



Originally published as:

Schmidt-Hattenberger, C. (2018): Globale Entwicklung der CCS-Technologie und ihre Rolle als mögliche Klimaschutzmaßnahme. - *Energiewirtschaftliche Tagesfragen - Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt*, 68, 7/8, pp. 37—40.

Globale Entwicklung der CCS-Technologie und ihre Rolle als mögliche Klimaschutzmaßnahme

Cornelia Schmidt-Hattenberger

Der von der Menschheit seit der industriellen Revolution verursachte Anteil am Klimawandel rückt durch die breite Diskussion einer umweltschonenden und zuverlässigen Energieversorgung immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit. Eine wichtige Rolle kommt hier der internationalen Staatengemeinschaft zu, durch verbindliche Energiekonzepte in den kommenden Jahrzehnten konsequent Vermeidungs- und Minderungsstrategien für Treibhausgas(THG)-Emission umzusetzen. Der Artikel gibt einen Einblick in den derzeitigen Stand der Forschung zur dauerhaften geologischen Speicherung von Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen durch die Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS)-Technologie. Der Fokus liegt dabei auf ausgewählten internationalen Beispielen und dem nationalen Forschungsprojekt zur CO₂-Speicherung am Pilotstandort Ketzin im Bundesland Brandenburg.

Auf der UN Weltklimakonferenz in Paris, im Dezember 2015, wurde in Nachfolge des Kyoto-Protokolls von 1997 durch die Staatengemeinschaft eine verbindliche internationale Klimaschutzvereinbarung unterzeichnet, die globale Erderwärmung auf unterhalb 2°C zu begrenzen. Um dieses Ziel zu erreichen, muss das Gesamtbudget des in der Atmosphäre deponierbaren CO₂ beschränkt werden (ausgedrückt als die atmosphärische CO₂-äquivalente Volumenkonzentration in ppm oder maximale globale Jahresemissionen in Gigatonnen Kohlenstoff/Jahr [1]). Internationale Forschergruppen haben für den 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) sogenannte „Repräsentative Konzentrationspfade“ (RCP) in Form von Modellsimulationen erarbeitet. Diese stehen für mögliche Entwicklungspfade von THG-Emissionen

und den damit verbundenen Optionen für Vermeidungsmaßnahmen. Die Bundesregierung hat sich im Jahr 2016 verabschiedeten Klimaschutzplan als anspruchsvolles Langfristziel gesetzt, bis 2050 eine THG-Minderung von bis zu 95 % gegenüber 1990 zu erreichen [2].

CCS als mögliche Klimaschutz-Option

CCS ist eine mögliche Klimaschutzmaßnahme, bei der aus industriellen Prozessen über eine spezifische chemische/physikalische Prozedur emittiertes CO₂ abgeschieden (Capture), über einen Transportweg (per Schiff oder Pipeline) zum Speicher gebracht und dort sicher in eine Gesteinsformation des tiefen Untergrundes eingelagert wird (Storage) [3]. Im Bedarfsfall kann CO₂ als Rohstoff aus diesem Speicher wieder rückgeführt werden. Zunächst waren

CCS-Maßnahmen vorrangig auf Reduktion von CO₂-Emissionen aus Kohlekraftwerken konzentriert. Inzwischen ist die Entwicklung und Anwendung der Technologie auch auf Bereiche der energieintensiven Industrie erweitert worden, deren Emissionen anders nicht vermieden werden können. Dazu gehören die Bereiche Stahl, Zement, Düngemittel, Zellstoff/Papier, Petrochemie – hier ist kein Phase-out wie bei den Kohlekraftwerken möglich (Abb. 1).

In die Diskussion mit einbezogen werden muss auch die sog. Carbon Dioxide Capture and Utilization (CCU)-Technologie, d.h. die Abtrennung von CO₂ und anschließende stoffliche Nutzung z.B. in Kunststoffen, Baumaterialien, synthetischen Kraftstoffen. Die Nachhaltigkeit von CCU-Anwendungen liegt in der Einsparung fossiler Rohstoffe und damit verbundener Effizienzgewinne. Allerdings erfordert letztendlich auch CCU eine Speicherung von CO₂, um industriebedingte CO₂-Emissionen umfassend und in signifikanter Menge zu senken. In diesem Zusammenhang ist auch noch die Verwertung von Biomasse mit nachgeschalteter Nutzung oder Speicherung von CO₂ zu nennen (Bioenergy with CCU/S, BECCU bzw. BECCS), sowie auch Direct Air CCU/S (DACCU, DACCS), d.h. die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre mit anschließender Nutzung bzw. Speicherung von CO₂.

Ein wichtiger Schwerpunkt der CCS-Technologie ist die geologische Speicherung, worauf auch ein besonderes öffentliches Interesse ruht. Es kommen vier Speicheroptionen in Betracht: (1) Tiefe, salzwasserführende Grundwasserleiter (saline Aquifere) untermeerisch = offshore oder kontinental = onshore, (2) Erschöpfte Erdöl- und Erdgas-Lagerstätten (die

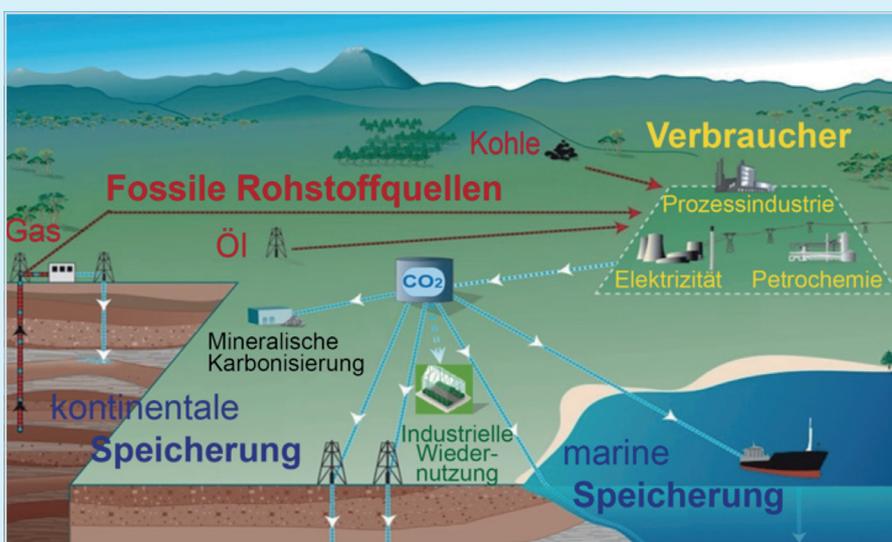


Abb. 1 Schematische Darstellung der CCS-Technologie unter Einbeziehung vorhandener fossiler Rohstoffquellen, als Vermeidungsstrategie für emissionsintensive Prozessindustrie und mit Wiedernutzung von CO₂ als Rohstoff (modifiziert nach [4])

Optionen 1 und 2 ermöglichen die Speicherung von CO₂ im Porenraum des Speichergesteins), (3) nicht abbaubare Kohleflöze, die eine Speicherung durch Sorption von CO₂ an Kohlen zulassen, (4) Basalte, die ebenfalls den Poren- und Klufttraum des Gesteins nutzen und zusätzlich sehr schnelle mineralische Bindung des CO₂ durch hohe Reaktivität des Gesteins ermöglichen.

Für Deutschland schätzen Experten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die CO₂-Speicherkapazität in salinen Aquiferen (einen der wichtigsten Speichertypen weltweit) auf ca. 6 bis 12 Gt (6-12 Mrd. t). Erdgaslagerstätten bieten ca. 2,75 Gt Speicherkapazität. Zum Vergleich: Deutschlands in CO₂-Äquivalente umgerechnete Gesamtemission in den Jahren 2014-2016 betragen ca. 0,9 Gt jährlich [2].

CCS-Projekte weltweit

International existieren bereits umfangreiche Erfahrungen zur geologischen CO₂-Speicherung. Das Schaubild in Abb. 2 beruht auf einer Analyse des Global CCS Institutes [5] und zählt derzeit insgesamt weltweit 17 im Betrieb befindliche CCS-Projekte, davon wiederum 13 großskalige (industrielle) Projekte, die das an einer Punktquelle abgeschiedene CO₂ zur Ausbeutesteigerung von Erdöllagerstätten (Enhanced Oil Recovery - EOR) einsetzen, wo dann schlussendlich der größte Teil des CO₂ am Ende in der Lagerstätte verbleibt. Davon sind zehn dieser Projekte in Nordamerika lokalisiert, drei weitere verteilt auf Brasilien, Saudi-Arabien und die Vereinten Arabischen Emirate, alle zusammen mit einer Gesamtbilanz von 27,4 Mio. t abgeschiedenes und eingespeichertes CO₂ pro Jahr. Es gibt ferner vier industrielle Projekte zur direkten, dauerhaften CO₂-Speicherung: Sleipner, Snøhvit (Norwegen), Decatur Illinois (USA) und Quest (Kanada) mit zusammen ca. 3,7 Mio. t eingespeichertem CO₂ pro Jahr. Im fortgeschrittenen Aufbau (grün) befinden sich noch weitere vier Projekte (Kanada, China, Australien) und ebenso 4 Projekte im Entwicklungsstadium (orange) in den USA, China und Norwegen.

Im Folgenden sollen einige Beispiele der internationalen Entwicklung zur CCS-Technologie betrachtet werden [6]. Ein sehr prominentes Projekt in Kanada war das Retrofitting von Unit 3 (139 MW-Block) des Steinkohlekraftwerks

Boundary Dam, in Estevan, Saskatchewan. Es stellte die weltweit erste großtechnische Demonstrationsanlage zur CO₂-Emissionsreduktion im Kraftwerks-Bereich dar, die im Oktober 2014 eingeweiht wurde. Die Abscheidkapazität beträgt ca. 1 Mio. t CO₂/Jahr und der Transport des CO₂ erfolgt über eine 70 km langen Pipeline zur Ausbeutesteigerung des Weyburn-Ölfeld (EOR, Reservoir-Tiefe 1.300-1.500 m). Nichtbenötigtes CO₂ wurde via 3 km langer Pipeline zum geologischen Puffer-Speicher Aquistore (3.000 m Tiefe) transportiert.

Die direkte CO₂-Speicherung in einem salinen Aquifer (ohne EOR-Nutzung) wurde durch das *Quest Projekt* in Scotford (nahe Edmonton) in Alberta/Kanada demonstriert. Die CCS-Anlage ist an die Wasserstoff-Herstellung im Rahmen der Aufbereitung von Ölsanden gekoppelt (Hydrogen Manufacturing Units, HMUs). Das bei der Bitumenveredelung anfallende CO₂ (ca. 1 Mio. t CO₂/Jahr) wird seit Herbst 2015 nach Transport über eine 60 km lange Pipeline in einem salinen Aquifer, in ca. 2.000 m Tiefe gespeichert.

Die weltweit erste BECCS-Anlage befindet sich in *Decatur* (Illinois, USA). Hier wird das beim Fermentationsprozess von Mais als Energiepflanze anfallende CO₂ abgefangen und im Untergrund gespeichert. BECCS wird von vielen Klimaforschern als Schlüsseltechnologie im Kampf gegen den Klimawandel angesehen. Im aktuellen Weltklimabericht basieren rund 3/4 der Szenarien

auf dem Anbau von Energiepflanzen in Kombination mit CCS, da hierdurch eine Einhaltung des Zwei-Grad-Ziels durch negative Emissionen in den Emissionsvermeidungspfaden ermöglicht werden kann. Kritikpunkte dieser Anwendung sind allerdings die Landnutzungskonkurrenz und der wachsende Flächenbedarf für die Energiepflanzen.

Petra Nova (Texas) ist derzeit die weltgrößte CCS-Anlage zur Emissionsreduktion an einem konventionellen Kraftwerk. Hier wurden die technischen Parameter vom kanadischen Vorreiter-Projekt *Boundary Dam* noch überboten: Retrofitting eines Steinkohleblock mittels 240 MW CCS System, Post-Combustion Abscheidetechnik sowie seit Anfang Januar 2017 Einspeisung von ca. 1.6 Mio. t CO₂/Jahr via 130 km langer Pipeline in ein Ölfeld nahe Houston zur EOR-Anwendung, mit abschließendem Verbleib im Reservoir von ca. 1.500-1.900 m Tiefe.

Die Situation in *Europa* zeigt einen anderen Entwicklungstrend. Großskalige CO₂-Speicherprojekte gibt es bisher nur in Norwegen. Die dortige, im Jahr 1990 implementierte CO₂-Steuer für den Offshore-Petroleumsektor schuf einen finanziellen Anreiz, um das bei der Erdgasförderung anfallende CO₂ abzuscheiden und untermeerisch (off-shore) zu speichern. In diesem Kontext entstanden zwei CO₂ Speicherprojekte im Norwegischen Kontinentalschelf: Sleipner und Snøhvit, beide vom norwegischen Unternehmen Equinor (vormals Statoil) betrie-

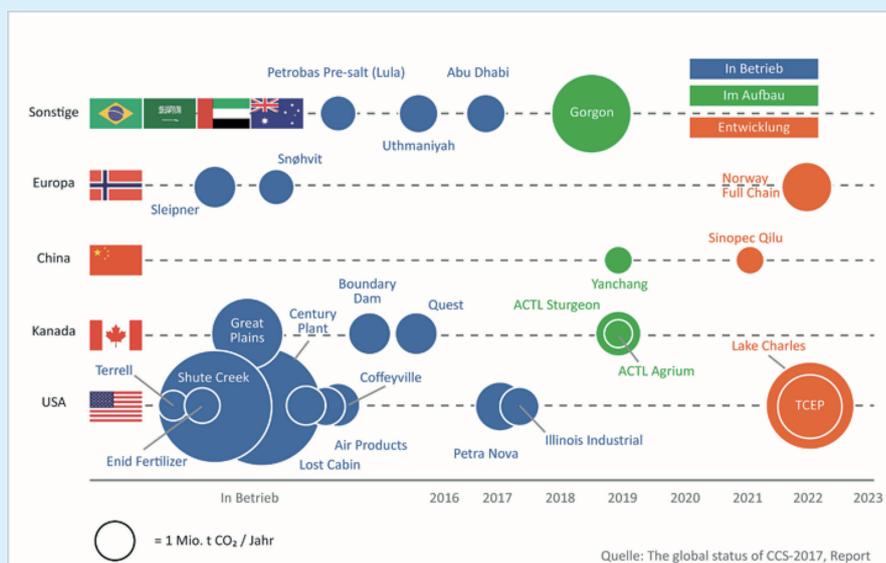


Abb. 2 Schaubild zu derzeit 17 internationalen großskaligen CCS-Projekten, die in Betrieb sind (blau). Weitere befinden sich im Aufbau (grün) oder in der Entwicklungsphase (orange). Die Größe des Symbols steht für die eingespeicherte Menge CO₂ pro Jahr (modifiziert nach [5])

ben. Seit 1996 wird im Gasfeld Sleipner-West Erdgas mit einem hohen CO₂-Anteil produziert. Auf der Sleipner-Plattform befindet sich die Technik zur Gas-Förderung, CO₂-Abscheidung und CO₂-Einspeicherung. Das abgetrennte CO₂ wird nicht zur Produktionssteigerung genutzt, sondern direkt in die Utsira Formation ca. 1.000 m u.d.M. injiziert. Die Einspeisung beträgt ca. 1 Mio. t CO₂/Jahr.

In 2008 startete mit Snøhvit die weltweit erste Flüssigerdgas-Anlage (Liquified Natural Gas, LNG) mit CO₂-Speicherung. Aus dem in der Barentsee produzierten Gas wird CO₂ abgetrennt (Anteil 6-10%), per Pipeline von der Verarbeitungsanlage zum Snøhvit-Feld zurück transportiert und in die Tubåen Formation ca. 2.600 m u.d.M. injiziert. Die Einspeisung beträgt ca. 0.7 Mio. t CO₂/Jahr, als geplante Gesamtkapazität des Speichers werden ca. 31-40 Mio. t CO₂ anvisiert. Sleipner und Snøhvit demonstrieren erfolgreich die untermeerische Aquiferspeicherung.

Forschungsstandorte in Europa

Neben den zwei industriellen CCS-Projekten Norwegens hat man in Europa an verschiedenen Standorten relevante wissenschaftliche Fragestellungen zur CO₂-Speicherung untersucht (Abb. 3).



Abb. 3 Beispiele wissenschaftlicher Projekte zur Untersuchung von CO₂-Ausbreitung und -Speicherung an europäischen Forschungsstandorten (Quelle: GFZ)

Der Versuchsstandort Svelvik nahe Oslo (Norwegen) bildet mit seiner Geologie gut die groben Sande der Utsira-Formation des Sleipner-Feldes und anderer Nordsee-Speicherfelder ab und stellt ein ideales Testgelände für Messmethoden zur Untersuchung der CO₂-Ausbreitung dar.

Island demonstrierte die CO₂-Abscheidung (10.000-17.000 t CO₂/H₂S /Jahr) aus hydrothermalen Fluiden mit anschließender Speicherung von in Wasser gelöstem CO₂ im Basaltgestein. Unter den hier gegebenen Bedingungen agierte der Basalt als hochreaktives Wirtsgestein und führte innerhalb von zwei Jahren zu einer überaus schnellen mineralischen Ausfällung in Form von Karbonaten. Wegen des sehr wasserintensiven Prozesses (25 t Wasser pro t CO₂) ist die Umsetzung der Methode eher für Küsten-Standorte prädestiniert.

Das Projekt Lacq-Rousse (Frankreich) umfasste die gesamte CCS-Wertschöpfungskette, bestehend aus Abscheidung an einem Gaskraftwerk, Pipeline-Transport über 30 km zu einem ausgebeuteten Erdgasfeld und Einspeicherung von insgesamt 51.000 t CO₂ in ca. 4.500 m Tiefe. Die Pipeline wurde früher für Gastransporte genutzt und in diesem Projekt umfunktioniert für CO₂. Erdgasfelder gehören generell zu „Premium“ CO₂-Speichern, da sie bereits eine sichere Verwahrung des Erdgases über Jahrmillionen bewiesen haben.

Ketzin (Deutschland) als erstes europäisches kontinentales (onshore) Pilot-speicherprojekt, hat den vollen Lebenszyklus eines CO₂-Speichers untersucht, insgesamt 67.000 t CO₂ injiziert und dabei ein einzigartiges multidisziplinäres Monitoring-Programm getestet. Ketzin war Vorbild für nachfolgende europäische Forschungsprojekte zur CO₂-Speicherung.

Das Projekt Hontomin (Spanien) untersucht die CO₂-Speicherung im Karbonatgestein, bisher wurden ca. 10.000 t CO₂ injiziert. Auch dieser Wirtsgestein-Typ kommt weltweit vor und muss auf Tauglichkeit für sichere und verlässliche CO₂-Speicherung untersucht werden.

Der CO₂-Pilotstandort in Ketzin (Brandenburg)

Der CO₂-Pilotstandort Ketzin repräsentiert das einzige Forschungsprojekt zur geologischen CO₂-Speicherung in Deutschland sowie das

einzigste europäische Projekt zur CO₂-Speicherung in einem salinen Aquifer auf dem Festland (onshore) (Abb. 4). Unter der Leitung des GeoForschungsZentrums Potsdam und begleitet von nationalen und internationalen Forschungspartnern, erfolgten von 2004-2017 wissenschaftliche Untersuchungen zur Einbringung von CO₂ in den Untergrund und Beobachtung dessen Ausbreitung, unterstützt von europäischen und nationalen Fördermitteln sowie Industriemitteln. Über den Zeitraum Juli 2008 bis August 2013 wurden in einem regelmäßigen Injektionsbetrieb etwa 67.000 t des Treibhausgases CO₂ in einer Tiefe von ca. 630 m eingespeichert und mittels eines multidisziplinären Monitoring-Programms untersucht [7]. In der Projektphase 2014-2017 wurde das PostInjektionsverhalten des CO₂ im Untergrund analysiert und der sichere, dauerhafte Verschluss der Bohrungen vorbereitet. Die gewonnenen Untersuchungsergebnisse zeigten, dass:

- eine sinnvolle Kombination geochemischer und geophysikalischer Überwachungsmethoden in der Lage ist, selbst geringe Mengen an CO₂ zu detektieren und deren räumliche Verteilung abzubilden;
- numerische Simulationen imstande sind, das zeitliche und räumliche Verhalten des injizierten CO₂ wiederzugeben und das Langzeitverhaltens eines Speichers zu prognostizieren;
- eine transparente und sachliche Informationspolitik von Beginn an eine breite Akzeptanz für Forschungsarbeiten wie am Standort Ketzin erzeugen kann.

Damit wurde am Pilotstandort Ketzin beispielhaft gezeigt, dass eine sichere und langfristige Speicherung von CO₂ in tiefliegenden salinen Aquiferen möglich ist, sofern grundlegende Regeln, wie sie die Europäische Kommission in ihrer CCS-Direktive aus dem Jahr 2009 beschrieben hat, angewendet und erfüllt werden [8]. Das Ketzin-Projekt erhielt erstmals den Preis „Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF) Recognition Award“, initiiert durch das CSLF, einer internationalen Klimaschutzorganisation auf ministerieller Ebene.

Eine Übertragung der Forschungsergebnisse vom Pilotmaßstab auf künftige CO₂-Speicherstandorte im industriellen Maßstab ist nach Einschätzung der Forscher größtenteils möglich und wäre ein notwendiger Schritt, um tatsächlich ei-

nen wirksamen Effekt bei der Reduzierung des Treibhausgases CO₂ zu erreichen.

Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Mit der europäischen Initiative „ACT-Accelerating CCS Technologies“ [9] läuft derzeit ein vielversprechendes Förderprogramm, welches gezielt die Entwicklung von CCS auf industrieller Skala unterstützt. In einer ersten Phase von 2017-2020 wurden acht Projekte mit einer Laufzeit von drei Jahren gefördert. In vier dieser Projekte gibt es eine Beteiligung deutscher Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die sich auf drängende Fragen von Betreibern und Regulatoren konzentrieren:

- Lösung noch bestehender Probleme bei der technischen Markteinführung durch *effizientere CO₂-Abscheidung in integrierten Industrie-Clustern*;
- kosteneffiziente Möglichkeiten für *Kombination CCS und Wasserstoff*, inklusive Transport und Speicherung;
- *Risikoanalyse und Vermeidungsstrategien* für CO₂-Migration bei Störungen und Rissen im Abdeckgebirge;
- *Druckmanagement und Konformität* von industriellen CO₂-Speichern, Ableitung von Empfehlungen für Betreiber und Regulatoren.

Aus dem bisherigen Status Quo lässt sich schlussfolgern, dass die erreichten ingenieurtechnischen und wissenschaftlichen Ergebnisse vielversprechend sind und die CCS-Technologie in Konzepte zukünftiger Energiesysteme und in die Raumplanung für den geologischen Untergrund mit integriert werden sollte. Für eine wirtschaftliche Umsetzung bedarf es der konsequenten Etablierung von Marktmechanismen, die einen realistischen CO₂-Preis garantieren und das Emissionshandelssystem (Emission Trade System, ETS) zur Funktion bringen, so dass sich zu leistende Mehrinvestitionen für CCS über Emissionszertifikate einlösen lassen. Eine weitere Etablierung von rechtlichen Rahmen zur Unterstützung der CO₂-Speicherung durch Anpassung bzw. Überarbeitung des nationalen CO₂-Speicher Gesetzes (KSpG) [10] als auch zur Regelung transnationaler CO₂-Transporte erweist sich als unerlässlich.

Quellen

- [1] P. Smith et al.: Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change* 6 (1), 2016, 42.
- [2] BMU: Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. Berlin, Ausgabe 2017, 6.
- [3] Kühn, M.; Liebscher, A.; Martens, S.; Möller, F.; Kempka, T.; Streibel, M.: Safe Operation of Geological CO₂ Storage Using the Example of the Pilot Site in Ket-

zin. In: Kuckshinrichs, W., Hake, J.F. (Eds.), *Carbon Capture, Storage and Use – Technical, Economic, Environmental and Societal Perspectives*. Springer, 2015, 127.

[4] IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O. Davidson, H.C. de Coninck, M. Loos, L.A. Meyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2005.

[5] Global CCS Institute: The global status of CCS-2017, Report (2017), Australia.

[6] International Energy Agency: 20 years of Carbon Capture and Storage Accelerating future deployment, Report (2016), Paris.

[7] Martens, S.; Kempka, T.; Liebscher, A.; Lüth, S. und Möller, F., et al.: Europe's longestoperating onshore CO₂ storage site at Ketzin, Germany: a progress report after three years of injection. *Environmental Earth Sciences* 67 (2), 2012, 323.

[8] Accelerating CCS Technologies web-site: <http://www.act-ccs.eu>

[9] Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die geologische Speicherung von Kohlendioxid. 2009, Brüssel.

[10] Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz – KSpG), 2012, Berlin.

*Dr. C. Schmidt-Hattenberger, Kommissarische Sektionsleiterin, Sektion 6.3 Geologische Speicherung, Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, Potsdam
cornelia.schmidt-hattenberger@gfz-potsdam.de*

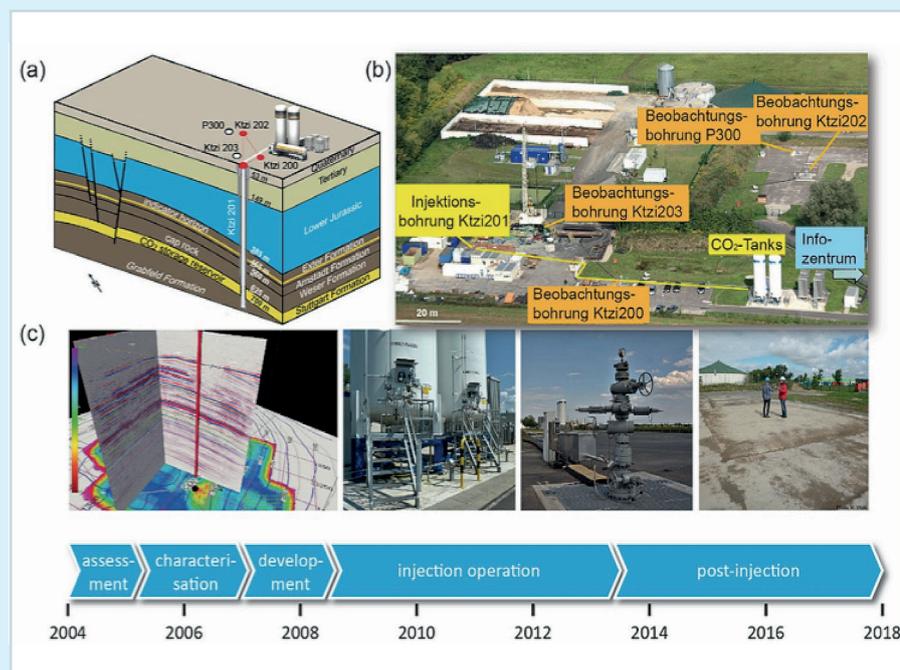


Abb. 4 (a) Schematische Darstellung des Speicherkomplexes am Pilotstandort Ketzin [7], (b) Luftaufnahme vom Gelände mit Bohrungen und Injektionsanlage, (c) Durchlaufene Phasen eines CO₂-Speichers
Fotos: GFZ