

Intelligente Bohrungen zur Exploration, Standortcharakterisierung und Speicherüberwachung

Axel Liebscher, Jan Henniges, Stefan Lüth, Sonja Martens, Fabian Möller, Bernhard Prevedel, Cornelia Schmidt-Hattenberger
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The utilization of the subsurface for storage of energy and matter is increasingly important. Central to any storage operation are wellbores, not only for exploration, characterization and development of the storage site itself but also for monitoring the storage operation and the storage complex during and after the injection activities. Smart wellbores, which are equipped with permanent sensors at or near reservoir depth, are an integral part of such a monitoring system and provide important data for the storage operation itself but also for monitoring the long-term behaviour of the storage complex. At the GFZ pilot site for the geological storage of CO₂ at Ketzin, over 67 kt of CO₂ have been stored successfully in a deep saline aquifer. Here, smart wells that are equipped with i) glass fibre cables for distributed temperature sensing, ii) electrical heater cables for heating experiments, iii) pressure and temperature sensors at or near reservoir depth, and iv) permanent electrodes for geoelectric measurements enabled a smooth and safe injection operation and provided essential data on the subsurface behaviour of the injected CO₂.



Die Nutzung des geologischen Untergrunds zu Speicherzwecken gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die geologische Untergrundspeicherung von zunächst Stadtgas und später Erdgas in Salzkavernen oder Porenspeichern ist eine seit Jahrzehnten etablierte Technik und wird zum Ausgleich saisonaler und kurzfristiger Schwankungen zwischen Gasangebot und -nachfrage sowie als strategische Reserve eingesetzt. Auch die Verpressung von Sole in tiefliegende Aquifere, wie sie z.B. beim Bau von Salzkavernen seit Jahrzehnten erfolgreich angewandt wird, ist eine etablierte und umweltschonende Technologie. Im Zuge der für Deutschland angestrebten Energiewende und der Diskussion um Maßnahmen gegen den anthropogen forcierten Klimawandel steigt jedoch der Bedarf an weiteren Speichertechnologien, wie der dauerhaften geologischen Speicherung von CO₂ oder der stofflichen Speicherung von Energie z.B. in Form von Wasserstoff oder synthetischem Erdgas. Zur Erforschung und Entwicklung dieser neuen Speichertechnologien sind wissenschaftlich ausgerichtete Pilotstandorte unabdingbar. Nur hier können die erforderlichen Grundlagenkenntnisse gewonnen und die benötigten Grundlagenteknologien für den Betrieb und die Überwachung der Speicher entwickelt und getestet werden. Integraler Bestandteil aller Speichertechnologien sind Tiefbohrungen, zum einen für die geologische Exploration, Charakterisierung und Entwicklung der Speichergesteine und zum anderen für die Überwachung der Speicher und der Speicheraktivitäten während und nach der aktiven Speicherphase. Bohrungen sind der einzige direkte Zugang zum Speicher und bieten damit die einzige Möglichkeit, Proben und Daten direkt aus dem Speicher und seinem Abdeckgestein zu gewinnen. Diese Proben und Daten sind eine unverzichtbare Ergänzung zu den indirekten, von der Erdoberfläche ausgeführten Überwachungsmethoden.

Generell entspricht die bei Speicherprojekten zur Anwendung kommende Tiefbohrtechnik den etablierten Standards der Öl- und Gasindustrie. Insbesondere bei wissenschaftlichen Pilotstandorten gibt es jedoch wesentliche Unterschiede hinsichtlich des Ausbaus und der technischen Ausstattung der Bohrungen, da diese nicht nur der Ein- und Ausspeicherung, sondern auch

der wissenschaftlichen Untersuchung und Überwachung der Speicherlagerstätte dienen. Für diese Aufgaben werden in Verbindung mit einzelnen Rohrtouren unterschiedliche Messkabel und Sensoren in den Bohrungen fest eingebaut. Bei einer solchen „intelligenten“ Verrohrung werden die Sensoren entweder direkt als spezielles Rohrelement in die jeweilige Rohrtour integriert (z.B. Druck- und Temperatursensoren), oder mittels Schellen und Manschetten üblicherweise außen auf der Rohrtour befestigt. Dabei kann es sich um Permanentelektroden für geoelektrische Messungen, Glasfaserkabel zur Messung von Temperaturprofilen entlang der Bohrung und zur Aufzeichnung seismischer Signale oder aber um elektrische Heizkabel handeln. Mit Ausnahme der Glasfaserkabel, die gleichzeitig zur Übertragung des Messsignals nach obertage dienen, werden die verschiedenen Messsignale über außen an der Bohrung verlaufende Kabel nach obertage gesendet und dort ausgewertet. Die Messinstrumente, Sensoren und Kabel werden zusammen mit der Verrohrung üblicherweise einzementiert oder verlaufen im unzementierten Ringraum bis zum Bohrlochkopf obertage.

Pilotstandort Ketzin

Der vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ betriebene Pilotstandort Ketzin zur geologischen Speicherung von CO₂ (Abb. 1) liegt etwa 22 km nordwestlich von Potsdam und war der erste europäische und ist immer noch der einzige deutsche CO₂-Speicherstandort an Land (Liebscher et al., 2013a). Von Juli 2008 bis August 2013 wurden hier etwas mehr als 67 kt CO₂ in Sandsteine der obertriassischen Stuttgart-Formation eingespeichert. Der Hauptspeicherhorizont liegt in einer Tiefe von etwa 630 bis 650 m und wird von mehr als 165 m mächtigen Tonsteinen der obertriassischen Weser- und Arnstadt-Formationen überlagert, die den Speicher nach oben abdichten. Strukturell befindet sich der Speicher an der Südostflanke der Roskow-Ketzin-Doppelantiklinale, einer kretazisch gebildeten Salzstruktur innerhalb des Nordostdeutschen Beckens.

Zur Exploration, Standortcharakterisierung und Speicherüberwachung wurden am Standort Ketzin insgesamt vier Tiefbohrungen bis in etwa 700 bis 800 m abgeteuft (Abb. 1, 2), die den gesamten Speicherkomplex erschließen (Prevedel et al., 2009; Liebscher et al., 2013b). Die Bohrungen Ktzi 200, 201 und 202 wurden vor Beginn der Injektion erstellt, die Bohrung Ktzi 203 wurde nach vier Jahren Injektionsbetrieb durch den CO₂-gefüllten Speicher gebohrt. Alle vier Bohrungen sind intelligent ausgebaut (Abb. 2): Zur Überwachung der Temperaturentwicklung im Speicher verlaufen außen an den Produktionsrohrturen der vier Bohrungen über die gesamte Länge Glasfaserkabel für Temperaturmessungen (DTS = distributed temperature sensing); in den Bohrungen Ktzi 201, 202 und 203 sind zusätzlich Heizkabel installiert, um Wärmepulsmessungen durchführen

Links: Panoramabild des Standorts Ketzin während der Bohrarbeiten zur Bohrung Ktzi 203. Rechts sind die CO₂-Speichertanks und die Injektionsanlage mit den Luftverdampfern zu erkennen. (Foto: A. Jurczyk, GFZ)

Left: Panorama view of the Ketzin pilot site during drilling of well Ktzi 203. On the right the CO₂ storage tanks and the injection facility with the ambient air heaters.



Kontakt: A. Liebscher
(axel.liebscher@gfz-potsdam.de)

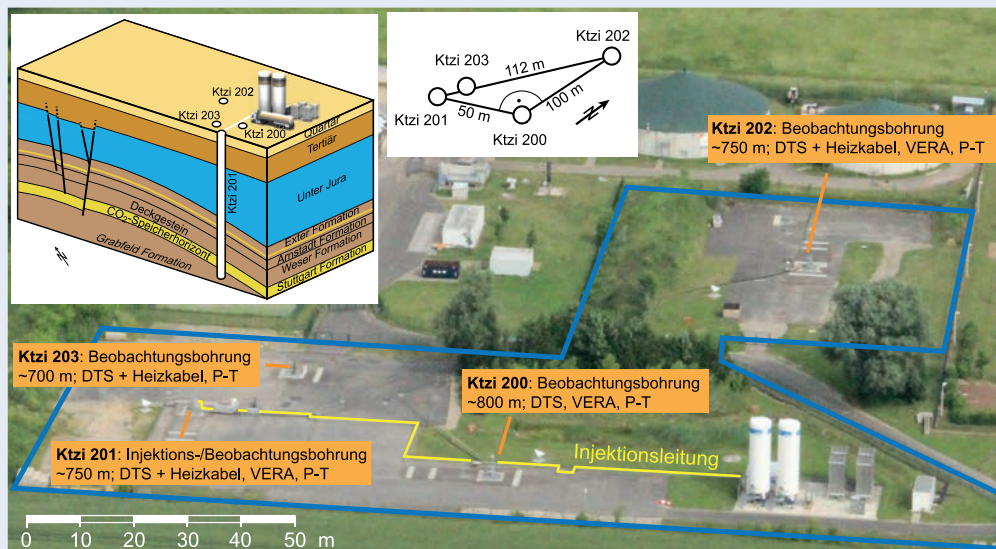


Abb 1: Luftbild des Pilotstandorts Ketzin mit der Lage der vier Tiefbohrungen zur Injektion und Beobachtung. Das Blockdiagramm zeigt schematisch die geologischen Gegebenheiten der Ketzin-Antiklinale.

Fig. 1: Aerial view of the pilot site Ketzin with location of the four deep wells for injection and observation. Block diagram shows principal geologic setting of the Ketzin anticline

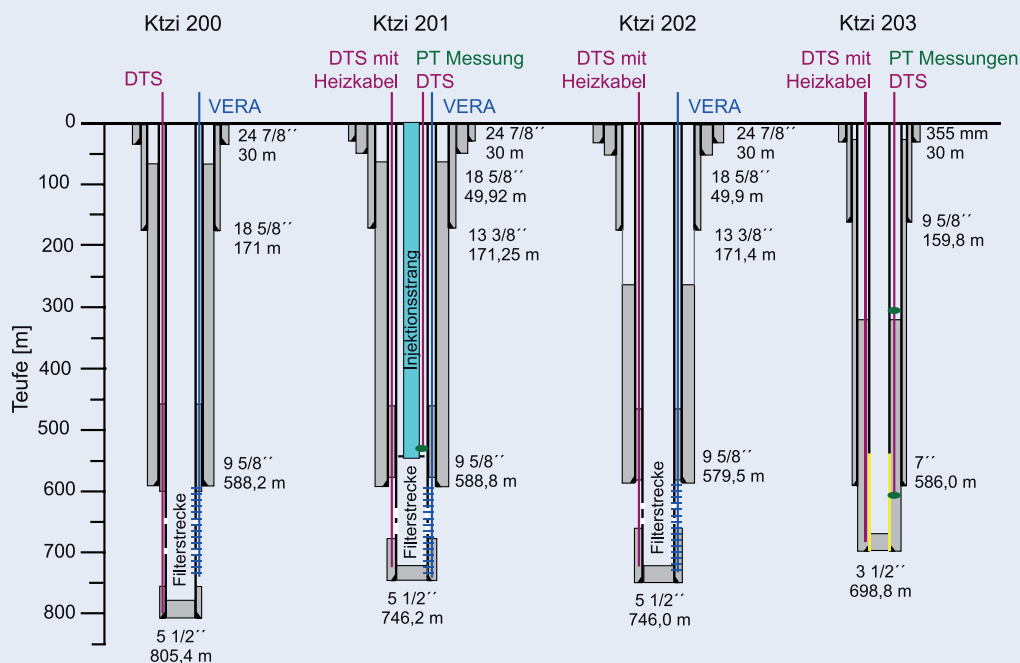


Abb. 2: Detailskizze des Aufbaus, der Verrohrung und der eingebauten Sensoren und Messsysteme der vier Tiefbohrungen am Pilotstandort Ketzin. Die Bohrungen Ktzi 200, 201 und 202 haben eine Stahlverrohrung, die Bohrung Ktzi 203 besitzt im untersten Bereich eine Glasfaser-Verrohrung (gelb).

Fig. 2: Detailed drawing of layout, casing and installed sensors and measuring systems of the four deep wells at the pilot site Ketzin site. Wells Ktzi 200, 201 and 202 have steel casings throughout whereas Ktzi 203 has a glass fibre reinforced plastic casing in the lower-most part (yellow).

zu können (s. Artikel Reinsch und Henniges in diesem Heft). In der Bohrung Ktzi 203 ist zusätzlich ein zweites DTS-System installiert, das mit zwei Druck-Temperatur-Punktsensoren in 610 und 305 m Teufe versehen ist. Zur operativen Überwachung des Injektionsprozesses ist auch der Injektionsstrang in der Ktzi 201 außen mit einem Glasfaserkabel für DTS-Messungen ausgebaut sowie mit einem Druck-Temperatur-Punktsensor in 550 m Teufe versehen. Im Teufenbereich von etwa 590 bis 740 m sind in den drei Bohrungen Ktzi 200, 201 und 202 jeweils 15 Permanentelektroden in einem Abstand von jeweils etwa 10 m für geoelektrische Messungen (VERA = vertical electrical resistivity array) eingebaut. Um die Elektroden gegen den Verrohrungsstahl zu isolieren, sind die Produktionsrohrtouren in diesem Bereich au-

ßen mit einer epoxidharzgetränkten, textilen Beschichtung ummantelt. Die in den intelligenten Bohrungen am Standort Ketzin eingebauten Messsysteme und Sensoren gehören weltweit zu den umfangreichsten, die im Bereich der Untergrundspeicherung eingesetzt werden und haben wesentliche Überwachungsdaten und Kenntnisse zum Speicherbetrieb und zu den im Speicher ablaufenden Prozessen geliefert.

Geoelektrische Überwachung der CO₂-Ausbreitung

Die in den Bohrungen permanent installierten Elektroden werden sowohl für geoelektrische Messungen zwischen der Erd-

oberfläche und den Bohrungen als auch zwischen den Bohrungen selbst verwendet und können dabei sowohl zur Stromeinspeisung als auch zur Spannungsmessung dienen.

Das CO₂ wird am Standort Ketzin in einem salinen Aquifer gespeichert. Durch die Speicherung von CO₂ wird das ursprünglich in den Gesteinsporen vorhandene, stark salzhaltige Formationsfluid durch freies CO₂ verdrängt. Da freies CO₂ im Gegensatz zum ursprünglichen Formationsfluid ein sehr schlechter elektrischer Leiter ist, führt die Speicherung von CO₂ zu einer gut messbaren, signifikanten Erhöhung des elektrischen Widerstands im Speicherhorizont. Mittels Wiederholungsmessungen, deren Ergebnisse mit der initialen Widerstandsverteilung im Speicher verglichen werden, können die durch die CO₂-Speicherung verursachten Änderungen in der elektrischen Widerstandsverteilung sowohl zeitlich als auch räumlich aufgelöst werden. Das räumliche Auflösungsvermögen geoelektrischer Überwachungsmethoden ist verglichen mit z. B. seismischen Methoden geringer. So erzielten reine Oberfläche-Oberfläche-Messungen am Standort Ketzin, bei denen sowohl die Stromeinspeisung als auch Spannungsmessung an der Erdoberfläche erfolgten, nur unzureichende Darstellungen der räumlichen CO₂-Verteilung im Speicher. Der Einsatz der fest in den Bohrungen installierten Elektroden im Bereich des Speichers hat das räumliche Auflösungsvermögen der geoelektrischen Messungen insbesondere im Bereich um die Bohrungen (etwa 50 bis 100 m) deutlich erhöht. So konnten

am Standort Ketzin mit den Oberfläche-Bohrloch-Messungen bereits CO₂-Mengen deutlich <15 kt sicher nachgewiesen und in ihrer räumlichen Ausbreitung qualitativ dargestellt werden (Abb. 3; Bergmann et al., 2012). Mit Hilfe der Messungen zwischen den Bohrungen konnten sogar Änderungen im operativen Speicherbetrieb über Änderungen der Widerstandsverteilungen qualitativ nachverfolgt werden. Im Gegensatz zu dem vergleichsweise geringen räumlichen Auflösungsvermögen ist die Auflösung geoelektrischer Messungen hinsichtlich der Sättigung des Porenraums mit CO₂ jedoch über den gesamten Sättigungsbereich gut. Da seismische Messungen oberhalb einer CO₂-Sättigung des Porenraums von etwa 20% nur noch ein geringes Auflösungsvermögen der CO₂-Sättigung haben, liefern die geoelektrischen Messungen zentrale Informationen hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung des Porenraums. Diese Sättigungsinformationen sind bedeutend, um z. B. Informationen aus seismischen Messungen über die räumliche Verteilung des CO₂ im Speicher in gespeicherte Massen von CO₂ umzurechnen oder aber Prozesse wie die Lösung des CO₂ im Formationsfluid quantitativ beschreiben zu können. Gerade die Kombination und idealerweise gemeinsame Auswertung und Inversion seismischer Messungen (räumliche, strukturelle Informationen) und detaillierten elektrischen Messungen mittels intelligenter Bohrungen (stoffliche Informationen zum Porenraum) erlaubt es, zentrale Prozesse bei der CO₂-Speicherung zu überwachen und in ihrer räumlichen und zeitlichen Dimension aufzulösen.

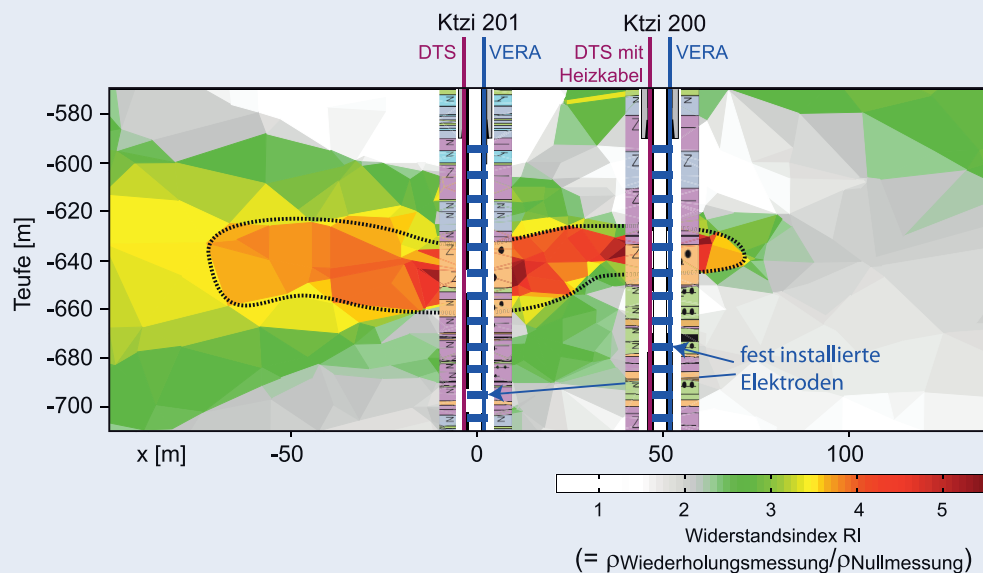


Abb. 3: Profilschnitt durch die Ebene Ktzi 201 und Ktzi 200, der die Änderung der elektrischen Widerstandsverteilung im Speicher nach etwa 13 500 t eingespeichertem CO₂ zeigt. Die gepunktete Linie umfasst qualitativ den Bereich mit signifikanten Widerstandsänderungen (Widerstandsindex > etwa 3) und gibt die räumliche Ausdehnung des CO₂ im Speicher zum Zeitpunkt der Wiederholungsmessung wieder.

Fig. 3: Cross-section through plane Ktzi 201 and Ktzi 200 that shows changes in electrical resistivity distribution within the reservoir after about 13,500 t CO₂ injected. Dotted line shows qualitatively the area with significant changes in resistivity (resistivity index > about 3) and mirrors the areal extend of the CO₂ plume at the time of the repeat measurement.

Drucküberwachung

Druckänderungen im Reservoir als Folge der CO₂-Speicherung sind zentrale Parameter einer Speicherüberwachung. Aus operativer Sicht muss sichergestellt sein, dass der von der Bergbehörde genehmigte maximal zulässige Reservoirdruck nicht überschritten wird und die Injektion sicher verläuft. Die Druckentwicklung im Reservoir ist zudem ein zentraler Parameter, an dem die Modellierungen des Reservoirverhaltens geeicht und validiert werden. Bei der Speicherung von Erdgas ist die Dichte des Gases im Bohrloch sehr gut bekannt und der Lagerstättendruck wird üblicherweise aus den gemessenen Drücken an den Bohrlochköpfen und dem Druck der Gassäule berechnet. Da der kritische Punkt von CO₂ mit 31 °C/74 bar im Bereich üblicher Druck- und Temperaturbedingungen in CO₂-Speicherbohrungen liegt, ist die Dichte des CO₂ in der Bohrung und damit der Druck der Gassäule variabel und hängt von der Temperatur ab. Eine einfache Berechnung der Reservoirdrücke aus den Kopfdrücken der Bohrungen ist deshalb bei der CO₂-Speicherung nicht möglich bzw. mit einer großen Unsicherheit behaftet. Zudem kann es insbesondere in den Beobachtungsbohrungen zu Mehrphasenbedingungen kommen (s.u.), die eine Dichteberechnung zusätzlich erschweren bzw. ausschließen. Mit Hilfe der am Standort Ketzin auf (in der Ktzi 203) bzw. nahe (in der Ktzi 201) Reservoirteufe fest eingebauten Sensoren zur Druckmessung konnte die Druckentwicklung im Reservoir sehr genau gemessen und über-

wacht werden und dadurch sichergestellt werden, dass der von der Bergbehörde genehmigte maximal zulässige Reservoirdruck nicht überschritten wurde (Liebscher *et al.*, 2013b).

Temperaturüberwachung

Das entlang des Injektionsstrangs der Ktzi 201 eingebaute DTS-System hat zentrale operative Daten und Erkenntnisse geliefert (Wiese *et al.*, 2012). Die Hauptaufgaben des fest installierten DTS-Systems waren die Überwachung der Temperaturentwicklung innerhalb des Injektionsstrangs während Stillstandzeiten, um stabile Bohrlochbedingungen zu gewährleisten und einen möglichen Rückfluss von Formationsfluid in die Bohrung zu überwachen, die Festlegung von Injektionsrate und Injektionstemperatur insbesondere bei Wiederanfahren der Injektion und die Optimierung des Injektionsprozesses. Um Mehrphasenbedingungen bzw. Phasenübergänge im Bohrloch während der Injektion zu vermeiden, wurde das CO₂ während des Normalbetriebs vor der eigentlichen Injektion über Luftverdampfer und einen Elektroverdampfer auf etwa 35 bis 40 °C vorgewärmt. Dies führte zu einer leichten Erwärmung der Injektionsbohrung und gewährleistete Temperaturen, die stets oberhalb der Kondensationstemperatur lagen. Um auch während Stillstandzeiten und der damit verbundenen Abkühlung innerhalb des Injektionsstrangs eine Kondensation des CO₂ und damit Mehrphasenbedingungen zu vermeiden, wurde die Injektionsbohrung während Stillstandzeiten zunächst mit Stickstoff beaufschlagt. In dem mit Stickstoff gefüllten Bohrloch näherten sich die Bohrlochtemperaturen während der Stillstandzeiten dem normalen Hintergrundgeotherm an. Das DTS-System erlaubte es, diesen Abkühlungsprozess mit hoher zeitlicher ($\Delta t = 3$ min) und räumlicher ($\Delta z = 1$ m) Auflösung sowie einer hohen Messgenauigkeit ($\Delta T = 0,1$ °C) abzubilden.

Unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der Nebengesteine sowie Bohrungsbau und Zementation der Ringräume spiegeln sich dabei in unterschiedlichen Abkühlungsraten wider (Abb. 4). So sind z. B. die Basis des Tertiär und eine Ton/Siltsteinlage im Jura sowie die Unterkanten der 18 5/8" und 13 3/8" Rohrtouren gut in den Temperaturprofilen zu erkennen. Bei späteren Stillstandzeiten wurde auf eine Stickstoffbeaufschlagung verzichtet und es entwickelten sich im CO₂-gefüllten Injektionsstrang Zweiphasenbedingungen (Abb. 4). Diese zeichneten sich durch einen gasförmig dominierten oberen und einen flüssig dominierten unteren Teil mit jeweils eigenen, linearen Temperaturprofilen aus. Analoge Zweiphasenbedingungen und Temperaturprofile entwickelten sich auch in den Beobachtungsbohrungen (Henninges *et al.*, 2011). Die Messungen der festinstallierten DTS-Systeme und deren Interpretation wurden durch Druck- und Temperaturdaten aus Loggingkampagnen sowie Aufnahmen einer Videobefahrung der Beobachtungsbohrungen bestätigt (Abb. 5). Die DTS-, Druck- und Loggingdaten zeigen zudem, dass sich aufgrund der Zweiphasenbedingungen im unteren Bereich der Beobachtungsbohrungen invertierte Dichteprofile entwickelten, die über lange Zeiträume stabil bleiben.

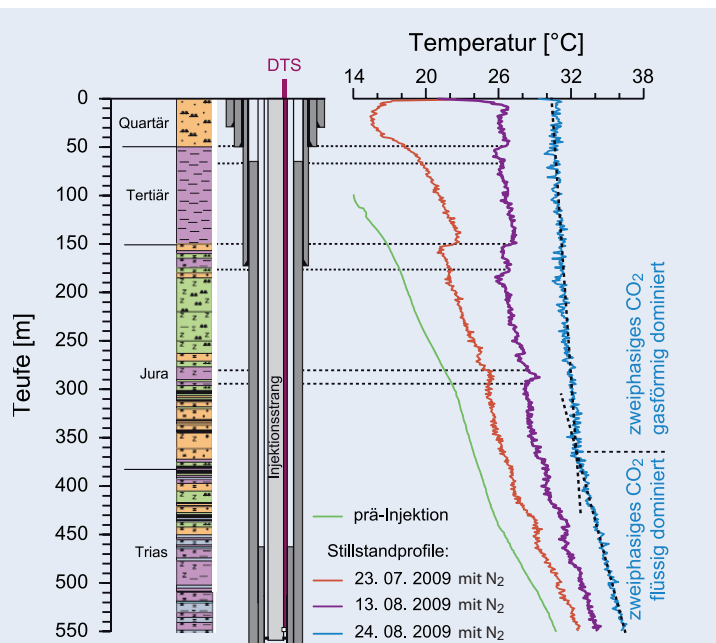


Abb. 4: Exemplarische Temperaturprofile entlang des Injektionsstrangs der Bohrung Ktzi 201 für die Nullmessung vor Beginn der Injektion sowie drei verschiedene Stillstandzeiten

Fig. 4: Exemplary temperature profiles along the injection tubing of well Ktzi 201 for the baseline prior to injection and three different shut-in phases

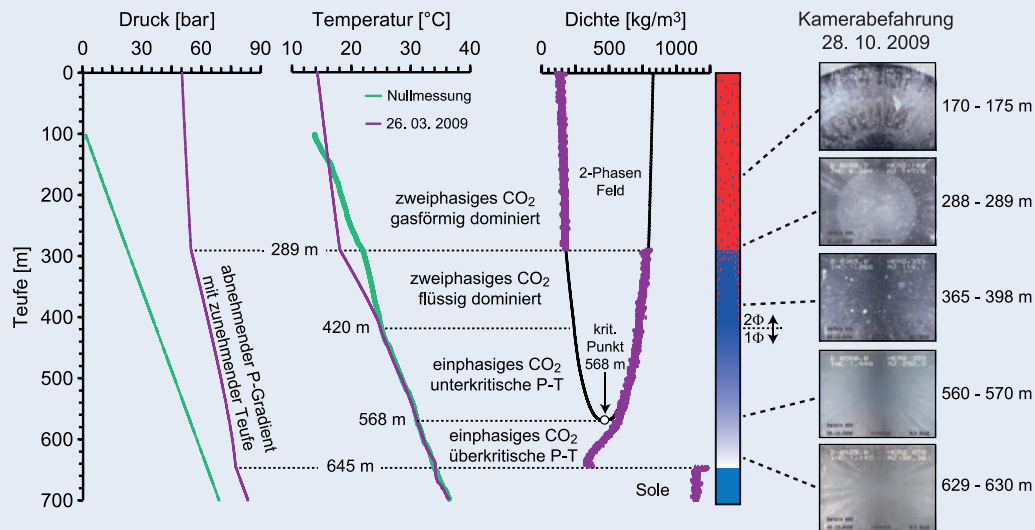


Abb. 5: P-T-Profil der Bohrung Ktzi 200 für die Nullmessung vor Beginn der Injektion sowie eine Loggingkampagne im März 2009 (links), die aus den Daten der Loggingkampagne abgeleiteten Phasenzustände in der Bohrung (Mitte) sowie Ergebnisse der Kamerabefahrung der Ktzi 200 (rechts)

Fig. 5: P-T profiles of well Ktzi 200 for the baseline prior to injection and a logging campaign from March 2009 (left), the fluid phase conditions in the well deduced from the logging data (middle), and results from the camera inspection of Ktzi 200 (right)

Zusammenfassung und Ausblick

Die intelligenten Tiefbohrungen am Pilotstandort zur CO₂-Speicherung in Ketzin haben zentrale wissenschaftliche und operative Überwachungsdaten geliefert. Mit Hilfe der fest eingebauten Sensoren und Messsysteme war es möglich, die Ausbreitung und das Verhalten des CO₂ im Untergrund mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung abzubilden. Für die CO₂-Speicherung auf industrieller Skala, aber auch für andere Speichertechnologien, müssen diese Ansätze erweitert werden, um auch für großräumige Speicheranwendungen verlässliche Monitoringsysteme aufzubauen. Hier wird eine Kombination verschiedener permanenter und periodischer Überwachungsmethoden erforderlich sein, um eine maßgeschneiderte Lösung für den jeweiligen Speicherstandort zu finden. Intelligente Verrohrungen sind ein direktes Fenster zu den Speichern und bieten auch für industrielle Speicherstandorte das Potenzial, bei vergleichsweise geringem logistischem Aufwand zentrale Überwachungsparameter in oder nahe Echtzeit aufzuzeichnen und so zeitnah datenbasierte operative Entscheidungen zu treffen. Aufgrund ihrer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung können intelligente Bohrungen auch als Frühwarnsysteme in Speicherbereichen eingesetzt werden, in denen die geologische Exploration ein erhöhtes Leckagerisiko ergeben hat. Die Übertragung der am Standort Ketzin gewonnenen Erkenntnisse auf eine industrielle CO₂-Speicherung und andere Nutzungen des geologischen Untergrunds sowie die Weiterentwicklung intelligenter Monitoringsysteme sind zwei zentrale Herausforderungen des „Zentrums für Geologische Speicherung“ am GFZ.

Literatur

- Bergmann, P., Schmidt-Hattenberger, C., Kiessling, D., Rücker, C., Labitzke, T., Henningses, J., Baumann, G., Schütt, H. (2012): Surface-downhole electrical resistivity tomography applied to monitoring of the CO₂ storage Ketzin (Germany). - *Geophysics*, 77, 6, B 253-B 267. DOI: <http://doi.org/10.1190/GEO2011-0515.1>
- Henningses, J., Liebscher, A., Bannach, A., Brandt, W., Hurter, S., Köhler, S., Möller, F., CO₂SINK Group (2011): P-T-rho and two-phase fluid conditions with inverted density profile in observation wells at the CO₂ storage site at Ketzin (Germany). - *Energy Procedia*, 4, 6085-6090. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.614>
- Liebscher, A., Martens, S., Möller, F., Kühn, M. (2013 a): On-shore CO₂ storage at the Ketzin pilot site in Germany. - In: Gluyas, J., Mathias, S. (Eds.), *Geological storage of carbon dioxide (CO₂): geoscience, technologies, environmental aspects and legal frameworks*, (Woodhead publishing series in energy; 54), Oxford [u.a.]: Woodhead Publishing, 278-300.
- Liebscher, A., Möller, F., Bannach, A., Köhler, S., Wiebach, J., Schmidt-Hattenberger, C., Weiner, M., Pretschner, C., Ebert, K., Zemke, J. (2013 b): Injection operation and operational pressure-temperature monitoring at the CO₂ storage pilot site Ketzin, Germany - Design, results, recommendations. - *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 15, 163-173. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.02.019>
- Prevedel, B., Wohlgemuth, L., Legarth, B., Henningses, J., Schütt, H., Schmidt-Hattenberger, C., Norden, B., Förster, A., Hurter, S. (2009): The CO₂SINK boreholes for geological CO₂-storage testing. - *Energy Procedia*, 1, 1, 2087-2094. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.272>
- Wiese, B., Nimtz, M., Möller, F., Otto, C., Kühn, M., Liebscher, A., Schmidt-Hattenberger, C. (2012): Determination of thermodynamics in a CO₂ injection well using pressure and distributed temperature sensing, (IAHS publication; 355), *ModelCare 2011 - Models - Repositories of Knowledge* (Leipzig 2011) (Wallingford), 286-290