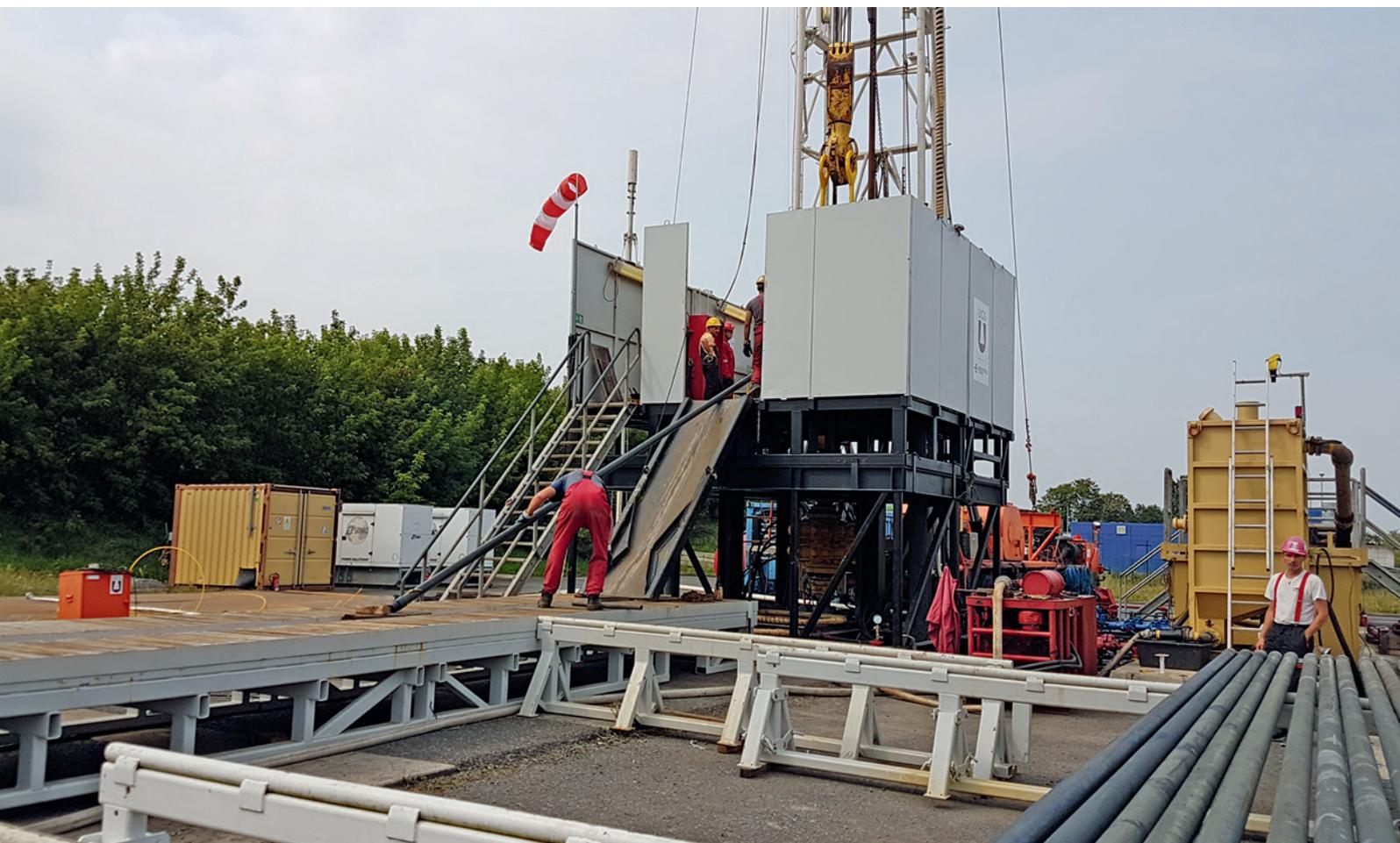


# Nutzung des geologischen Untergrunds zur stofflichen Speicherung

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

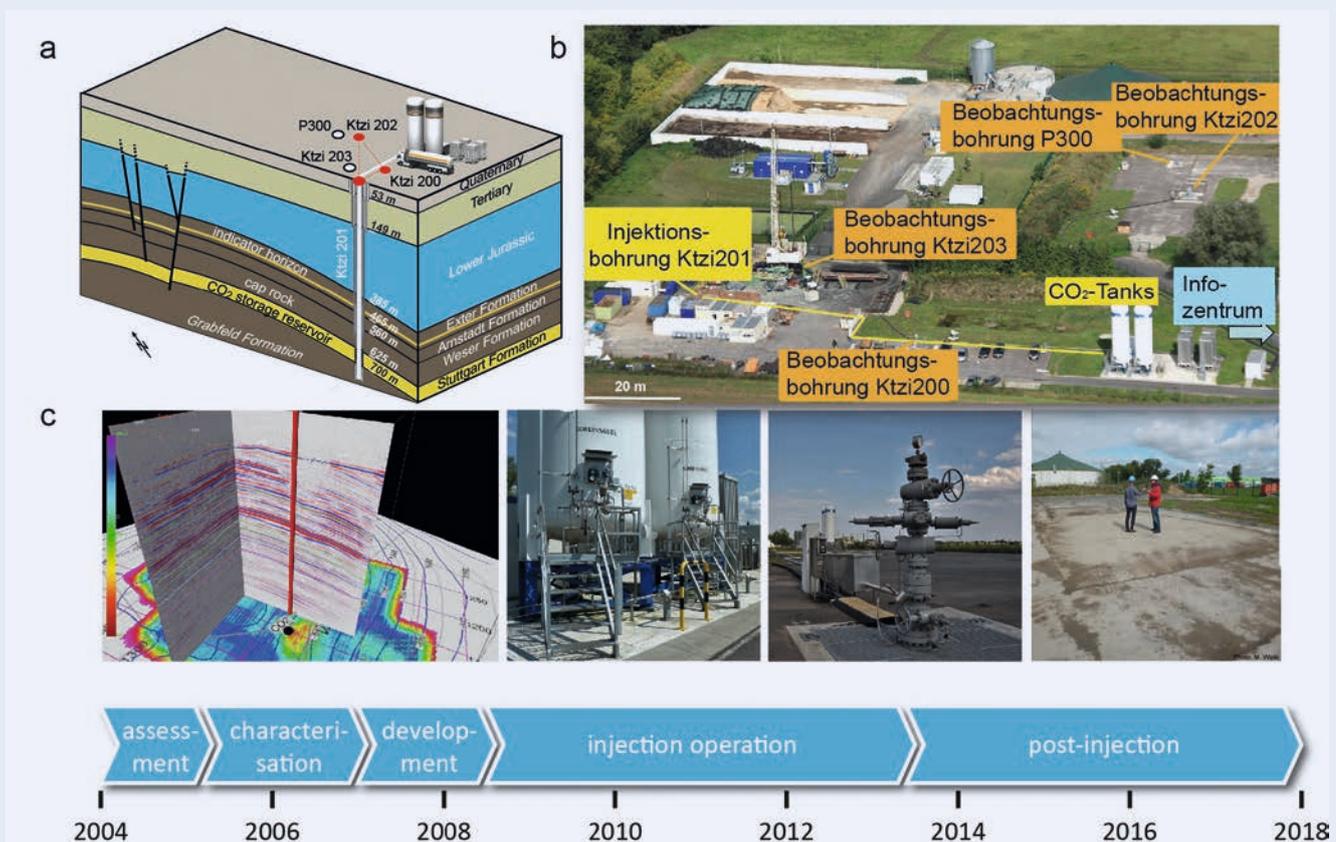


Abb. 1: (a) Schematische Darstellung des Speicherkomplexes am Pilotstandort Ketzin (Liebscher et al., 2013); (b) Luftbildaufnahme vom Gelände mit Bohrungen und Injektionsanlage; (c) durchlaufene Phasen eines CO<sub>2</sub>-Speichers (Fotos: GFZ)

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

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

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

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

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

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

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

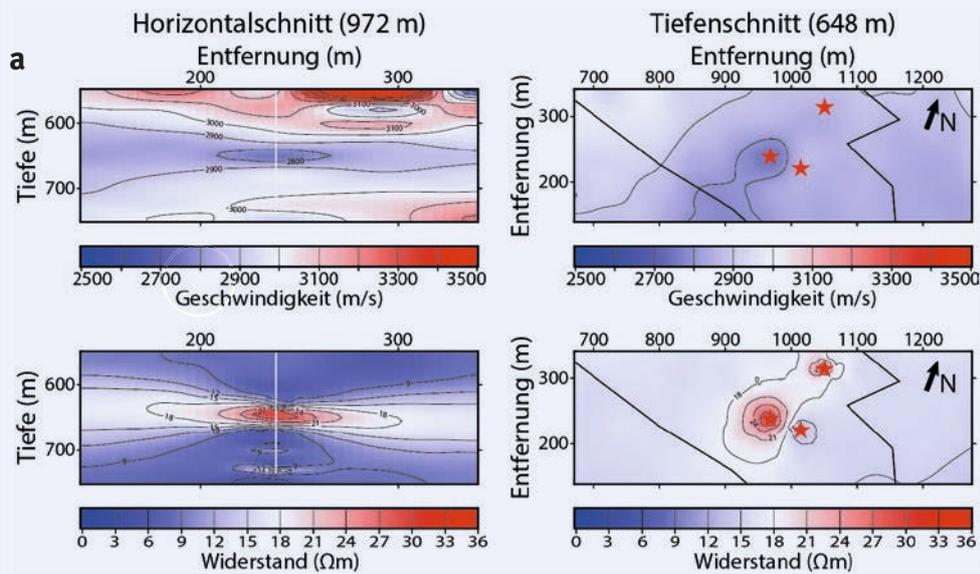


Abb. 2: Ergebnisse der multi-disziplinären Speicherüberwachung am CO<sub>2</sub>-Pilotstandort Ketzin:

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

b) Schaubild für die in der multi-physikalischen Modellierung verwendeten Komponenten und Prozesse;

c) lithologisches Profil und gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlammgas von Kernprobenmaterial aus Seitenkernbohrungen vor dem Bohrlochverschluss 2017

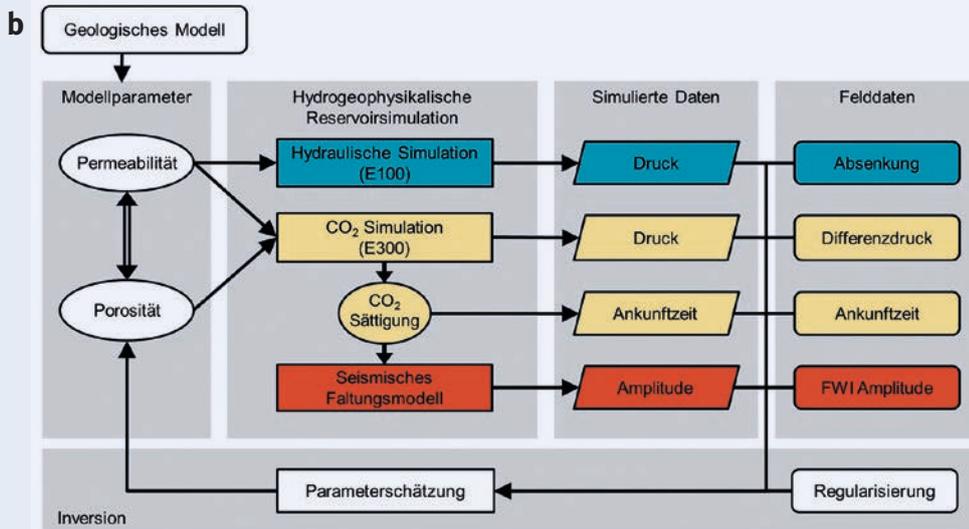
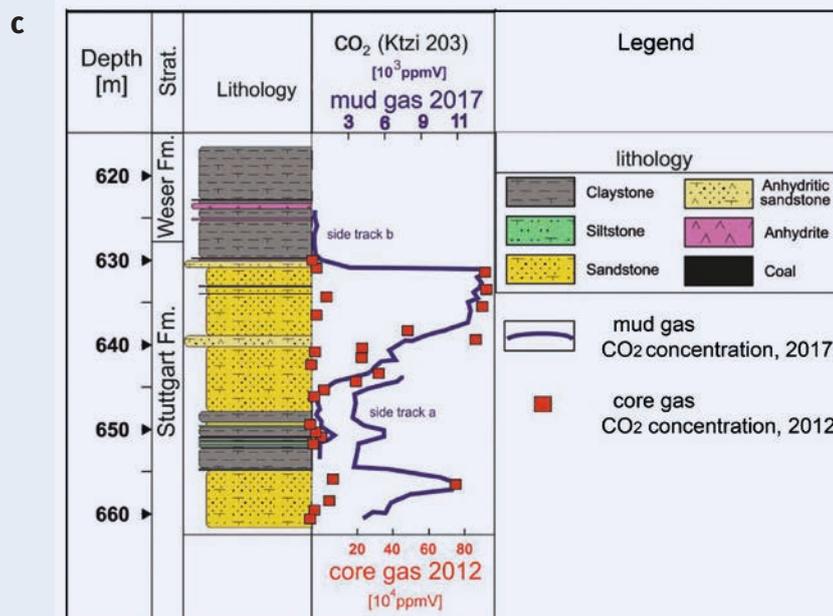


Fig. 2: Results of the multi-disciplinary storage surveillance at the Ketzin CO<sub>2</sub> pilot site:

a) Joint inversion results based on seismic and geoelectric data, derived with full waveform inversion (FWI) and electrical resistivity tomography (ERT), at the cross-section x = 972 m (intersecting the injection well Ktziz01) and depth section z = 648 m (storage target zone);

b) Workflow of the components and processes used in the multi-physical modelling;

c) Lithological profile and measured CO<sub>2</sub> concentration in the mud gas of core sample material from side-track coring before the well abandonment in 2017



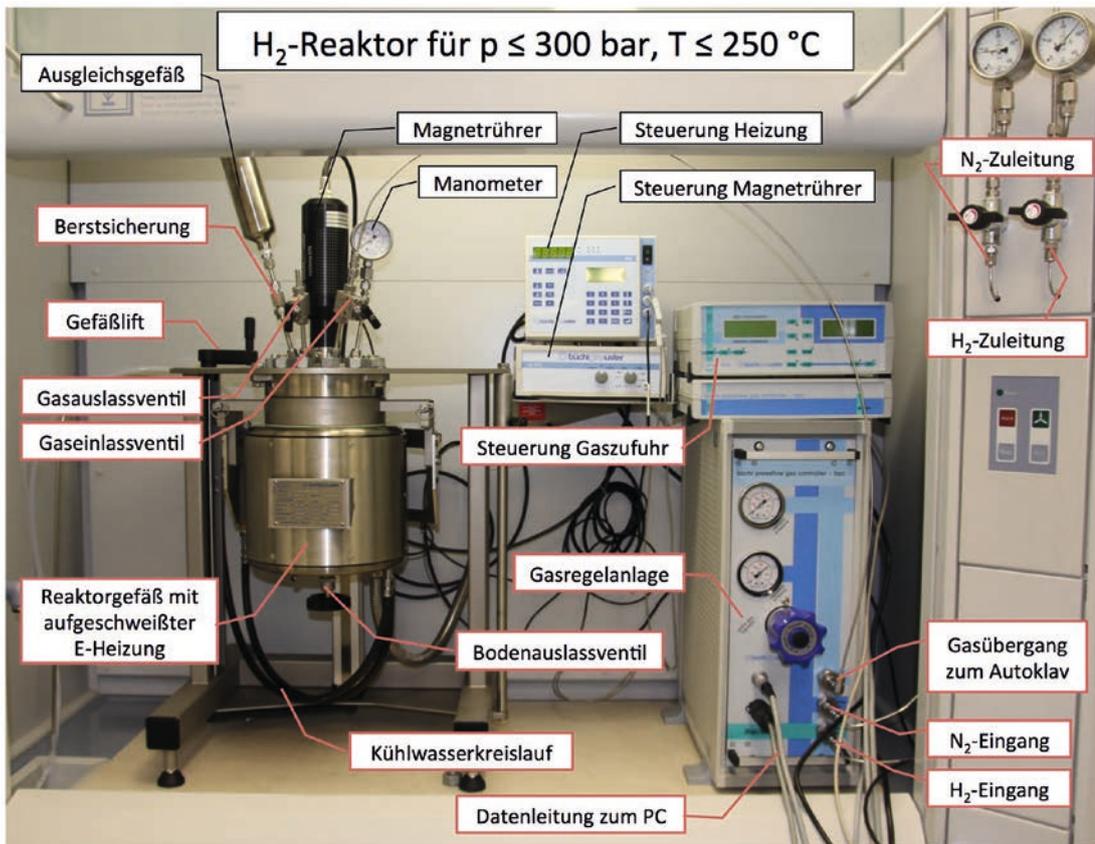


Abb. 3: Hochdruck-Hochtemperatur-Autoklav im GFZ-Wasserstofflabor (Foto: P. Pilz, GFZ)

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

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

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

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

## Endlagerung

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

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



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

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

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

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

## Zusammenfassung und Ausblick

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

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

## Literatur

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