

Geologische CO₂-Speicherung am Pilotstandort in Ketzin – sicher und verlässlich

Michael Kühn, Thomas Kempka, Axel Liebscher, Stefan Lüth, Sonja Martens, Cornelia Schmidt-Hattenberger
Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam

In the context of climate policy, the storage of carbon dioxide (CO₂) in deep geological formations is seen as a potential means to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions and mitigate respective global warming effects. However, residents living near possible storage sites are concerned about this technology: Is it feasible to store CO₂ safely and on the long term without endangering humans or the environment? Science and technology can provide answers to this question. In this context the GFZ driven experimental pilot site at Ketzin demonstrates the safe and reliable injection of CO₂ into a saline aquifer on the research scale. The work carried out so far has fostered the development and evaluation of monitoring technology which can serve as the basis for management rules and safety standards and emphasize the general geological feasibility of the technology. A central question for further research is to determine which storage capacities can be realized while adhering to the required standards and termination criteria for each individual storage location.



Grundlagen der CO₂-Speicherung

Die Nutzung fossiler Rohstoffe zur Energiegewinnung und für industrielle Prozesse der Stahl-, Zement- und Chemieindustrie setzen große Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre frei. Hier greift der Mensch in den globalen Kohlenstoffkreislauf ein. Dies gilt als eine wesentliche Ursache der seit Beginn der Industrialisierung beobachteten Klimaveränderung. Unter dem Kohlenstoffkreislauf versteht man Umwandlungs- und Transportprozesse kohlenstoffhaltiger Verbindungen auf lokaler, regionaler oder auch globaler Ebene. Die Kenntnis dieses Kreislaufs einschließlich seiner Teilprozesse bildet eine grundlegende Voraussetzung, um die Auswirkungen des vom Menschen verursachten Anteils an der globalen Klimaänderung abschätzen und darauf angemessen reagieren zu können. Der jährliche Ausstoß von fast 30 Gigatonnen (1 Gt = 1 Milliarde Tonnen) CO₂ in die Atmosphäre entspricht einer Kohlenstoffmenge von ungefähr 8 Gt. Der Vergleich mit der Gesamtmenge von 800 Gt Kohlenstoff in der Atmosphäre verdeutlicht die Dimension des anthropogenen Einflusses auf den globalen Kohlenstoffhaushalt (Kühn, 2011).

Eine zentrale gesellschaftliche Aufgabe ist es daher, die CO₂-Emissionen in die Atmosphäre zu reduzieren. Drei Handlungsoptionen können dabei unterschieden werden: i) Der Wechsel zu CO₂-freien bzw. -armen, alternative Energiequellen, ii) die Reduzierung des Energiebedarfs sowie iii) die Abscheidung des CO₂ aus den industriellen Prozessen mit anschließender langfristiger, sicherer Speicherung in geologischen Strukturen des Untergrunds.

Um das in Industrieprozessen abgetrennte CO₂ in klimarelevanten Mengen und langfristig sicher in den Untergrund einzubringen und zu speichern, eignen sich als Speicherraum vor allem poröse Gesteine. Die wichtigsten Speicheroptionen sind dabei:

- 1) Tiefe, Salzwasser führende Grundwasserleiter (saline Aquifere)
- 2) Fast erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, aus denen mit Hilfe des eingebrachten CO₂ noch zusätzliche Mengen Erdöl bzw. Erdgas gefördert werden können; diese Methoden werden als „Enhanced Oil Recovery“ (EOR) bzw. „Enhanced Gas Recovery“ (EGR) bezeichnet.
- 3) Erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten; sie bieten Raum für die Einlagerung von CO₂.

Nach aktuellen Schätzungen liegen die Speicherkapazitäten in Deutschland in salinen Aquiferen zwischen 6 Gt und 12 Gt (Knopf et al., 2010) und 2,5 Gt in leergeförderten Erdgaslagerstätten (May et al., 2003). Alle anderen Optionen spielen hier nur eine untergeordnete Rolle. Die international zur Verfügung stehenden Speicherkapazitäten können nur grob abgeschätzt werden und liegen z. B. für saline Aquifere im Bereich von 2000 Gt bis 11 000 Gt CO₂ und maximal 900 Gt für erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten (IPCC, 2005). Trotz der großen Ungenauigkeit dieser Abschätzungen zeigen die Werte, dass saline Aquifere sowohl national als auch international die größten Speicherkapazitäten aufweisen. Angesichts der jährlichen Emissionen von mehr als 30 Gt CO₂ weltweit ist ein möglicher klimarelevanter Effekt der CO₂-Speicherung deshalb nur zu erzielen, wenn eine CO₂-Speicherung in salinen Aquiferen sicher und nachhaltig umgesetzt werden kann. Diese CO₂-Speicherung in salinen Aquiferen zu untersuchen und die wissenschaftlichen Voraussetzungen für ihre Umsetzung zu schaffen, ist ein zentraler Forschungsauftrag des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ.

Eine geeignete Speicherstätte erfordert ein Speichergestein, das durch mindestens eine darüber liegende für das CO₂ undurchlässige Deckschicht abgeschlossen wird. Die Deckschicht hält das CO₂ zurück, das aufgrund seiner im Vergleich zum Formationswasser geringeren Dichte aufsteigt. Bei den potenziellen Speichergesteinen handelt es sich im Wesentlichen um Sandsteine mit ausreichender Porosität und Permeabilität, die hohe CO₂-Aufnahmeraten erwarten lassen. Das CO₂ wird über Bohrungen mit Pumpen als dichtes Fluid unter Druck in das Gestein injiziert. Die Injektion von CO₂ erhöht den Porenfluiddruck in der Speicherstätte, da der durch das Gestein dem CO₂-Strom entgegengebrachte Fließwiderstand, je nach Permeabilität des Gesteins, überwunden werden muss. Die Überwachung dieser Druckerhöhung ist eine der zentralen Aufgaben beim Betrieb eines CO₂-Speichers. So kann sichergestellt werden, dass es nicht zu einer Schädigung des Reservoir- oder Deckgesteins oder aber zu einer Reaktivierung vorhandener Störungen kommt. Die verschiedenen Prozesse, die nach Einbringen des CO₂ in das Speichergestein zu berücksichtigen sind, werden in unterschiedlichen Zeiträumen wirksam. Auf der kürzesten Zeitskala von Jahren, während der Injektion und direkt danach, steigt das eingebrachte CO₂ nach oben, weil seine Dichte geringer ist als die des umgebenden Porenwassers. Das aufgestiegene CO₂ sammelt sich unterhalb des undurchlässigen Deckgesteins, das häufig aus Ton- bzw. Salzgestein besteht. Über viele Jahrzehnte hinweg wird das CO₂ aufgrund der sehr engen Porenquerschnitte und der damit einhergehenden hohen Kapillarkräfte in diesen Gesteinen zurückgehalten und kann trotz der Dichtedifferenz zum Umgebungswasser nicht weiter aufsteigen. Das Gas kann nur dann

Tag der offenen Tür am Pilotstandort Ketzin, 19. Mai 2011

Open House at the pilot site Ketzin, May 19, 2011



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

wieder durch andere Fluide verdrängt werden, wenn diese unter erhöhtem Druck in die Speicherformation einströmen. Unabhängig davon wird sich immer ein Teil des gespeicherten CO₂ in Wasser lösen und zur Bildung von Kohlensäure führen. Auf einer Zeitskala von tausend Jahren werden Anteile des CO₂ durch den Prozess der Karbonatisierung in mineralischer Form gebunden. Durch diese auch unter natürlichen Bedingungen ablaufende Mineralisierung zu Karbonaten ist das CO₂ dauerhaft gebunden. Durch diese Prozesse wird das CO₂ über lange Zeiträume hinweg immer fester an das Gestein gebunden und damit dauerhaft und sicher gespeichert.

Wie sicher ist die geologische CO₂-Speicherung für Mensch und Umwelt?

Das CO₂ wird unterhalb eines undurchlässigen Deckgesteins in die Speicherformation eingebracht. Eine notwendige Forderung an zukünftige Speicher ist die Existenz eines sogenannten Multibarrierensystems, das sich durch weitere potenzielle Speicher- und Deckgesteine oberhalb des Speicherkomplexes auszeichnet (Abb. 1). Sowohl aktive als auch stillgelegte Boh-

rungen können Migrationswege sein, weil sie erstens eine direkte Verbindung zwischen der Erdoberfläche und dem Speicher darstellen und zweitens künstliche Materialien enthalten (Verrohrung und Zementierung), die langfristig korrodieren können. Außer den Bohrungen gibt es auch potenzielle natürliche Leckagewege entlang von Klüften oder Störungen.

Ein weiterer Effekt der CO₂-Einbringung ist die Salzwaterverlagerung. Das in das Speichergestein eingebrachte CO₂ verdrängt das im Porenraum befindliche Salzwater. Es muss daher für jeden potenziellen Standort sichergestellt werden, dass das Salzwater nicht über Migrationspfade in die potenziellen Trinkwaterreservoirs der flachen Grundwaterleiter gelangt und dort das Trinkwater kontaminiert.

Um die Sicherheit der geologischen CO₂-Speicherung zum jetzigen Zeitpunkt abzuschätzen, werden u.a. zwei Analoga herangezogen: Zum einen handelt es sich um Erfahrungen mit natürlichen CO₂-Lagerstätten bzw. -quellen und zum anderen um Standorte, an denen Gasspeicherung in porösen Gesteinen bereits seit Jahrzehnten und in großem Umfang durchgeführt wird. Die unterirdische, geologische Speicherung von CO₂ ist

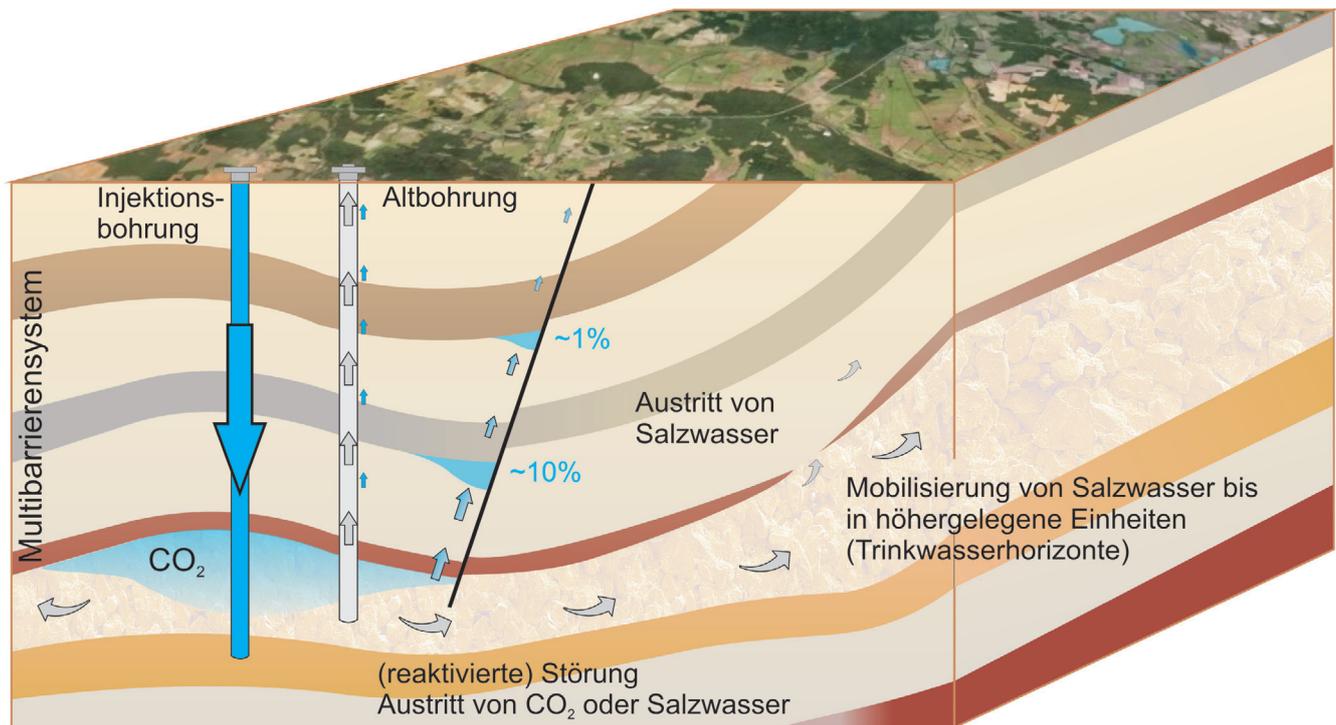


Abb. 1: Prinzip der geologischen CO₂-Speicherung mit einem Multibarrierensystem. Dargestellt sind außerdem potenzielle anthropogene und natürliche Leckagewege für das CO₂. Es handelt sich dabei um aktive als auch bereits stillgelegte Bohrungen. Leckagewege natürlichen Ursprungs können entlang von Klüften und Störungen im Gestein existieren. Darüber hinaus ist der Prozess der ggf. auftretenden Salzwaterverlagerung abgebildet.

Fig. 1: Schematic of CO₂ storage with multibarrier system. Potential leakage pathways are given. These could be anthropogenic, active and abandoned wells, as well as natural conduits like fractures and faults. Furthermore saltwater displacement is displayed as process to be assessed prior to injection

ein natürliches Phänomen. Weltweit gibt es schon seit Tausenden bis Millionen von Jahren natürliche CO₂-Lagerstätten. Diese natürlichen Speicherstätten belegen, dass Speichergesteine CO₂ für geologisch lange Zeiträume aufnehmen und Deckgesteine dieses effizient zurückhalten können. Neben der natürlichen Speicherung liefert auch die Gasspeichertechnik Erkenntnisse für eine geologische CO₂-Speicherung. Die Technik zur Speicherung großer Erdgasmengen in tiefen unterirdischen Gesteinsformationen zum Ausgleich von saisonalen Bedarfsschwankungen hat sich für Deutschland seit Jahrzehnten im Rahmen der Erdgasversorgung bewährt.

Die beiden angeführten Analoga machen einerseits deutlich, dass CO₂ langfristig in den Speichergesteinen verbleibt und dass es andererseits möglich ist, die Verfahren technisch zu beherrschen und sicher zu betreiben. Trotzdem müssen die Sicherheitsrisiken einer CO₂-Speicherung individuell für jede Speicherstätte vor Beginn der eigentlichen Injektion durch umfangreiche und detaillierte Erkundungsmaßnahmen untersucht werden. Eine generalisierbare Sicherheitseinschätzung ist aufgrund der gegebenen Variabilitäten des geologischen Untergrunds nicht möglich. Alle CO₂-Speicherstätten müssen aus betrieblichen, sicherheits- und umwelttechnischen sowie gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Gründen überwacht werden. Dies stellt sicher, dass das Hauptziel einer langfristig sicheren geologischen Speicherung von CO₂ erreicht wird.

Technologien zur Reservoirüberwachung

Bei der Reservoirüberwachung wird die Ausbreitung des CO₂ im Untergrund sowohl qualitativ als auch quantitativ überwacht sowie eventuelle Leckagen detektiert und idealerweise auch quantifiziert. Für die Reservoirüberwachung kommen verschiedene geophysikalische Methoden wie Seismik und Geoelektrik in Betracht. Da diese Methoden spezifische Vor- und Nachteile haben, ist eine sinnvolle Reservoirüberwachung nur mit einer Kombination unterschiedlicher Methoden möglich. Welche Kombination dabei den Anforderungen einer spezifischen Speicherlokalität am besten gerecht wird, muss individuell untersucht und entschieden werden.

Alle geophysikalischen Methoden beruhen auf der Messung physikalischer Parameter, die durch die Injektion von CO₂ verändert werden. Wird im Untergrund das initiale Formationswasser im Porenraum der Gesteine durch CO₂ ersetzt, ändern sich u. a. Schallgeschwindigkeit, Dichte und elektrische Leitfähigkeit des Gesamtsystems Gestein/Formationswasser/CO₂. Daher kann das injizierte CO₂ mit geophysikalischen Methoden nicht direkt nachgewiesen werden, sondern ausschließlich indirekt über beobachtete Änderungen spezifischer physikalischer Parameter. Aus diesem Grund benötigen

geophysikalische Methoden vor allem eine Nullmessung, die den initialen Zustand vor Beginn der CO₂-Injektion darstellt. In regelmäßigen Abständen durchgeführte Wiederholungsmessungen nach Beginn der Injektion erlauben dann, die durch die CO₂-Injektion bedingten Veränderungen im Vergleich zur Nullmessung zu detektieren.

Geochemische Methoden sind die einzige Möglichkeit, CO₂ direkt im Reservoir nachzuweisen. Hierzu werden die Reservoirfluide (salines Formationswasser, injiziertes CO₂) in Beobachtungsbohrungen beprobt und anschließend an der Oberfläche analysiert. Die Fluide werden dabei auf ihre Gaszusammensetzung, ihre anorganische und organische Zusammensetzung sowie ihre Isotopensignatur geprüft. Neben der Überwachung der Reservoirfluide sowie Fluiden in flachen, im ersten oberhalb des Speichersystems befindlichen Aquifer, kann eine chemische Überwachung des Oberbodens durchgeführt werden.

Die numerische Reservoirsimulation stellt eine zentrale Methode zur Beurteilung und Vorhersage der Sicherheit einer Speicherlokalität sowie der langfristigen Ausbreitung des injizierten CO₂ dar. Im Vorfeld der Speicherung sind numerische Simulationen in Verbindung mit einem geologischen Modell die einzige Möglichkeit, sicherheitsrelevante Aspekte einer Speicherlokalität zu charakterisieren. Im Verlauf der Speicherung werden diese Modelle anhand der Ergebnisse der verschiedenen Überwachungsmethoden validiert und gegebenenfalls weiter optimiert. Ziel ist die Entwicklung numerischer Modelle, welche die Ergebnisse der Überwachungsmethoden reproduzieren („history-matching“-Methode). Basierend auf den so evaluierten Modellen wird die Ausbreitung des injizierten CO₂ während, aber auch nach Beendigung der Injektion prognostiziert. Diese Vorhersagen wiederum erlauben, das Überwachungskonzept an neue Gegebenheiten anzupassen.

Pilotstandort Ketzin

Die unterirdische, geologische Speicherung von CO₂ wird nahe der Stadt Ketzin/Havel im Westen Berlins durch das GFZ in Kooperation mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie in einem praktischen Feldversuch untersucht (Abb. 2). Für die geologische CO₂-Speicherung wurden im Jahr 2007 drei neue Bohrungen bis in eine Tiefe von jeweils etwa 800 m niedergebracht (Prevedel et al. 2009). Eine dieser Bohrungen (Ktzi 201) dient zur Injektion und Beobachtung des CO₂, die beiden anderen (Ktzi 200 und Ktzi 202) werden ausschließlich zur Beobachtung der Injektion und der CO₂-Ausbreitung genutzt. Der international einmalige Versuchs- und Erprobungsstandort Ketzin umfasst alle Stadien eines Speicherstandorts: die Vorerkundung, den Aufbau der Infrastruktur, das Erstellen der Bohrungen, die CO₂-Injektion, die Reservoirüberwachung, die numerische Modellierung, begleitende Laborarbeiten sowie die Öffentlichkeitsarbeit (Abb. 4). Dabei werden standortspezifische und standortunabhängige Fragestellungen zur

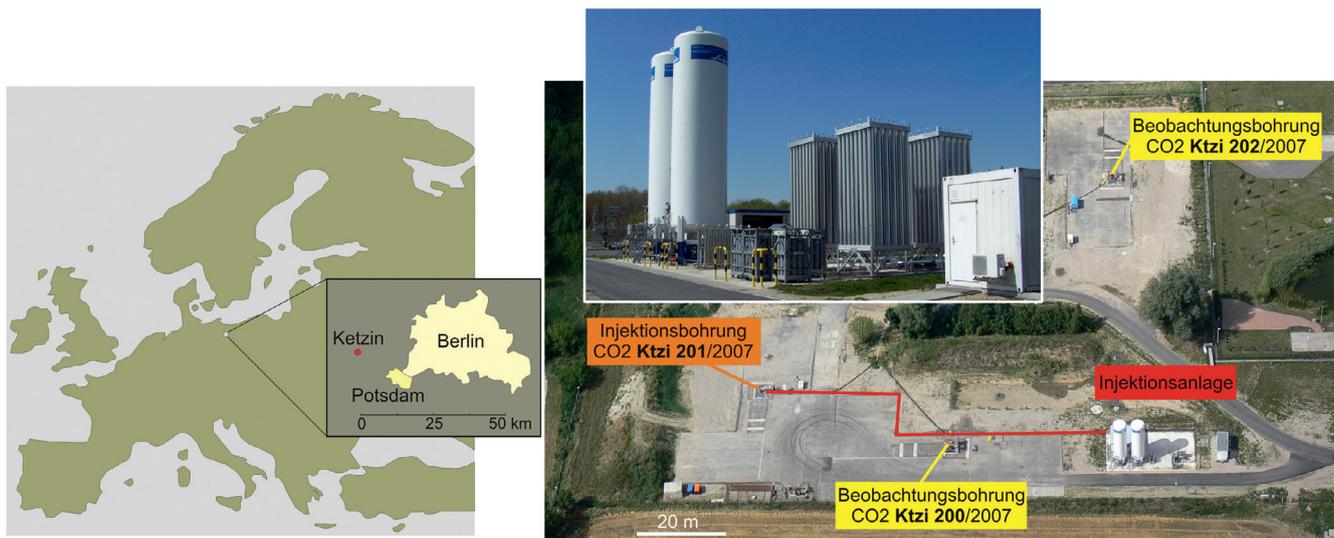


Abb. 2: Pilotstandort zur geologischen CO₂-Speicherung im Havelländischen Ketzin bei Berlin und Potsdam (links); Luftbild des Standorts mit Injektionsanlage und Bohrungen (rechts)

Fig. 2: Ketzin pilot site for the geological storage of CO₂, near Berlin and Potsdam (left). Aerial view of the site showing the injection facility and wells (right)

geowissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Forschung behandelt. Der Schwerpunkt der Arbeiten in Ketzin liegt auf der Reservoirüberwachung.

Die geologischen Zielhorizonte für die CO₂-Speicherung am Standort Ketzin sind poröse Sandsteinschichten in 620 m bis 650 m Tiefe (Förster et al. 2006). Die Speichersandsteine werden von rund 240 m mächtigen abdichtenden Tonsteinen überlagert. Seit Juni 2008 wird am Standort Ketzin lebensmittelreines CO₂ über die Injektionsbohrung in den Untergrund eingespeist; bis November 2011 sind insgesamt etwa 55 000 Tonnen CO₂ eingelagert worden. Das wissenschaftliche Begleitprogramm ist vor allem auf die Entwicklung und die Nutzung von Überwachungsmethoden fokussiert (Schilling et al. 2009, Würdemann et al. 2010). Es werden geophysikalische und geochemische Messungen in der Injektionsbohrung und den zwei Beobachtungsbohrungen durchgeführt. Die Untersuchung der CO₂-Ausbreitung erfolgt mit seismischen und geoelektrischen Methoden von der Erdoberfläche aus. Es werden theoretische Vorhersagemodelle eingesetzt, mit deren Hilfe die unterirdische Ausbreitung des CO₂ abgeschätzt und vorhergesagt und die Dichtigkeit sowie Sicherheit des Reservoirs beurteilt werden können.

Verlässliche CO₂-Injektion in Ketzin

Der Injektionsprozess in Ketzin verläuft sicher und verlässlich seit Juni 2008 (Martens et al., 2011). Die Aufnahmefähigkeit des porösen Sandsteins ist so hoch, dass der von der Bergbehörde genehmigte maximale Verpressdruck zu jeder Zeit unterschritten wurde. Auf Basis der gewonnenen Felddaten und der im Labor bestimmten Gesteinsparameter wird mit Hilfe der numerischen Simulationsprogramme der Injektionsprozess und die Ausbreitung des CO₂ im Reservoir nachvollzogen sowie die Sensitivität bezüglich der Heterogenität der hydraulischen Parameter untersucht.

Die wissenschaftlichen Erfahrungen am Standort Ketzin beruhen insbesondere auf einem geochemischen und geophysikalischen Überwachungsprogramm (Giese et al. 2009), das im internationalen Vergleich zum Modernsten und Umfangreichsten zählt. Einzigartig ist hierbei nicht nur die Kombination verschiedener Methoden wie Geoelektrik, Seismik, Temperatur- und Drucküberwachung sowie Fluid- und Gasbeprobung, sondern auch die Kombination unterschiedlicher Messanordnungen mit einem unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Auflösungsvermögen innerhalb der einzelnen Methoden. Diese Kombination hat eine erfolgreiche und für zukünftige Projekte vielversprechende Tomographie des Untergrunds ermöglicht. Mit Hilfe der oben aufgeführten Messverfahren lässt sich die Ausbreitung des Kohlenstoffdioxids im Untergrund gut abbilden bzw. nachvollziehen (Abb. 5).

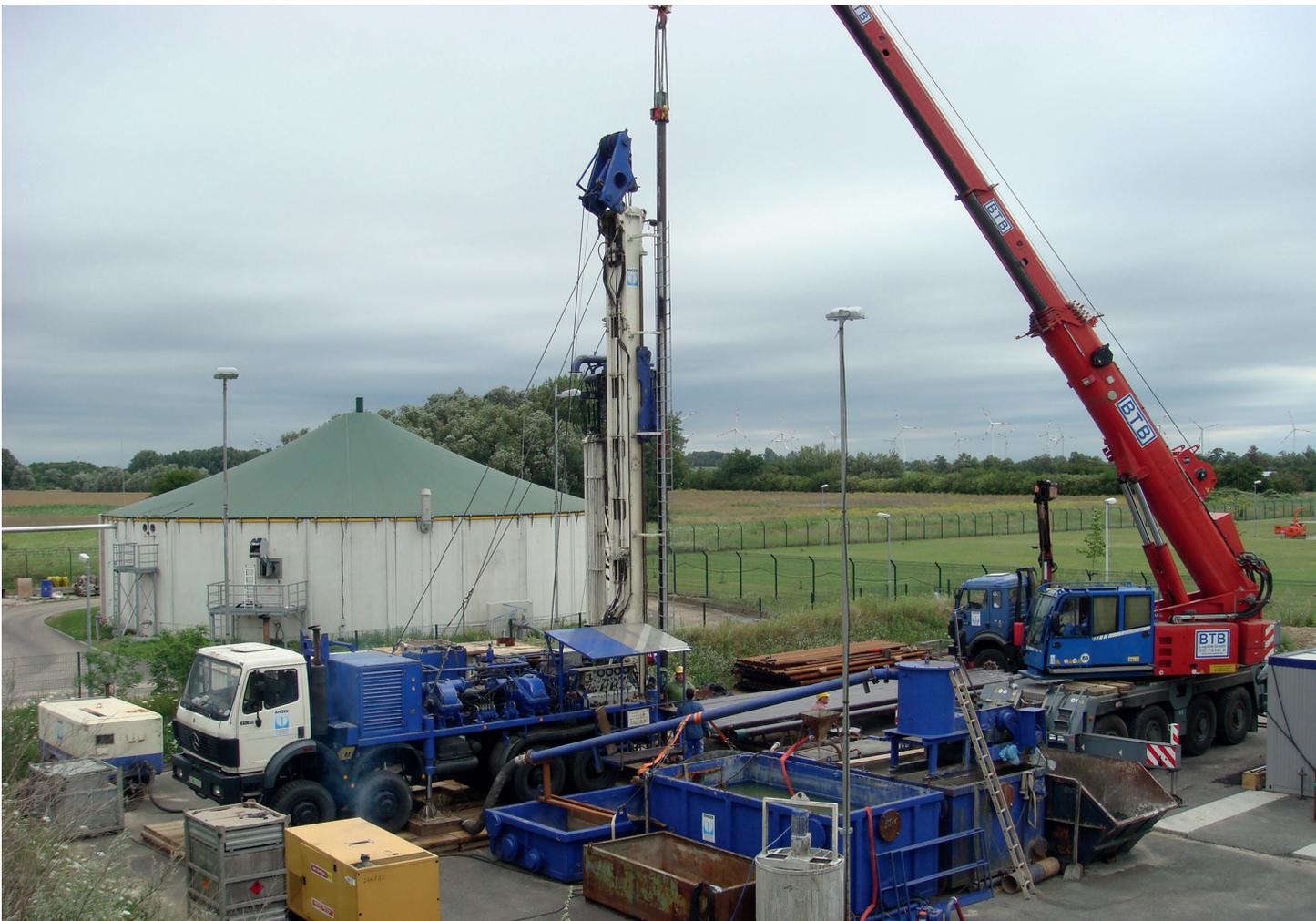


Abb. 3: Bohrarbeiten für die Pegelbohrung am Pilotstandort Ketzin, Juli 2011

Fig. 3: Drilling of shallow observation well at the pilot site Ketzin, July 2011

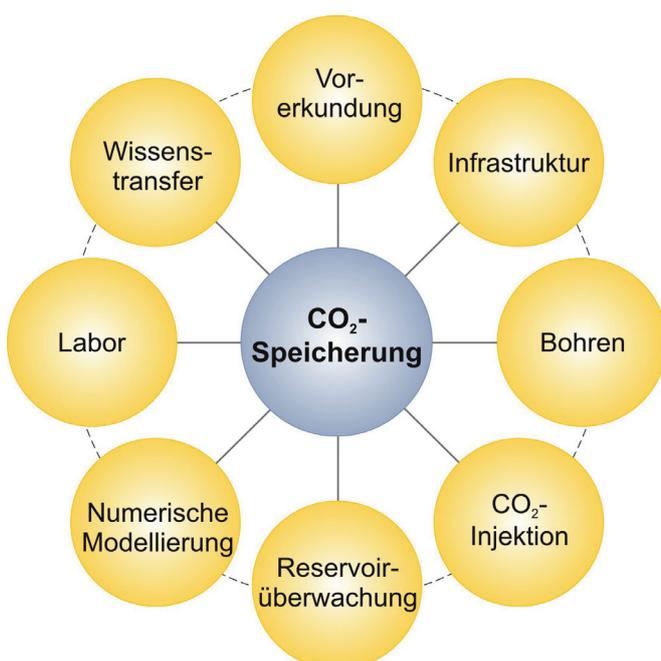


Abb. 4: Ketzin umfasst alle Stadien eines Speicherstandorts.

Fig. 4: Ketzin covers all aspects of a storage site.

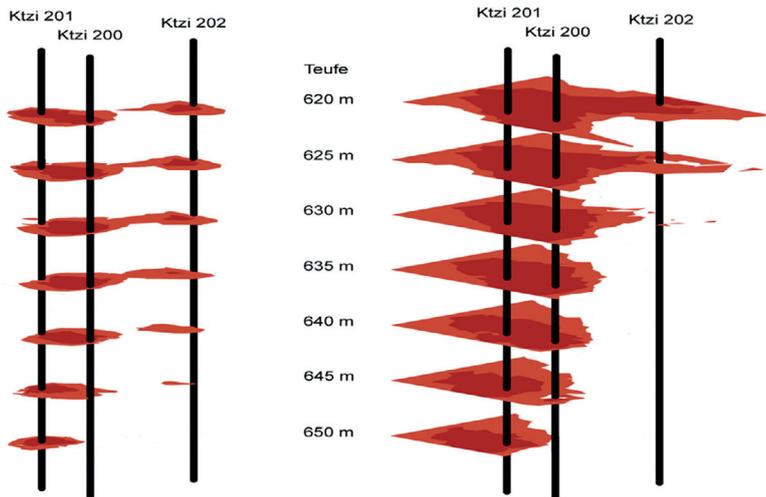
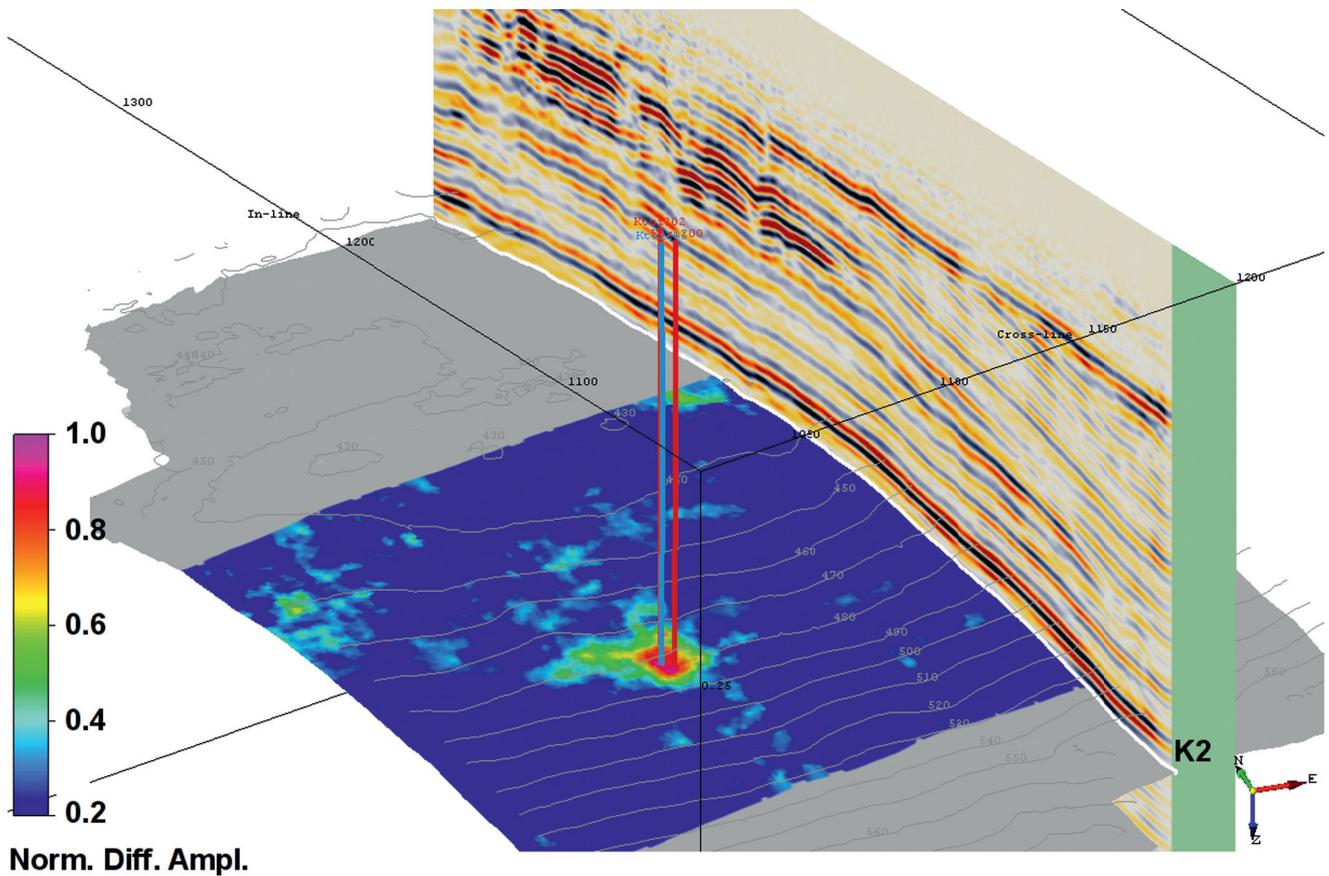


Abb. 5: Basierend auf dem Vergleich zwischen Nullmessung und Wiederholungsmessungen lässt sich die Ausbreitung des CO₂ im Untergrund mit Hilfe geophysikalischer Verfahren abbilden. Seismische Messungen in Ketzin (oben) zeigen die Veränderungen elastischer Eigenschaften des Gesteins, die durch den Eintrag von CO₂ entstehen (Oktober 2009; ca. 22 500 t CO₂ gespeichert). Geoelektrische Messungen (links) zeigen Veränderungen des spezifischen Widerstands des Gesteins aufgrund der CO₂-Injektion (November 2008; 4 500 t CO₂ und April 2009 13 500 t CO₂).

Fig. 5: Comparison of the geophysical base line and repeat measurements enables the visualization of CO₂ migration in the subsurface. Seismic measurements in Ketzin (above) display changes in the elastic properties of the rock due to CO₂ injection (October 2009; ca. 22 500 t CO₂ stored). Geoelectric measurements (left) outline changes in the specific resistivity of the rocks as a result of the CO₂ (November 2008; 4 500 t CO₂ and April 2009; 13 500 t CO₂).

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Mensch greift über stetig steigende anthropogen verursachte CO₂-Emissionen wesentlich in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Erde ein. Im Rahmen der Klimapolitik wird daher die Lagerung von CO₂ in tiefen Gesteinsschichten erwogen. Die Senken, in denen es langfristig gespeichert werden soll, sind tiefe, salzwasserführende Grundwasserleiter. Oberhalb der porösen Sandsteinspeicher, in die das CO₂ eingebracht wird, muss eine Deckschicht das aufsteigende Gas zurückhalten. Mit der Zeit werden wesentliche Teile des CO₂ kapillar im Porenraum gebunden, als Kohlensäure im Wasser gelöst bzw. zu Karbonaten mineralisiert. Durch umfangreich eingesetzte Überwachungsmethoden muss eine Gefährdung für Mensch und Umwelt bei dieser neuen Technologie ausgeschlossen werden. Dazu ist auch eine intensive, lokations-spezifische Voruntersuchung möglicher Leckagewege eine wichtige Voraussetzung.

Am Beispiel des vom GFZ betriebenen Pilotstandorts Ketzin kann belegt werden, dass die geologische CO₂-Speicherung im Forschungsmaßstab sicher und verlässlich durchführbar ist. Auch eine zuverlässige Überwachung einer Speicherstätte ist möglich. Die zentrale Frage für die nahe Zukunft wird nun sein, wie groß in Deutschland die tatsächlich zu realisierende Speicherkapazität bei Einhaltung der zu fordernden Sicherheitsstandards sowie der für jede Speicherstätte individuell zu definierenden Abbruchkriterien sein wird.

Das eigentliche Anwendungsgebiet von CCS (Carbon Capture and Storage), insbesondere auch der geologischen Speicherung von CO₂, wird in den Ländern liegen, die auf längere Sicht weiter Kohle als Energiequelle nutzen werden. Die OECD geht von weiterhin steigendem Einsatz von Kohle in den nächsten Dekaden aus. Neben den USA sind die BRICS-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika) auch zukünftig als Kohlenutzer mit zunehmend wachsendem Verbrauch anzusehen. Die aus diesem Energiekonsum stammenden CO₂-Emissionen müssen deutlich minimiert werden. Dazu ist die geologische Speicherung von CO₂ ein mögliches Mittel.

Literatur

- Förster, A., Norden, B., Zinck-Jørgensen, K.; Frykman, P., Kulenkampff, J., Spangenberg, E., Erzinger, J., Zimmer, M., Kopp, J., Borm, G., Juhlin, C.-G., Cosma, C., Hurter, S. (2006): Baseline characterization of the CO₂SINK geological storage site at Ketzin, Germany. - *Environmental Geosciences* 133, 3, 145–161, 10.1306/eg.02080605016.
- Giese, R., Henniges, J., Lüth, S., Morozova, D., Schmidt-Hattenberger, C., Würdemann, H., Zimmer, M., Cosma, C., Juhlin, C., CO₂SINK Group (2009): Monitoring at the CO₂SINK Site: A concept integrating geophysics, geochemistry and microbiology. - *Energy Procedia* 1, 2251-2259, 10.1016/j.egypro.2009.01.293.
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H. C., Loos, M., Meyer, L. A. (Eds)(2005): IPCC (2005) IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds: B. Metz, O. Davidson, H.C. de Coninck, M. Loos, L.A. Meyer) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 Seiten.
- Knopf, S., May, F., Müller, C., Gerling, J.P (2010): Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen - *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 60, 4, 76-80.
- Kühn, M. (2011): CO₂-Speicherung: Chancen und Risiken. - *Chemie in unserer Zeit*. 45, 2, 126-138, 10.1002/ciuz.201100538.
- Martens, S., Liebscher, A., Möller, F., Würdemann, H., Schilling, F., Kühn, M., Ketzin Group (2011): Progress report on the first European on-shore CO₂ storage site at Ketzin (Germany) - Second year of injection. - *Energy Procedia*, 4, 3246-3253, 10.1016/j.egypro.2011.02.243.
- May, F., Brune, S., Gerling, J.P., Krull, P. (2003): Möglichkeiten zur untertägigen Speicherung von CO₂ in Deutschland: eine Bestandsaufnahme. - *Geotechnik*, 26, 3, 162-172.
- Prevedel, B., Wohlgemuth, L., Legarth, B., Henniges, 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, 10.1016/j.egypro.2009.01.272.
- Schilling, F. R., Borm, G., Würdemann, H., Möller, F., Kühn, M., CO₂SINK Group (2009): Status Report on the First European on-shore CO₂ Storage Site at Ketzin (Germany). - *Energy Procedia*, 1, 1, 2029-2035, 10.1016/j.egypro.2009.01.264.
- Würdemann, H., Möller, F., Kühn, M., Heidug, W., Christensen, N. P., Borm, G., Schilling, F. R. (2010): CO₂SINK-From site characterisation and risk assessment to monitoring and verification: One year of operational experience with the field laboratory for CO₂ storage at Ketzin, Germany. - *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 6, 938-951, 10.1016/j.ijggc.2010.08.010.