafenberg installiert und betrieben. Die entstehende Wärmeleistung wird im Sinne nachhaltigen IT-Betriebs im Laborgebäude selbst und in einem weiteren angeschlossenen Gebäude für die Heizung und Wassererwärmung genutzt. ■

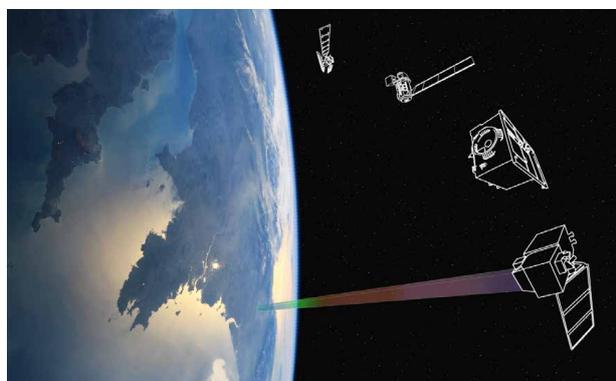


Laborneubau GeoBioLab

Das GFZ hat am 21. Juni 2021 das „GeoBioLab“ mit einer Feierstunde im Beisein des Potsdamer Oberbürgermeisters Mike Schubert und Staatssekretär Dr. Michael Meister (Bundesministerium für Bildung und Forschung) eröffnet. Das Gebäude entstand in rund zweieinhalbjähriger Bauzeit und kostete 16,1 Mio. Euro. Es bietet auf gut 1500 m² Hauptnutzfläche Labore und Büroräume für zwei Sektionen des GFZ sowie einen Serverraum. 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. ■

(Foto: Reinhardt & Sommer)

Neue digitale Weiterbildungsformate in der Satelliten-Fernerkundung



Satelliten vermessen die Erde. (Bild: marcel – stock.adobe.com, Grafik: Antonia Cozacu, GFZ)

Satellitendaten bieten wertvolle Informationen, um die Erdoberfläche und ihre Prozesse besser zu verstehen, und sie stehen zunehmend kostenfrei zur Verfügung. Damit sind sie nicht nur für die Wissenschaft interessant, sondern auch für Anwenderinnen und Anwender aus so vielfältigen Bereichen wie Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz sowie Planung. Um den Zugang zu den Fernerkundungsdaten und den Einstieg in ihre Nutzung zu erleichtern, bietet das GFZ nun über die Webplattform FERN.Lern eine Reihe digitaler Weiterbildungen zur Fernerkundung an.

Satellitendaten liefern weit mehr als nur schöne Bilder unserer Erde. Dank der zunehmend freien Datenpolitik der Raumfahrtagenturen stehen hochaktuelle und flächenhafte Umweltinformationen kostenfrei zur Verfügung. Sie umfassen hochauflösende optische und spektrale Daten, auf deren Basis detaillierte Karten und Bilder erstellt werden können. Für das Jahr 2022 ist der Start von EnMAP (Environmental Mapping Analysis Program) geplant, die erste deutsche Hyperspektral-Satellitenmission. Das GFZ hat die wissenschaftliche Leitung inne. Das Hyperspektralinstrument an Bord des Satelliten soll Detailinformationen über die Ökosysteme auf der Landoberfläche der Erde liefern.

So wächst der Schatz an frei verfügbaren Fernerkundungsdaten zwar exponentiell an und wird zunehmend nicht nur für die Wissenschaft interessant, sondern auch für eine mögliche Anwendung in Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz, Planung sowie Behörden. Noch aber ist die Nutzung dieser Daten oft wenig in den Arbeitsalltag und in Entscheidungsprozesse dieser Gruppen integriert. Für viele unerfahrene Nutzende ist die Hemmschwelle, Satellitendaten zu verwenden hoch. Weder der Zugang zu den Daten noch ihre Nutzung sind selbstklärend. Tutorials oder Anleitungen sind in der Regel auf wissenschaftlichem Niveau und oft nur auf Englisch verfügbar.

Zu den neu entwickelten digitalen Weiterbildungsangeboten gehören unter anderem:

■ **HYPERedu** – Eine neue Online-Lerninitiative für hyperspektrale Fernerkundung, gefördert durch die DLR Raumfahrtagentur mit Mitteln des BMWi

Die Ausbildungsinitiative HYPERedu ist Teil der Nutzungsvorbereitung der EnMAP-Mission und hat zum Ziel, zukünftige Nutzergruppen in der Anwendung von hyperspektralen Daten zu schulen. Sie stellt eine stetig wachsende Zahl von Lehrmaterialien und Online-Kursen zur Verfügung, darunter der Kurs **Massive Open Online Course (MOOC) „Beyond the Visible – Introduction to Hyperspectral Remote Sensing“**.

Der MOOC vermittelt die Grundlagen der abbildenden Spektroskopie und gibt darüber hinaus einen Überblick über frei nutzbare Datenquellen und Open-Source-Software, sowie einen Einstieg in die praktische Nutzung der Daten mit der EnMAP-Box. Er richtet sich an Studierende und Anwenderinnen sowie Anwender auf der ganzen Welt und setzt Grundkenntnisse auf dem Gebiet der optischen Fernerkundung voraus. Der Kurs umfasst drei thematische Lektionen in englischer Sprache und ist so konzipiert, dass er in etwa fünf Stunden zu einem selbstgewählten Zeitpunkt und in eigenem Tempo absolviert werden kann.

Anmeldung über: <https://eo-college.org/courses/beyond-the-visible/>

■ **SAPIENS** – *Satellitendaten für Planung, Industrie, Energiewirtschaft und Naturschutz, gefördert von der Helmholtz-Gemeinschaft*

In interaktiven Live-Online-Schulungen lernen die Teilnehmenden die Grundlagen und Anwendungsfelder der multispektralen Satelliten-Fernerkundung kennen. In praktischen Übungen wird die selbstständige Arbeit mit multispektralen Satellitendaten gefördert.

Anmeldung über: <https://fernern.gfz-potsdam.de/live>

■ **KONSAB** – *Kommunikationsinitiative zur Nutzung von Satellitendaten in der Agrar- und Forstwirtschaft Brandenburgs, wurde gefördert vom MWFK Brandenburg*

In einer Vielzahl von Lernvideos und Webseminaren werden die Grundlagen der Satelliten-Fernerkundung für die Land- und Forstwirtschaft vermittelt und Anwendungsbeispiele gezeigt. ■

Alle Weiterbildungsangebote des GFZ zur Fernerkundung auf der Webplattform FERN.Lern: <https://fernern.gfz-potsdam.de>

BMBF prämiert das GFZ als Vorreiter in der internationalen Wissenschaftsdiplomatie



Teilnehmende der Paneldiskussion (v.l.n.r.): Alexey Faguet, Trofimuk Institut RAS; Olga Dobrovidova, Präsidentin AKSON; Jurij Balega, Vizepräsident RAS; Ruslan Edelgeriev, Sonderbeauftragter für Klimafragen des Präsidenten; Géza Andreas v. Geyr, Deutscher Botschafter; Ludwig Stroink, GFZ; Judith Schicks, GFZ; Josef Zens, GFZ. Es fehlt: Niels Hovius; kommissarischer Wissenschaftlicher Vorstand und Sprecher des Vorstands des GFZ, der per Video der Veranstaltung zugeschaltet war. (Foto: Scientific Russia/Andrej Luft)

In einer feierlichen Zeremonie verlieh die ehemalige Bundesministerin für Bildung und Forschung, Anja Karliczek, am 1. Juni 2021 dem GFZ den erstmals ausgelobten Preis für Bildungs- und Wissenschaftsdiplomatie. Mit dem Preis werden wissenschaftliche Kooperationen gewürdigt, die über nationale Grenzen hinweg vertrauensvolle und nachhaltige Partnerschaften aufbauen und deren Erkenntnisse wichtige Grundlage für politische Entscheidungen sein können. Der Preis ist mit 75 000 € dotiert.

Das von Projekte & Internationales, der zentralen Anlaufstelle für alle Informationen rund um das Thema Projektberatung und internationalen Beziehungen des GFZ, eingereichte Kommunikationskonzept „Gemeinsam für ein besseres Klima – Aktive Wissenschaftsdiplomatie mit Russland – BRIDGE“ zielt auf die gemeinsame Klima- und Nachhaltigkeitsforschung ab, die Deutschland und Russland bereits über viele Jahrzehnte verbindet. Das GFZ setzt mit

seinem Konzept auf ein breites Spektrum von analogen und digitalen Formaten, die sowohl Informations- als auch Vermittlungscharakter haben und unterschiedliche Partizipationsmöglichkeiten anbieten. Mit den Kommunikationsmaßnahmen werden die Deutsch-Russischen Forschungsaktivitäten stärker in das Bewusstsein von Politik und Gesellschaft gerückt und leisten damit einen Beitrag zur Wissenschaftsdiplomatie beider Länder.

Die Eröffnungsfeierlichkeiten des Kommunikationsjahres fanden am Abend des 16. November 2021 in den Räumlichkeiten der Russischen Akademie der Wissenschaften, RAS, in Moskau statt. Den Begrüßungsworten durch den Vizepräsidenten der RAS, Prof. Dr. Jurij Balega und Frau Gabriele Hermani, Bundesministerium für Bildung und Forschung, folgte eine Paneldiskussion zum Thema „Gemeinsam für ein besseres Klima – Wie kann gemeinsame Klimaforschung das Diplomatische Klima verbessern“. ■

GFZ Friends – Förderverein des GFZ

Unterstützen, bewahren, vernetzen! Diese Kurzformel beschreibt wohl am besten, was den Verein der Freunde und Förderer des GFZ e. V. (kurz GFZ Friends) antreibt.

Um dieses Motto stetig neu zu beleben, hat der Verein ein attraktives Programm ins Leben gerufen, das GFZ Friends Mentoring Programme. Ziel der Initiative ist es, GFZ-Nachwuchskräfte durch eine Patenschaft mit einer erfahrenen Mentorin oder einem erfahrenen Mentor bei der beruflichen Entwicklung zu unterstützen. Für eine erste Runde haben sich zwölf interessierte Nachwuchsforschende gemeldet. Der Verein kann allen ab Januar 2022 jeweils eine erfahrene Führungskraft aus dem In- oder Ausland an die Seite stellen.



Dervon GFZ Friends verliehene Friedrich-Robert-Helmert-Preis für die Jahrgangsbeste

Promotion ging 2021 an Dr. Irina Zhelavskaya. Sie promovierte als Geo.X-PhD-Fellow an der Universität Potsdam und dem GFZ auf dem Gebiet der computergestützten Physik und schloss ihre Promotion im Oktober 2020 mit der Bestnote Summa cum laude ab. In der GFZ-Sektion 2.7 Weltraumphysik und Weltraumwetter erforschte Irina Zhelavskaya die Dynamik der Plasmasphäre, einer Region des kalten und dichten Plasmas, das die Erde umgibt und u. a. für die globale Satelliten-Navigation wichtig ist. ■

Informationen zu den Aktivitäten des Vereins und zur Mitgliedschaft: www.gfz-friends.de

Ausgezeichnet

Wechsel in den Departments- und Sektionsleitungen



Foto: Univ. Potsdam, Karla Fritze

Am 17. März 2021 wurde **Prof. Dirk Wagner** zum neuen Leiter des Departments 3 Geochemie benannt. Neben seiner jetzigen Funktion als Department-Direktor ist Dirk Wagner Leiter der Sektion 3.7 Geomikrobiologie am GFZ. Er lehrt Geomikrobiologie und Geobiologie am Institut für Geowissenschaften der Universität Potsdam und fungiert darüber hinaus als Wissenschaftlicher Berater der GeoGraduates am GFZ. Prof. Wagner folgt Prof. Michael Kühn, dem Leiter der GFZ-Sektion 3.4 Fluidsystemmodellierung, der dem Department von 2016 bis 2020 vorstand. ■



PD Dr. Wolfgang Graf zu Castell-Rüdenhausen ist seit 1. November 2021 neuer Direktor des Departments 5 Daten-, Informations- und IT-Dienste und Chief Information Officer (CIO) am GFZ. Er tritt damit die Nachfolge von Dr. Jörn Lauterjung an, der im September 2020 in den Ruhestand gegangen war. Seit 1. September 2020 hatte Martin Hammitzsch die kommissarische Leitung des Departments inne.

Zu Castell kommt vom Helmholtz-Zentrum München, wo er der Leiter des Departments Information and Communication Technology und des Departments Digitalisierung war, sowie Information Technology Security Officer. In der Helmholtz-Gemeinschaft ist er Vorsitzender des Arbeitskreises Open Science, Mitglied der Taskforce Digitalisierung und hat an der Digitalisierungsstrategie der Helmholtz-Gemeinschaft mitgewirkt. Seit 2001 lehrt er an der Technischen Universität München. ■



Prof. Claudio Facenna hat zum 1. September 2021 die Leitung der Sektion 4.1 Dynamik der Lithosphäre am GFZ übernommen. Er folgt auf Prof. Onno Oncken, der Ende September altersbedingt ausgeschieden ist. Claudio Facenna ist einer der international führenden Forschenden auf dem Gebiet der Geodynamik mit einem Schwerpunkt auf der aktiven Tektonik. Der italienische Wissenschaftler hat eine Professur an der Università Roma TRE.



Der bisherige Leiter der Sektion 4.1, **Prof. Onno Oncken**, hatte seit der Gründung leitende Funktionen am GFZ inne. Er begann 1992 als Leiter der damaligen Sektion „Struktur, Evolution und Geodynamik“ und war von 2003 bis 2018 Departmentdirektor. Von 2004 bis Ende 2020 war Onno Oncken darüber hinaus Programmsprecher am GFZ für drei Förderperioden der programmorientierten Forschungsförderung (PoF) in der Helmholtz-Gemeinschaft. Seit 1994 ist er Professor an der Freien Universität Berlin. Der vielfach ausgezeichnete Forscher und Südamerika-Experte wird dem GFZ noch als Gastwissenschaftler angehören. ■



Prof. Ingo Sass ist seit 1. September 2021 neuer Leiter der Sektion 4.8 Geenergie am GFZ. Er tritt damit die Nachfolge von Prof. Ernst Huenges an, der zum 31. Juni 2021 altersbedingt ausgeschieden ist. Seit 1. Januar 2021 hatte Dr. Simona Regenspurg die kommissarische

rische Sektionsleitung inne. Ingo Sass kommt von der Technischen Universität Darmstadt, wo er eine W3-Professur innehat. Diese wird in einer gemeinsamen Berufung der Institutionen in die Kooperation der TU Darmstadt mit dem GFZ integriert.



Mit **Prof. Ernst Huenges** geht ein Pionier der internationalen Geothermieforschung in den Ruhestand.

Mehr als dreißig Jahre lang hat er in vielen verschiedenen Funktionen dafür gearbeitet, das Potenzial der Wärme aus dem Untergrund für eine klimafreundliche, nachhaltige und regionale Energieversorgung zu erkunden und zu nutzen. Der Verfahrenstechniker und Geophysiker kam nach Stationen am Kontinentalen Tiefbohrprogramm (KTB), der RWTH Aachen und dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) 1994 an das GFZ. Er lehrte er als Honorarprofessor für Geothermische Technologien an der Technischen Universität Berlin. ■



Dr. Monika Korte ist seit 1. Oktober 2021 kommissarische Leiterin der Sektion 2.3 Geomagnetismus. Sie folgt Prof. Claudia Stolle, die als Vorstand an das Leibniz Institut Kühlungsborn wechselte. Frau Korte leitet in der Sektion 2.3 die Arbeitsgruppe Entwicklung des Erdmagnetfelds. ■

Neue Berufungen am GFZ



Prof. Sabine Chabrilat, GFZ-Sektion 1.4 Fernerkundung und Geoinformatik, ist seit 1. August 2021 W2-

Professorin für Digitale Bodenkartierung am Institut für Bodenkunde an der Naturwissenschaftlichen Fakultät in gemeinsamer Berufung mit der Leibniz Universität Hannover. ■



apl. Prof. Oliver Heibach, GFZ-Sektion 2.6 Erdbebengefährdung und dynamische Risiken, wurde am 12.

Januar 2021 zum außerplanmäßigen Professor für Geophysikalische Modellierung mit Fokus auf das Spannungsfeld der Erdkruste an der Technischen Universität Berlin ernannt. ■



apl. Prof. Judith Schicks, GFZ-Sektion 3.1 Anorganische und Isotopengeochemie, wurde am 8. Januar

2021 zur außerplanmäßigen Professorin für Thermodynamik und Kinetik von Mehrphasensystemen an der Universität Potsdam ernannt. ■



PD Dr. Hans-Martin Schulz, GFZ-Sektion 3.2 Organische Geochemie, ist Gastprofessor an der Central

South University, China. Die Professur ist zunächst befristet für den Zeitraum Juni 2021 bis Juni 2026. ■



Prof. Hannes Hoffmann, GFZ-Sektion 4.8 Geoenergie, ist seit 1. Dezember 2021 W1-Juniorprofessor für Reservoir Engineering in gemeinsamer

Berufung mit der Technischen Universität Berlin. ■

Humboldt-Forschungspreisträger am GFZ

Die Alexander von Humboldt-Stiftung zeichnet mit dem Humboldt-Forschungspreis jährlich bis zu 100 international anerkannte Forschende für ihr bisheriges Gesamtschaffen aus. Das GFZ kann in dem Jahr 2021 gleich zwei Forschungspreisträger als Gastforscher begrüßen.



Prof. Gregory Beroza, Professor für Geophysik am Department of Geophysics an der Stanford University in

Kalifornien, erhielt den Preis 2020. Er hat unter anderem in der Erforschung der dynamischen Prozesse, die mit der Entstehung von Erdbeben und ihrer Ausbreitung verbunden sind, grundlegende neue Theorien und Erkenntnisse geschaffen. Beroza ist vom 1. Oktober 2021 bis zum Februar 2022 Gast von Prof. Marco Bohnhoff in der GFZ-Sektion 4.2 Geomechanik und Wissenschaftliches Bohren.



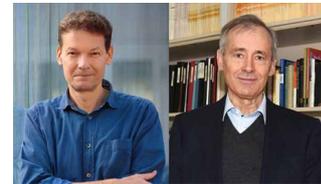
Prof. Jeroen Aerts von der Vrije Universiteit Amsterdam (Niederlande) wurde 2021 mit dem Humboldt-Forschungspreis ausgezeichnet. Mit seinem

Gastgeber, Prof. Bruno Merz, dem Leiter der GFZ-Sektion 4.4 Hydrologie, wird er sich während mehrerer Aufenthalte am GFZ u. a. dem Thema „Hydrologische Extreme und Risiken“ widmen.

Das GFZ begrüßt zudem im Jahr 2021 internationale Humboldt-Stipendiatinnen und -Stipendiaten:

- **Dr. Diptiranjana Rout** und **Dr. Ahmed Nasser Mahgoub**, Sektion 2.3 Geomagnetismus
- **Dr. Youqiang Yu**, Sektion 2.4 Seismologie
- **Prof. Dr. Ameha A. Muluneh**, Sektion 2.5 Geodynamische Modellierung
- **Dr. Runa Antony** und **Dr. Elizaveta Kovaleva**, Sektion 3.5 Grenzflächen-Geochemie
- **Dr. Sagar Masuti**, Sektion 4.2 Geomechanik und Wissenschaftliches Bohren ■

Weitere Auszeichnungen



Prof. Niels Hovius und **Prof. Onno Oncken** sind im September 2021 zu **Fellows der American Geophysical Union (AGU)** ernannt worden. Niels Hovius ist kommissarischer wissenschaftlicher Vorstand des GFZ. Bevor er diese Position im

November 2020 übernahm, leitete er die Sektion 4.6 Geomorphologie des GFZ. Onno Oncken war bis zu seiner Pensionierung im August 2021 Leiter der GFZ-Sektion 4.1 Dynamik der Lithosphäre. Er ist nun als Gastwissenschaftler am GFZ tätig. Mit dem Fellowship würdigt die AGU Mitglieder, die außergewöhnliche wissenschaftliche Beiträge auf dem Gebiet der Erd- und Weltraumwissenschaften geleistet haben. Diese Ehre wird nur 0,1 Prozent der Mitglieder zuteil. Das heißt, dass in diesem Jahr nur 59 von rund 60 000 Mitgliedern aus 137 Ländern zu Fellows ernannt wurden; zwei davon stammen aus dem GFZ. Die neuen Fellows wurden offiziell während der Herbsttagung der AGU ausgezeichnet, die vom 13. bis 17. Dezember 2021 in New Orleans, USA, und online stattfand. ■



Prof. Jens Wickert (1.1) wurde im Januar 2021 in das **GNSS Science Advisory Board** der Europäischen Weltaumorganisation **ESA**

berufen. Die Nominierung ist eine hohe Auszeichnung und Anerkennung von langjährigen Leistungen, die nur erfahrenen Forschenden zuteilwird.

Zudem hat Jens Wickert im September 2021 stellvertretend für das Autorenteam den Preis für einen herausragenden Fachbeitrag in der *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* entgegengenommen. ■



Dr.-Ing. Susanne Glaser (1.1) wurde im Juni 2021 auf der Wissenschaftlichen Generalversammlung der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) mit dem IAG Young Authors Award 2019 ausgezeichnet. Er gilt als einer der renommiertesten internationalen Preise für junge Forschende in der Geodäsie. ■



Prof. Frank Flechtner (1.2) erhielt im März 2021 den International Cooperation Award des American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), der weltweit größte Luft- und Raumfahrttechnik-Verband mit Sitz in den USA. Geehrt wurde er „für die herausragende Leitung des internationalen Konsortiums bei der Planung und Durchführung der erfolgreichen Erdschweremissionen GRACE und GRACE-FO.“ ■



Prof. Doris Dransch (1.4) wurde für die Jahre 2022 bis 2025 Jahre in den Ausschuss für Wissenschaftliche Bibliotheken und Informationssysteme der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) berufen. Doris Dransch soll dort vor allem die Themen Data Science und eScience vertreten. ■



Prof. Mahdi Motagh (1.4) ist seit Dezember 2021 Mitglied im Editorial Board des wissenschaftlichen Journals Engineering Geology, eine internationale Zeitschrift, die Geo- und Ingenieurwissenschaften verbindet, insbesondere die Geologie und Geotechnik. ■



Dr.-Ing. Martin Peter Lipus (2.2) erhielt auf dem Geothermiekongress im Dezember 2021 eine Auszeichnung für seine „zukunftsweisenden patentierten Arbeiten zur Bewertung der Integrität von Geothermiebohrungen mit faseroptischen ortsverteilten Temperatur- und Dehnungsmessungen in Echtzeit“. Die Weiterentwicklung und Validierung des zum Patent angemeldeten Prinzips wurde durch den GFZ-Innovationsfonds maßgeblich unterstützt. ■



Dr. Hayley Allison (2.7) erhielt im September 2021 den renommierten Leopoldina-Preis für junge Wissenschaftlerinnen oder Wissenschaftler für ihre herausragenden Forschungsleistungen auf den Gebieten der Astrophysik. Die Leopoldina Nationale Akademie der Wissenschaften vergibt diesen Preis alle zwei Jahre an zwei herausragende Forschende, deren Promotion nicht länger als fünf Jahre zurück liegt. Der Preis ist mit 5000 Euro dotiert. ■



Prof. Friedhelm von Blanckenburg (3.3) ist seit Beginn des Jahres 2021 Präsident der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (DMG). Die DMG vertritt in Deutschland auch die Geochemie sowie die Materialwissenschaften und die Rohstoffkunde. ■

Gleichzeitig nahm von Blanckenburg am 1. Januar 2021 sein Amt als Vorstandsmitglied des Dachverbandes der Geowissenschaften DVGeo auf, in dem er einer der drei Vizepräsidenten ist. ■

Der DVGeo ist die Vereinigung der vier großen geowissenschaftlichen Gesellschaften in Deutschland: der Geologie, der Mineralogie, der Geophysik und der Paläontologie. ■



Dr. Hella Wittmann-Oelze (3.3) wurde im September 2021 auf der Jahrestagung der Deutschen Geologischen Gesellschaft – Geologische Vereinigung DGGV die Eugen-Seibold-Medaille verliehen. Mit der Medaille ehrt die DGGV außerordentliche wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der Geowissenschaften. Der Preis wird entweder für eine besonders herausragende Einzelveröffentlichung oder für eine Reihe von Veröffentlichungen vergeben. Die Ehrung erhält Hella Wittmann-Oelze für zehn aufeinander aufbauende Publikationen, welche wegweisende Fortschritte bei der Quantifizierung der Sedimentproduktion und des Sedimenttransports durch Flussbecken bis hin zu den Ozeanen erbrachten. ■



PD Dr. Heidi Kreibich (4.4) wurde im Juli 2021 zur Vorsitzenden von Panta Rhei für das Biennium von 2021 bis 2023 ernannt. Panta Rhei ist eine globale dekadische Initiative der International Association of Hydrological Sciences (IAHS). Die Panta Rhei-Initiative widmet sich der Erforschung von Wechselwirkungen und Rückkopplungen zwischen Hydrologie und Gesellschaft. ■

System Erde. GFZ-Journal (2021) Jahrgang 11, Heft 2
systemerde.gfz-potsdam.de

Nadeln im Heuhaufen

*Michael Kühn, Oliver Heidbach,
Arnd Heumann, Josef Zens 6–11*

Standortsuche im Spannungsfeld

*Oliver Heidbach, Moritz Ziegler, Sophia Morawietz,
Karsten Reiter, Luisa Röckel, Fabrice Cotton 12–17*

Licht ins Dunkel bringen

*Stefan Lüth, Roman Esefelder, Heike Richter,
Katrin Jaksch, Benjamin Schwarz, Britta Wawerzinek,
Rüdiger Giese, Charlotte M. Krawczyk 18–23*

Gesteinseigenschaften geben den Ton an

*Steffi Genderjahn, Anja M. Schleicher,
Valerian Schuster, Julia Mitzscherling,
Dirk Wagner, Erik Rybacki, Georg Dresen 24–29*

Modelle simulieren die Zukunft

*Michael Kühn, Theresa Hennig, Oliver Heidbach,
Magdalena Scheck-Wenderoth 30–35*

Stabilität über eine Million Jahre

*Richard Ott, Boris Gailleton, Luca C. Malatesta,
Lukas Becker, Jean Braun 36–41*

