

Kühn:

Geologische CO₂-Speicherung – Erfahrungen vom Pilotstandort Ketzin (Brandenburg)

Geologische CO₂-Speicherung

Erfahrungen vom Pilotstandort Ketzin (Brandenburg)

**Dr. Michael Kühn, Leiter des Zentrums für CO₂-Speicherung,
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Deutschland**

Der Mensch greift durch seine Kohlendioxidemissionen wesentlich in den Kohlenstoffkreislauf der Erde ein. Im Rahmen der Klimapolitik wird daher die Lagerung von Kohlendioxid (CO₂) in tiefen Gesteinsschichten erwogen, mit einem noch zu bestätigenden Potenzial von 25 % an der vorgesehenen Gesamtreaktion. Die für Deutschland beziehungsweise die weltweit abgeschätzten Speicherkapazitäten könnten für einige Jahrzehnte ausreichend sein. Die Quellen, an denen CO₂ abgetrennt werden kann, finden sich in der Großindustrie (Energie, Stahl, Zement, Chemie). Die Senken, in denen es langfristig gespeichert werden soll, sind vor allem tiefe, salzwasserführende Grundwasserleiter. Der Pilotstandort Ketzin in Brandenburg ist das erste und bisher einzige aktive CO₂-Speicherprojekt in Deutschland. Seit Beginn der Einspeicherung im Juni 2008 wurden bis Februar 2012 mehr als 58.000 t CO₂ erfolgreich in Sandsteinhorizonte injiziert. Die Injektion von CO₂ wird von einem der weltweit umfangreichsten wissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsprogramme begleitet. Die Ergebnisse zeigen, dass: (i) die geologische Speicherung von CO₂ am Pilotstandort Ketzin sicher und verlässlich ist, ohne Gefährdung von Mensch und Umwelt, (ii) eine sinnvoll eingesetzte Kombination verschiedener geochemischer und geophysikalischer Überwachungsmethoden in der Lage ist, bereits kleinste Mengen CO₂ zu detektieren und ihre räumliche Ausdehnung abzubilden, (iii) die durch das injizierte CO₂ induzierten Wechselwirkungen zwischen Fluid und Gestein am Standort Ketzin keine signifikanten Auswirkungen haben und die Integrität der Speicher- und Deckgesteine nicht beeinflussen und (iv) numerische Simulationen das zeitliche und räumliche Verhalten des injizierten CO₂ wiedergeben können.

Geological storage of CO₂ – Experience from the pilot site Ketzin (Brandenburg): Anthropogenic emissions of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere have had a significant impact on the Earth's carbon cycle. As part of the global effort to reduce climate change, the geological storage of CO₂ has been accepted as a method that may provide up to 25 % of the total reduction of emissions, although this figure is still subject to change. In Germany and worldwide, geological storage capacities are expected to be sufficient for several decades. Carbon dioxide can be captured from sources such as large-scale industrial (energy, steel, cement or chemical) facilities and transported to long-term storage sites in deep saltwater-bearing aquifers. The Ketzin pilot site in Brandenburg was the first and is still the only active CO₂ storage project in Germany. Since start of injection of carbon dioxide in June 2008, more than 58,000 t CO₂ have been successfully injected into sandstone formations until February 2012. The injection of CO₂ is accompanied by one of the most comprehensive scientific research and development programs. The results show that i) geological storage of CO₂ at the Ketzin pilot site runs safely, reliably and without any risks for people and environment, ii) a meaningful combination of different geochemical and geophysical monitoring techniques is feasible to detect even small amounts of CO₂ and to image its spatial distribution, iii) fluid-rock interactions induced by the injected CO₂ have no significant effects at the Ketzin pilot site and do not affect the integrity of the reservoir and cap rock, and iv) numerical simulations are able to predict the timely and spatial behaviour of the injected CO₂.

Im Mittelpunkt der Forschung des Zentrums für CO₂-Speicherung am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ steht die Frage, ob eine langfristige und sichere Speicherung von Kohlendioxid im Untergrund möglich ist und damit CO₂-Emissionen in die Atmosphäre vermieden werden können. Dafür werden neue Technologien zur Überwachung der Speicherung in porösen Gesteinen im tiefen Untergrund entwickelt und getestet. Nahe der Ortschaft Ketzin/Havel in Brandenburg wird als Pilotstandort das erste kontinentale, europäische Feldlabor zur CO₂-Speicherung betrieben.

Unter dem Kohlenstoffzyklus oder -kreislauf versteht man chemische Umwandlungs- und Transportprozesse kohlenstoffhaltiger Verbindungen in den globalen Systemen Lithosphäre (Gesteine), Hydrosphäre (Wasser), Atmosphäre (Gase) und Biosphäre (Leben) sowie den Austausch dieser Verbindungen zwischen diesen

Geosphären. Der jährliche Eintrag von fast 30 Gt (30 Mrd. t) Kohlendioxid in die Atmosphäre [1] entspricht einer Kohlenstoffmenge von ungefähr 8 Gt. Der Vergleich mit der Gesamtmenge von 800 Gt Kohlenstoff in der Atmosphäre macht deutlich, dass es sich hierbei um einen wesentlichen anthropogenen Beitrag handelt, der das natürliche Gleichgewicht beeinflusst.

Die geologische CO₂-Speicherung ist neben der Einsparung von Energie, der Effizienzsteigerung sowie dem verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien eine wichtige Option im Portfolio der CO₂-Vermeidungsstrategien [2]. Trotz des verstärkten und notwendigen Ausbaus der erneuerbaren Energien gehen viele Experten davon aus, dass Kohle auch in der Zukunft einen erheblichen Anteil zum deutschen Energiemix beitragen wird. Die Kohleverstromung ist umweltverträglich jedoch nur möglich, wenn das CO₂, das beim Verbrennungsprozess entsteht, minimiert wird oder

erst gar nicht in die Atmosphäre gelangt. Neben der Energiewirtschaft sind auch die Zement- und Stahlindustrie sowie die Petrochemie wesentliche Emittenten von CO₂. Diese hier genannten großen Punktquellen sind zurzeit die einzigen Orte, die sich wirtschaftlich gesehen für die CO₂-Abscheidung eignen. Die Technologie der Wahl heißt auf Englisch „Carbon Capture and Storage“ (abgekürzt CCS) und bedeutet auf Deutsch Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂. Berechnungsszenarien zeigen, dass CCS mit circa 25 % (Bild 1) zur gesamten Emissionsreduktion beitragen könnte [3].

Bei der CO₂-Speicherung in geologischen Formationen muss man sich über mögliche Leckage- wege und die mit der Technologie verbundenen Risiken im Klaren sein und sicherstellen, dass keine Gefahr für Mensch oder Umwelt verursacht wird [4]. Dies erscheint handhabbar, speziell durch den Einsatz von modernen Überwachungssystemen wie am Pilotstandort Ketzin [5-8].

Erfahrungen vom Pilotstandort Ketzin

Die unterirdische, geologische Speicherung von CO₂ wird nahe der Stadt Ketzin/Havel im Westen Berlins erforscht. Die geologischen Zielhorizonte für die CO₂-Speicherung am Standort Ketzin sind poröse Sandsteinschichten in 630 bis 650 m Tiefe [9, 10]. Die Speichersandsteine werden von rund 240 m mächtigen abdichtenden Tonsteinen überlagert. Bis ins Jahr 2000 wurde am Standort Ketzin seit den 1960er-Jahren ein Untergrundspeicher für Erdgas in einer flachen Sandsteinformation in etwa 280 m Tiefe betrieben. Daher ist der

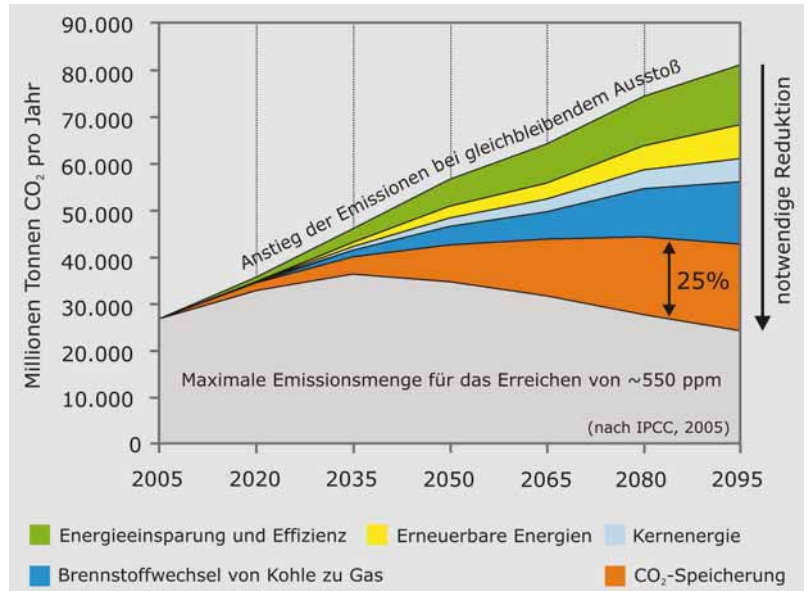
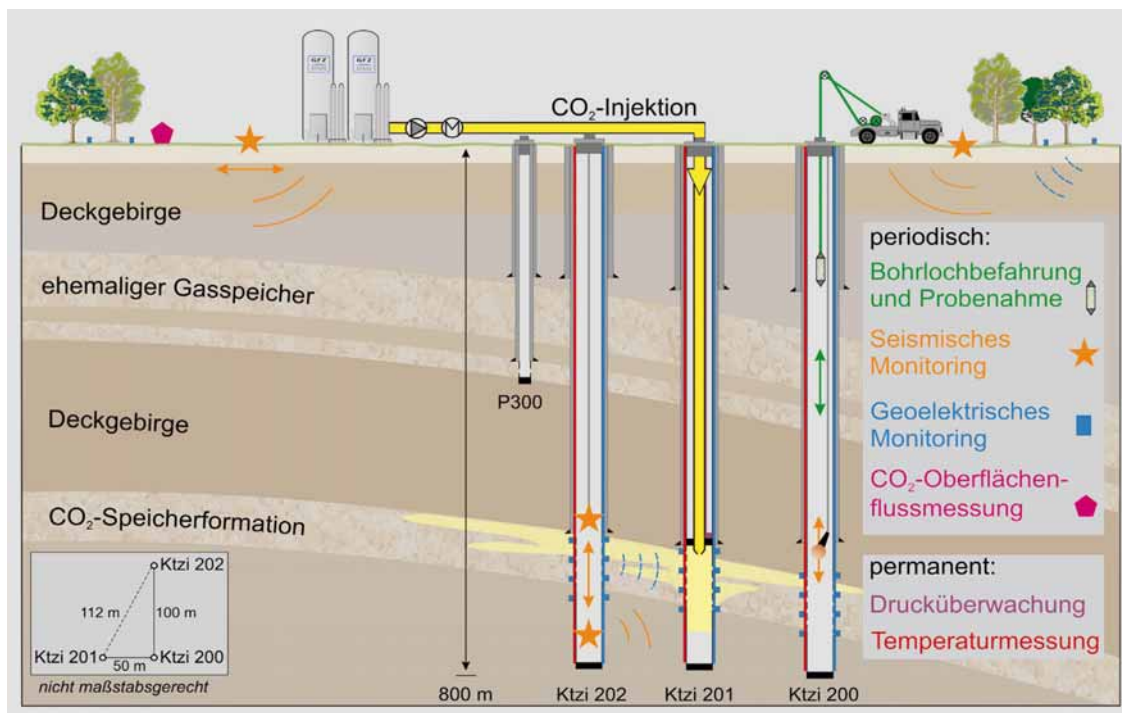


Bild 1. Berechnungen des IPCC zeigen [1], dass geologische CO₂-Speicherung neben anderen Klimaschutzoptionen einen wichtigen Beitrag zur Senkung der weltweiten CO₂-Emissionen und zur Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration unterhalb von 550 ppm leisten kann.

Standort gut untersucht. Basierend auf den Vorkenntnissen sowie ergänzend durchgeführten Erkundungsuntersuchungen wurden für die geologische CO₂-Speicherung im Jahr 2007 drei neue Bohrungen bis in eine Tiefe von jeweils etwa 800 m niedergebracht. 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 eingesetzt [11]. Im Sommer 2011 wurde der Pilotstandort um

Bild 2. Darstellung des Pilotstandorts Ketzin in einem schematischen Profilschnitt mit allen vier Bohrungen und mit einer Übersicht der geochemischen und geophysikalischen Überwachungsmethoden.



Kühn:

Geologische CO₂-Speicherung – Erfahrungen vom Pilotstandort Ketzin (Brandenburg)

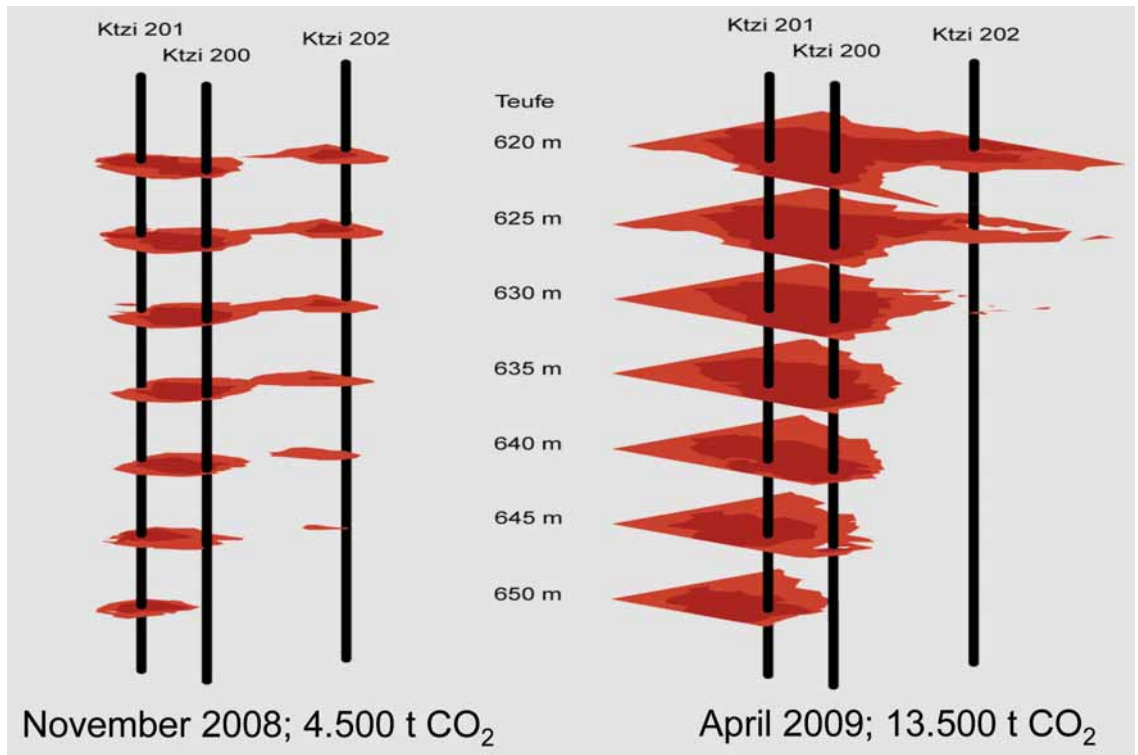


Bild 3. Bohrloch-Geolektrik erlaubt die tomografische Abbildung des CO₂ bereits mit Mengen von 4.500 bzw. 13.500 t CO₂.

eine weitere, 446 m tiefe Bohrung (P300) zur Beobachtung der geochemischen und hydrogeologischen Verhältnisse im ersten Grundwasserleiter oberhalb der Speicherformation ergänzt (Bild 2).

Speicherung von CO₂ verläuft sicher und verlässlich

Seit Juni 2008 wird am Standort Ketzin zumeist lebensmittelreines CO₂ über die Injektionsbohrung in den Untergrund eingespeist. Die Injektion verlief über den gesamten Zeitraum sicher

und verlässlich. Die Injektionsbedingungen am Injektionsbohrlochkopf betragen etwa 62 bar bei 35 °C. Das jeweilige Injektionsregime wird gemäß den wissenschaftlichen Aufgaben und Anforderungen festgelegt. Seit dem Beginn der Injektion am 30. Juni 2008 wurden bis Februar 2012 mehr als 58.000 t CO₂ injiziert [12].

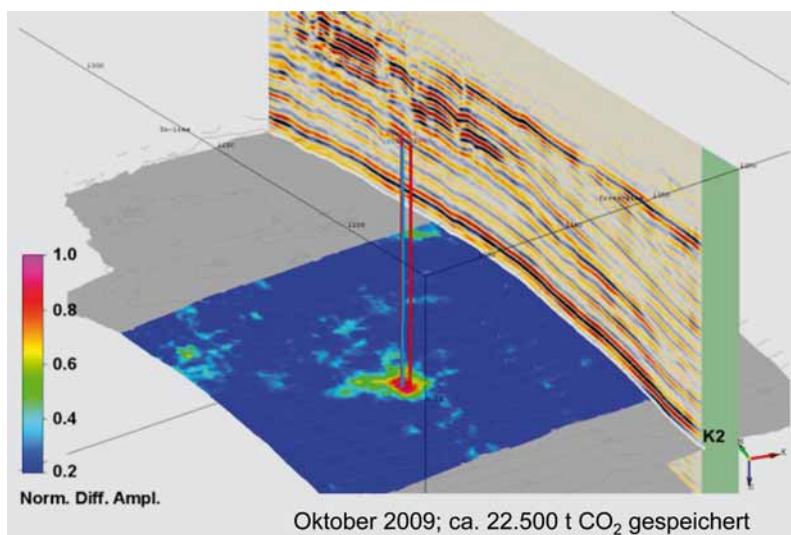
Im Rahmen der Injektion stieg der Lagerstätten- druck von ursprünglich 62 bar auf zunächst 76 bar an. Kontinuierliche Druckmessungen zeigen, dass sich seit Frühjahr 2009 stabile Druckbedingungen zwischen 72 und 76 bar in der Lagerstätte eingestellt haben [12]. Der vom brandenburgischen Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) im Eignungsnachweis definierte maximale Lagerstättendruck von 85 bar wurde zu keiner Zeit der Injektion erreicht oder gar überschritten. Insgesamt belegen die Messungen einen stabilen und zuverlässigen Speicherbetrieb.

Im Zeitraum vom 4. Mai bis zum 13. Juni 2011 wurde im Rahmen eines Experiments die Injektion von 1.515 t CO₂ aus dem Demonstrationskraftwerk in Schwarze Pumpe (Betreiber: Vattenfall) getestet. Das im Oxyfuel-Verfahren aus dem Kraftwerksprozess abgeschiedene CO₂ besaß zum Zeitpunkt der Injektion am Standort Ketzin eine Reinheit von > 99,7 %.

Kombination geochemischer und geophysikalischer Überwachungsmethoden zur Detektion kleinster Mengen CO₂

Am Pilotstandort in Ketzin stehen die Entwicklung, Erprobung und Anwendung geophysikali-

Bild 4: Ergebnis der ersten Wiederholungsmessung der 3D-Seismik nach der Injektion von etwa 22.000 t CO₂. Dargestellt sind die Änderungen der Reflexionsamplituden der seismischen Wellen an der Oberfläche des Speichers in etwa 630 m Teufe im Vergleich zur 3D-Nullmessung.



Oktober 2009; ca. 22.500 t CO₂ gespeichert

scher und geochemischer Überwachungsmethoden im Fokus. Sie sollen generelle Erkenntnisse zur Überwachung von CO₂-Speicherstätten erbringen, um so die Überwachung der räumlichen Ausdehnung des injizierten CO₂ im Untergrund zu gewährleisten. In diesem Rahmen wird am Standort Ketzin eines der weltweit umfangreichsten Überwachungsprogramme durchgeführt [13]. Es beinhaltet sowohl permanente Überwachungsmethoden wie Druck- und Temperaturmessungen [12] als auch periodische Methoden wie Oberflächenmessungen von CO₂-Flüssen in den Böden [14], Bohrlochmessungen [15], Tiefenprobenahmen [16], geoelektrische [17-19] sowie aktive und passive seismische Überwachungen [20-26].

Die Ergebnisse zeigen, insbesondere die der Geoelektrik und der Seismik, dass bereits sehr geringe Mengen CO₂ mit diesen Methoden im Untergrund abgebildet werden können. Bei der Geoelektrik sind dies mit Sicherheit 4.500 beziehungsweise 13.500 t CO₂ (Bild 3). Die Seismik zeigt die räumliche Ausdehnung des CO₂ bereits bei einer injizierten Menge von etwa 22.000 t CO₂ (Bild 4). Beide Methoden überzeugen durch eine gute Übereinstimmung ihrer Ergebnisse untereinander.

Wechselwirkungen zwischen Fluid und Gestein beeinflussten nicht die Integrität des Speichers

Sandsteinproben der Speicherformation wurden im Labor unter insitu Bedingungen (55 bar, 40 °C) mit CO₂ und Salzwasser behandelt. Zum Vergleich wurden Proben mit und ohne CO₂ im Kontakt mit Salzwasser untersucht. Insgesamt wird vor allem die Lösung von calciumreichen Plagioklasen, Kalifeldspat und Anhydrit beobachtet, während es auch zur Fällung von Albit kommt [27]. Die petrophysikalischen Eigenschaften der Sandsteinproben zeigen ebenfalls Veränderungen, wobei sich die Porosität leicht erhöht [28]. Die beobachteten chemischen Reaktionen finden aber nur in einem so geringen Maßstab statt, dass Reservoirgestein und Deckschicht nicht in ihrer Integrität gefährdet sind.

Numerische Simulationen geben das zeitliche und räumliche Verhalten des injizierten CO₂ wieder

Statische und dynamische Modellierungen ergänzen die Überwachungsmethoden am Standort Ketzin und unterstützen mithilfe von Prognosen die Betriebsführung. Dynamische Modellierungen sind die einzige Möglichkeit, das Langzeitverhalten eines Speichers auf der Grundlage der bekannten hydraulischen, thermischen, chemischen und mechanischen Prozesse zu prognostizieren [29-31].

Basierend auf den im bisherigen Verlauf des Injektionsbetriebs neu gewonnenen Erkenntnissen wurde und wird das zu Grunde liegende geologi-

sche Modell kontinuierlich weiterentwickelt und angepasst. Die auf Basis des geologischen Modells bisher durchgeführten numerischen Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Überwachungsmessungen. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die für den Standort abgeleiteten Prognosen für den weiteren Injektionsbetrieb verlässlich sind.

Quellenangaben

- [1] IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm (zugegriffen am 16.05.2012).
- [2] Stroink, L.; Gerling, J. P.; Kühn, M. und Schilling, F. R.: Die geologische Speicherung von CO₂ – Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven, Geotechnologien Science Report 2009, No. 14. Koordinierungsbüro Geotechnologien, Potsdam, 138 Seiten, (2009).
- [3] IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B.; Davidson, O.; de Coninck, H. C.; Loos, M.; Meyer, L. A. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 Seiten, (2005).
- [4] Kühn, M.: Chancen und Risiken – CO₂-Speicherung. Chemie in unserer Zeit. 45(2), 126-138. doi:10.1002/ciuz.201100538, (2011).
- [5] Martens, S.; Kempka, T.; Liebscher, A.; Lüth, S.; Möller, F. et al.: Europe's longest-operating on-shore CO₂ storage site at Ketzin, Germany: A Progress Report after Three Years of Injection. Environmental Earth Sciences, Online First, 25.04.2012, doi:10.1007/s12665-012-1672-5, (2012).
- [6] Martens, S.; Liebscher, A.; Möller, F.; Würdemann, H.; Schilling, F.; Kühn, M. and Ketzin Group: Progress Report on the First European on-shore CO₂ Storage Site at Ketzin (Germany) – Second year of injection. Energy Procedia, Volume 4, 2011, Pages 3246-3253, doi:10.1016/j.egypro.2011.02.243, (2011).
- [7] Würdemann, H.; Moeller, F.; Kühn, M.; Heidug, W.; Christensen, N.P.; Borm, G.; Schilling, F.R. and the CO₂ Sink Group: CO₂ SINK-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 Volume 4, Issue 6, December 2010, Pages 938-951. CO₂ Storage at the EGU General Assembly 2009. doi:10.1016/j.ijggc.2010.08.010, (2010).
- [8] Schilling, F.; Borm, G.; Würdemann, H.; Möller, F.; Kühn, M. and CO₂ SINK Group: Status Report on the First European on-shore CO₂ Storage Site at Ketzin (Germany). Energy Procedia, Vol. 1, Issue 1, February 2009, Pages 2029-2035. doi:10.1016/j.egypro.2009.01.264, (2009).
- [9] 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. und Hurter, S.: Baseline Characterization of the CO₂ SINK Geological Storage Site at Ketzin, Germany, Environmental Geosciences, No. 133, 145, (2006).
- [10] Norden, B.; Förster, A.; Vu-Hoang, D.; Marcelis, F.; Springer, N.; Le Nir, I.: Lithological and Petrophysical core-log Interpretation in CO₂ SINK, the European on-shore

Kühn:

Geologische CO₂-Speicherung – Erfahrungen vom Pilotstandort Ketzin (Brandenburg)

Research Storage and Verification Project. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, April 2010.

[11] Prevedel, B.; Wohlgemuth, L.; Legarth, B.; Henninges, J.; Schütt, H.; Schmidt-Hattenberger, C.; Norden, B.; Förster, A.; Hurter, S.: The CO₂SINK Boreholes for Geological CO₂-Storage Testing. Energy Procedia, Vol. 1, Issue 1, February 2009, Pages 2087-2094, (2009).

[12] Möller, Fabian, Liebscher, Axel, Martens, Sonja, Schmidt-Hattenberger, Cornelia, Kühn, Michael: Yearly Operational Datasets of the CO₂ Storage Pilot Site Ketzin, Germany. Scientific Technical Report : Data ; 12/06. - Nur online Erschienen. DOI: 10.2312/GFZ.b103-12066, (2012).

[13] Giese, R.; Henninges, J.; Lüth, S.; Morozova, D.; Schmidt-Hattenberger, C.; Würdemann, H.; Zimmer, M.; Cosma, C.; Juhlin, C. and CO₂SINK Group: Monitoring at the CO₂SINK Site: A Concept Integrating Geophysics, Geochemistry and Microbiology. Energy Procedia, Vol. 1, Issue 1, February 2009, Pages 2251-2259, (2009).

[14] Zimmer, M.; Pilz, P.; Erzinger, J.: Long-term Surface Carbon Dioxide Flux Monitoring at the Ketzin Carbon Dioxide Storage Test Site. Environmental Geosciences 2011, 18: 119-130, DOI:10.1306/eg.11181010017, (2011).

[15] Henninges, J.; Liebscher, A.; Bannach, A.; Brandt, W.; Hurter, S.; Köhler, S.; Möller, F. and CO₂SINK Group: P-T-p and Two-phase Fluid Conditions with Inverted Density Profile in Observation Wells at the CO₂ Storage Site at Ketzin (Germany). Energy Procedia, Volume 4, 2011, Pages 6085-6090, doi:10.1016/j.egypro.2011.02.614, (2011).

[16] Morozova, D.; Zettlitzer, M.; Let, D.; Würdemann, H. and the CO₂SINK group: Monitoring of the Microbial Community Composition in Deep Subsurface Saline Aquifers During CO₂ Storage in Ketzin, Germany. Energy Procedia, Volume 4, 2011, Pages 4362-4370, doi:10.1016/j.egypro.2011.02.388, (2011).

[17] Labitzke, T.; Bergmann, P.; Kießling, D.; Schmidt-Hattenberger, C.: 3D Surface-Downhole Electrical Resistivity Tomography Data Sets of the Ketzin CO₂ Storage Pilot from the CO₂SINK Project Phase. Scientific Technical Report : Data; 12/05. Nur online Erschienen. DOI: 10.2312/GFZ.b103-12051, (2012).

[18] Schmidt-Hattenberger, C.; Bergmann, P.; Kießling, D.; Krüger, K.; Rücker, C.; Schütt, H. and Ketzin Group: Application of a Vertical Electrical Resistivity Array (VERA) for Monitoring CO₂ Migration at the Ketzin Site: First Performance Evaluation. Energy Procedia, Volume 4, 2011, Pages 3363-3370, doi:10.1016/j.egypro.2011.02.258, (2011).

[19] Kiessling, D.; Schmidt-Hattenberger, C.; Schuett, H.; Schilling, F.; Krüger, K.; Schöbel, B.; Danckwardt, E.; Kummerow, J. and the CO₂SINK Group: Geoelectrical Methods for Monitoring Geological CO₂ Storage: First Results from Cross-Hole and Surface-Downhole Measurements from the CO₂SINK Test Site at Ketzin (Germany). International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 4, Issue 5, September 2010, Pages 816-826, doi:10.1016/j.ijggc.2010.05.001, (2010).

[20] Bergmann, P.; Yang, C.; Lüth, S.; Juhlin, Ch.; Cosma, C.: Time-Lapse Processing of 2D Seismic Profiles with Testing of Static Correction Methods at the CO₂ Injection Site Ketzin (Germany). Journal of Applied Geophysics 75 124 - 139, doi:10.1016/j.jappgeo.2011.05.005, (2011).

[21] Lüth, S.; Bergmann, P.; Cosma, C.; Enescu, N.; Giese, R.; Götz, J.; Ivanova, A.; Juhlin, C.; Kashubin, A.; Yang, C.;

Zhang, F.: Time-Lapse Seismic Surface and Down-hole Measurements for Monitoring CO₂ Storage in the CO₂SINK Project (Ketzin, Germany). Energy Procedia, Volume 4, Pages 3435-3442, doi:10.1016/j.egypro.2011.02.268, (2011).

[22] Kazemeini, H.; Juhlin, C.; Zinck-Jorgensen, K.; Norden, B.: Application of the Continuous Wavelet Transform on Seismic Data for Mapping of Channel Deposits and Gas Detection at the CO₂SINK Site, Ketzin, Germany. Geophysical Prospecting, 57, 1, 111-123 p. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2008.00723.x, (2009).

[23] Kazemeini, H.; Juhlin, C.; Fomel, S.: Monitoring CO₂ Response on Surface Seismic Data; a Rock Physics and Seismic Modeling Feasibility Study at the CO₂ Sequestration Site, Ketzin, Germany. Journal of Applied Geophysics 71, 109-124, doi:10.1016/j.jappgeo.2010.05.004, (2010).

[24] Yordkayhun, S.; Juhlin, C.; Norden, B.: 3D Seismic Reflection Surveying at the CO₂SINK Project Site, Ketzin, Germany: A Study for Extracting Shallow Subsurface Information. Near Surface Geophysics, 7, 75-91, (2009).

[25] Yordkayhun, S.; Ivanova, A.; Giese, R.; Juhlin, C.; Cosma, C.: Comparison of Surface Seismic Sources at the CO₂SINK Site, Ketzin, Germany. Geophysical Prospecting, 57, 125-139, doi: 10.1111/j.1365-2478.2008.00737.x, (2009).

[26] Yordkayhun, S.; Tryggvason, A.; Norden, B.; Juhlin, C.; Bergmann, B.: 3D Seismic Traveltime Tomography Imaging of the Shallow Subsurface at the CO₂SINK Project Site, Ketzin, Germany. Geophysics, 74, 1. G1-G15 p (2009).

[27] Fischer, S.; Zemke, K.; Liebscher, A.; Wandrey, M. and the CO₂SINK Group: Petrophysical and Petrochemical Effects of Long-term CO₂-Exposure Experiments on Brine-saturated Reservoir Sandstone. Energy Procedia, Volume 4, 2011, Pages 4487-4494, doi:10.1016/j.egypro.2011.02.404, (2011).

[28] Zemke, K.; Liebscher, A.; Wandrey, M. and the CO₂SINK Group: Petrophysical Analysis to Investigate the Effects of Carbon Dioxide Storage in a Subsurface Saline Aquifer at Ketzin, Germany (CO₂SINK). International Journal of Greenhouse Gas Control Volume 4, Issue 6, Pp. 990-999. CO₂ Storage at the EGU General Assembly 2009. doi:10.1016/j.ijggc.2010.04.008, (2010).

[29] Kempka, T.; Kühn, M.; Class, H.; Frykman, P.; Kopp, A.; Nielsen, C.M.; Probst, P.: Modelling of CO₂ Arrival Time at Ketzin – Part I. International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 4, Issue 6, Pp. 1007-1015. CO₂ Storage at the EGU General Assembly 2009, doi:10.1016/j.ijggc.2010.07.005, (2010).

[30] Lengler, U.; De Lucia, M.; Kühn, M.: The Impact of Heterogeneity on the Distribution of CO₂: Numerical Simulation of CO₂ Storage at Ketzin. International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 4, Issue 6, Pp. 1016-1025. CO₂ Storage at the EGU General Assembly 2009. doi:10.1016/j.ijggc.2010.07.004, (2010).

[31] Bergmann, P.; Lengler, U.; Schmidt-Hattenberger, C.; Giese, R.; Norden, B.: Modelling the Geoelectric and Seismic Reservoir Response Caused by Carbon Dioxide Injection Based on Multiphase Flow Simulation: Results from the CO₂SINK Project. Chemie der Erde, Volume 70, Supplement 3, Pages 173-183 (August 2010).