

Geologische CO₂- Speicherung – was ist das eigentlich?

**Verantwortliche
Nutzung
fossiler Brennstoffe**

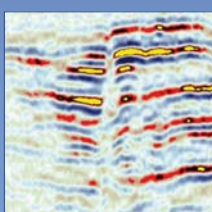
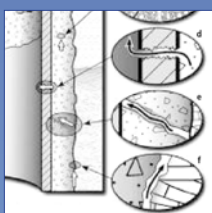
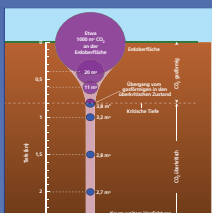
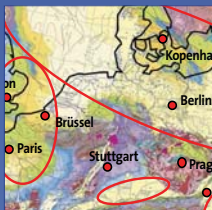
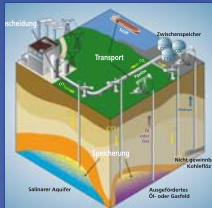
**Beseitigung
der Hauptquelle
von Treibhausgasen**

**Rückführung des Kohlendioxids
in den Untergrund**

**Brückentechnologie, bis klimafreundliche
Energiequellen in ausreichender
Menge zur Verfügung stehen**



Europäisches Exzellenznetzwerk CO₂GeoNet



Der Klimawandel und die Notwendigkeit geologischer CO₂-Speicherung 4

1. Wo und wie viel CO₂ können wir unterirdisch speichern? 6

2. Wie können wir große Mengen CO₂ transportieren und speichern? 8

3. Was passiert mit dem CO₂, wenn es im Speicher ist? 10

4. Kann CO₂ aus dem Speicher entweichen und wenn ja, was wären die möglichen Folgen? 12

5. Wie können wir die Speicher überwachen – an der Erdoberfläche, aber auch in der Tiefe? 14

6. Welche Sicherheitskriterien müssen aufgelegt und eingehalten werden? 16

Glossar 18

Was CO₂GeoNet für Sie tun kann 19

Zu dieser Broschüre haben folgende Autoren beigetragen:

Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijls Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

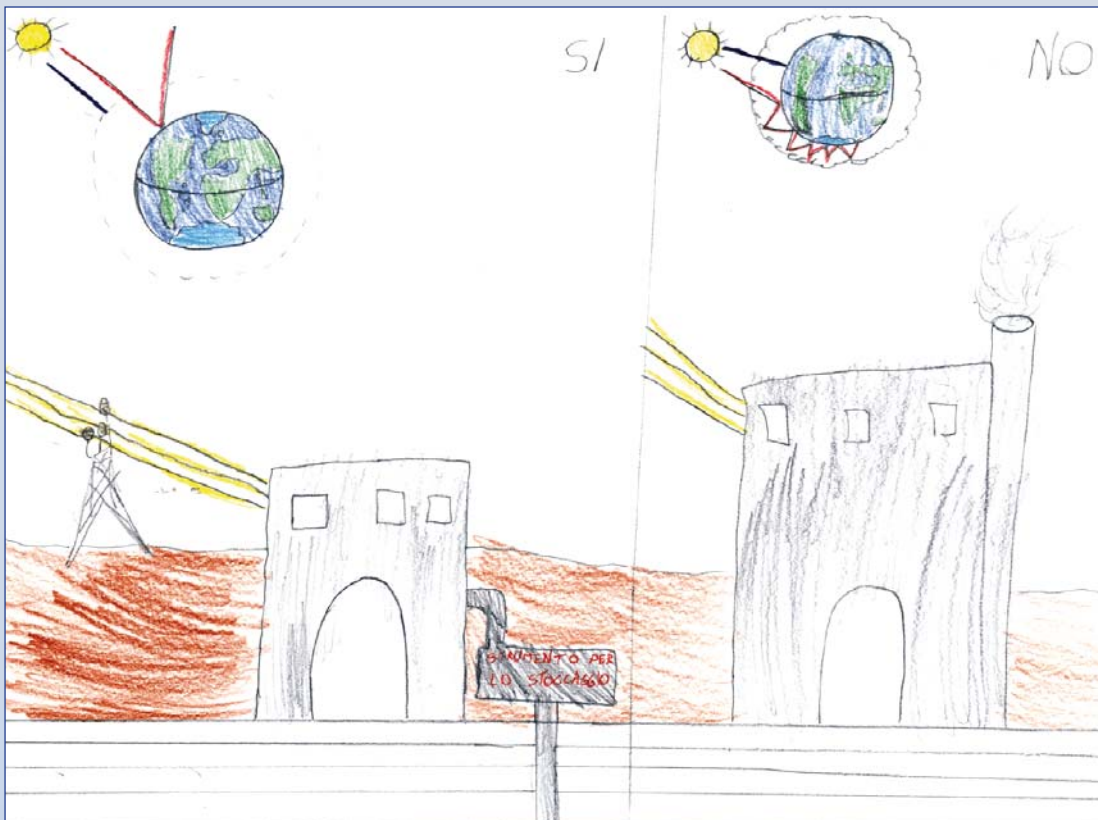
Eine Zukunftsvision



Keine rauchenden Schornsteine mehr

**Eine Pipeline bringt das CO₂
und tut es in den Boden**

Das ist gut für die Erde



Massimo, 10 Jahre alt, Rom - Italien

**Für unsere Kinder macht die geologische
Speicherung von CO₂ Sinn**

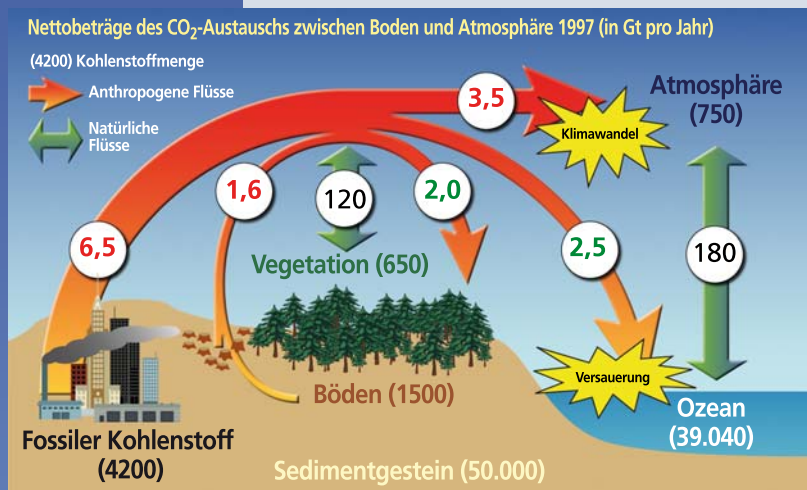
Der Klimawandel und die Notwendigkeit der geologischen CO₂-Speicherung

Abbildung 1
Durch Menschen verursachte CO₂-Emissionen betragen weltweit 30 Milliarden Tonnen (Gt) pro Jahr. Dies entspricht 8,1 Gt Kohlenstoff – davon stammen 6,5 Gt aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und 1,6 Gt aus der Landwirtschaft und der Abholzung von Wäldern.

Wir Menschen produzieren zu viel CO₂

Inzwischen herrscht Konsens, dass der Mensch den Kohlenstoffkreislauf unseres Planeten durcheinander bringt. Vor der industriellen Revolution und einige 10.000 Jahre davor resultierte ein fein ausbalancierter natürlicher Austausch von Kohlenstoff zwischen der Geosphäre, der Biosphäre, den Ozeanen und der Atmosphäre in atmosphärischen CO₂-Konzentrationen von etwa 280 ppm, d.h. 0,028%. Unsere verschwenderische Verbrennung fossiler Brennstoffe

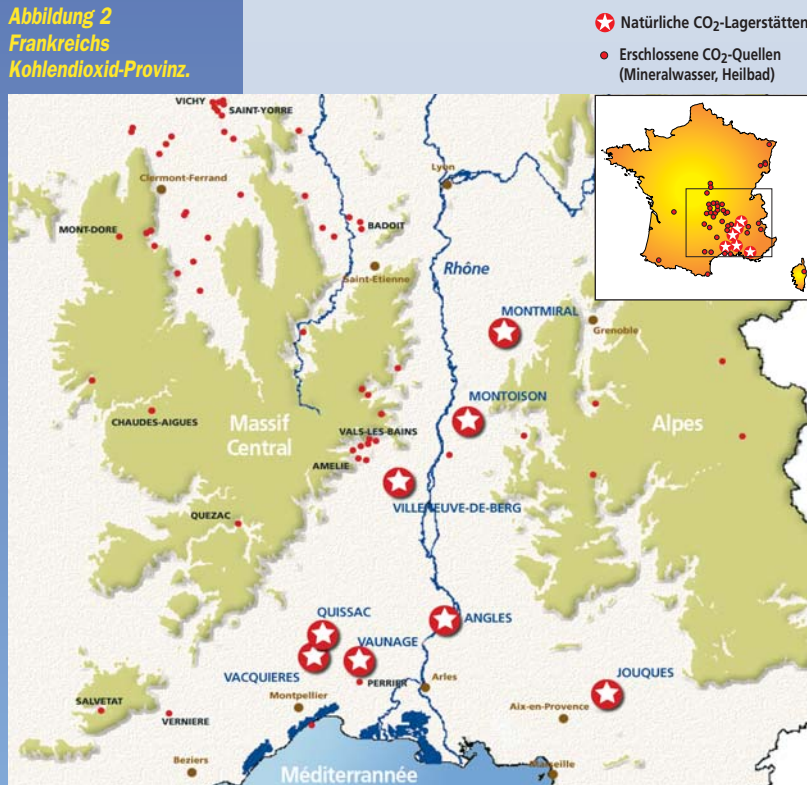
(Kohle, Öl, Gas) für Stromerzeugung, Heizung, Industrie und Transport in den letzten 250 Jahren hat die CO₂-Emissionen unaufhörlich ansteigen lassen (**Abb. 1**). Etwa die Hälfte dieses von Menschen erzeugten Überschusses wurde von der Vegetation wieder aufgenommen und in den Ozeanen gelöst. Letzteres hat eine Versauerung und damit zusammenhängende potenziell negative Auswirkungen auf Meerespflanzen und -tiere zur Folge. Der Rest wurde in der Atmosphäre angereichert. Dort trägt der CO₂-Überschuss zum Klimawandel bei, weil CO₂ als Treibhausgas einen Teil der Sonnenwärme einfängt, wodurch sich die Erdoberfläche erwärmt. Es sind sofortige radikale Maßnahmen erforderlich, um zu verhindern, dass die heutige CO₂-Konzentration von 387 ppm (bereits ein Anstieg von 38% im Vergleich zum vorindustriellen Niveau) weiter ansteigt und in den kommenden Jahrzehnten das kritische Niveau von 450 ppm übersteigt. Weltweit sind sich Experten einig, dass es jenseits dieser Konzentration nicht mehr möglich sein könnte, die schlimmsten Folgen des Klimawandels abzuwenden.



Rückführung des Kohlenstoffs in den Untergrund

Seit Beginn des Industriezeitalters in den 50er Jahren des 18. Jahrhunderts ist unsere Welt auf fossile Brennstoffe angewiesen. Deshalb ist es nicht weiter verwunderlich, dass die Umwandlung in eine auf klimafreundlichen Energiequellen basierende Gesellschaft sowohl Zeit als auch Geld erfordert. Bis dahin brauchen wir eine Zwischenlösung, die uns hilft, unsere Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren. Wenn wir diese Brennstoffe emissionsfrei einsetzen könnten, würde uns dies die nötige Zeit verschaffen, um Technologien und Infrastrukturen für eine Zukunft mit erneuerbarer Energie zu entwickeln. Eine solche Möglichkeit wäre die Schaffung eines geschlossenen Kreislaufs im Energieerzeugungssystem, indem der ursprünglich in Form von Gas, Öl und Kohle aus dem Untergrund entnommene Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid wieder dorthin zurückgeführt wird. Interessanterweise ist die unterirdische Speicherung von CO₂ keine menschliche Erfindung, sondern ein verbreitetes natürliches Phänomen: viele natürliche CO₂-Lagerstätten existieren seit Tausenden bis Millionen von Jahren. Ein Beispiel dafür sind die acht natürlichen CO₂-Lagerstätten im Südosten Frankreichs, die während der Ölsuche in den 1960er Jahren entdeckt wurden (**Abb. 2**). Diese und viele andere natürliche Speicherstätten in der ganzen Welt beweisen, dass geologische Formationen CO₂ für geologisch lange Zeiträume effizient und sicher speichern können.

Abbildung 2
Frankreichs Kohlendioxid-Provinz.



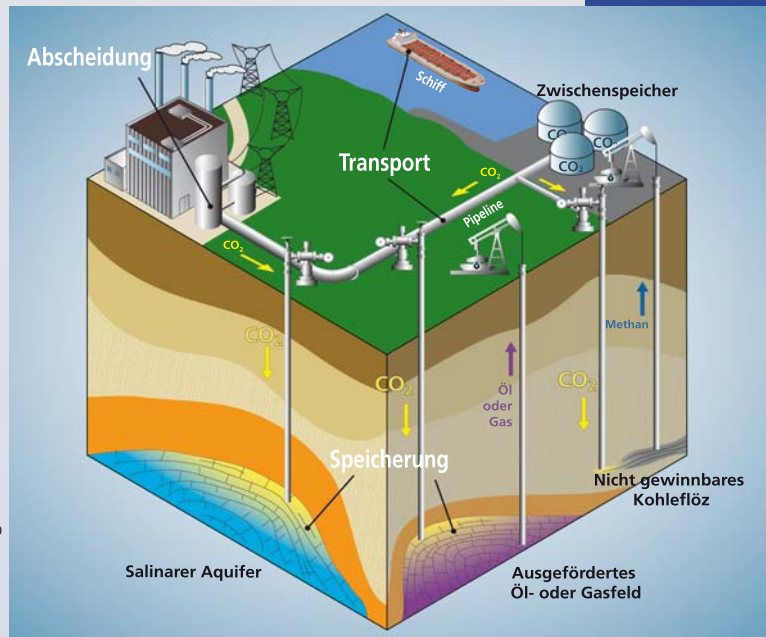
Abscheidung und Speicherung von CO₂: Ein vielversprechender Weg zur Emissionsverminderung

Im Spektrum der Maßnahmen, die dringend umgesetzt werden müssen, um den Klimawandel und die Versauerung der Ozeane zu stoppen, kann das Abscheiden und die Speicherung von CO₂ (englisch CO₂ Capture and Storage, kurz CCS*) eine entscheidende Rolle spielen: CCS* könnte 33% der bis 2050 erforderlichen CO₂-Reduktion ausmachen. CCS* bedeutet, dass CO₂ in Kohle- und Gaskraftwerken sowie industriellen Großanlagen (z.B. Stahlwalzwerken, Zementfabriken, Raffinerien) abgeschieden, per Pipeline oder Schiff zu einer Langzeit-Speicherstätte transportiert und dort über eine Bohrung in eine geeignete geologische Formation eingebracht wird (**Abb. 3**). Angesichts der wachsenden Weltbevölkerung und dem steigenden Energiebedarf der Entwicklungsländer ist die weitere Nutzung fossiler Brennstoffe auf kurze Sicht unvermeidlich. Hand in Hand mit CCS* könnte sich die Menschheit aber in umweltfreundlicher Weise weiterentwickeln und gleichzeitig eine Brücke zu einer Ökonomie bauen, die auf nachhaltiger Energieproduktion basiert.

Die weltweite Entwicklung von CCS floriert

Seit den 1990er Jahren wurden in Europa, den Vereinigten Staaten, Kanada, Australien und Japan große Forschungsprogramme über CCS* durchgeführt. In folgenden großen Demonstrationsprojekten, bei denen CO₂ seit mehreren Jahren in den tiefen Untergrund eingebracht wird, sind bereits viele Erkenntnisse gewonnen worden: Sleipner in Norwegen (etwa 1 Mio. t/Jahr seit 1996) (Abb. 4), Weyburn in Kanada (etwa 1,8 Mio. t/Jahr seit 2000) und In Salah in Algerien (etwa 1 Mio. t/Jahr seit 2004). Die internationale Zusammenarbeit bei der Forschung über die CO₂-Speicherung an diesen und anderen Standorten, unterstützt von der IEA-GHG* und der CSLF*, war besonders wichtig für die Erweiterung unseres Verständnisses und der Entwicklung eines Experten-Netzwerks. Ein hervorragendes Beispiel ist der IPCC*-Sonderbericht über CCS* (2005), in dem der derzeitige Kenntnisstand und die noch zu überwindenden Hindernisse beschrieben werden, damit diese Technologie auf breiter Basis angewendet werden kann. Es gibt also bereits verlässliche technische Fachkenntnisse, und wir befinden uns zuversichtlich in der Demonstrationsphase. Neben den technischen Entwicklungen werden legislative, regulatorische, wirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen entworfen und die gesellschaftliche Akzeptanz wird geprüft. Europa hat das Ziel, bis 2015 bis zu zwölf großangelegte CCS*-Demonstrationsprojekte aktiv umzusetzen, damit die Technologie bis 2020 kommerziell und im industriellen Maßstab genutzt werden kann. Zu diesem Zweck und um die Entwicklung und sichere Nutzung von CCS* zu fördern, hat die Europäische Kommission im Juni 2009 eine Richtlinie zur geologischen CO₂-Speicherung in Kraft gesetzt.

© BRGM im@gé



Wichtige Fragen zur geologischen Speicherung von CO₂

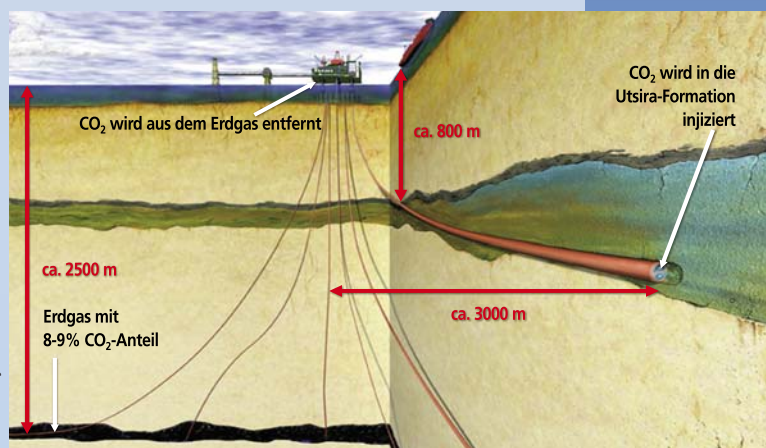
Das Exzellenznetzwerk CO₂GeoNet wurde mit Unterstützung der Europäischen Kommission als Gruppe von Forschungsinstitutionen gegründet, um Europa in der Spitze der internationalen Großforschung zu etablieren. Eines der Ziele von CO₂GeoNet ist die Kommunikation klarer wissenschaftlicher Informationen über die technischen Aspekte der geologischen Speicherung von CO₂. Zur Förderung des Dialogs über diese lebenswichtige Technologie haben die Forscher von CO₂GeoNet grundsätzliche Antworten auf häufig gestellte Fragen erarbeitet. Auf den folgenden Seiten erläutern sie, wie die geologische Speicherung von CO₂ durchgeführt werden kann, unter welchen Umständen sie möglich ist und welches die Kriterien für eine sichere und effiziente Umsetzung sind.

Abbildung 3
In den Kraftwerken wird CO₂ von den anderen Rauchgasen abgetrennt. Es wird dann verdichtet und per Pipeline oder Schiff zu seiner geologischen Speicherstätte transportiert: tiefe salinare Aquifere*, erschöpfte Öl- und Gasfelder oder nicht abbauwürdige Kohleflöze.

Abbildung 4

Vertikalschnitt durch den CO₂-Speicher im Sleipner-Feld, Norwegen. Das Erdgas, das dort aus einer Tiefe von 2500 m gefördert wird, enthält mehrere Prozent CO₂. Dieses muss entfernt werden, damit das Erdgas den handelsüblichen Standards entspricht. Anstatt das CO₂ in die Atmosphäre freizusetzen, wird es abgeschieden und in einer Tiefe von etwa 1000 m in den Utsira-Aquifer* injiziert.

© StatoilHydro



Wo und wieviel CO₂ können wir unterirdisch speichern?

CO₂ kann nicht einfach irgendwo in den Untergrund eingebracht werden. Für die CO₂-Speicherung braucht man poröse Gesteine mit ganz bestimmten Eigenschaften. Solche potenziell geeigneten Speichergesteine* gibt es in der ganzen Welt; sie bieten ausreichend Kapazität, um einen wesentlichen Beitrag zur Milderung des vom Menschen verursachten Klimawandels zu leisten.

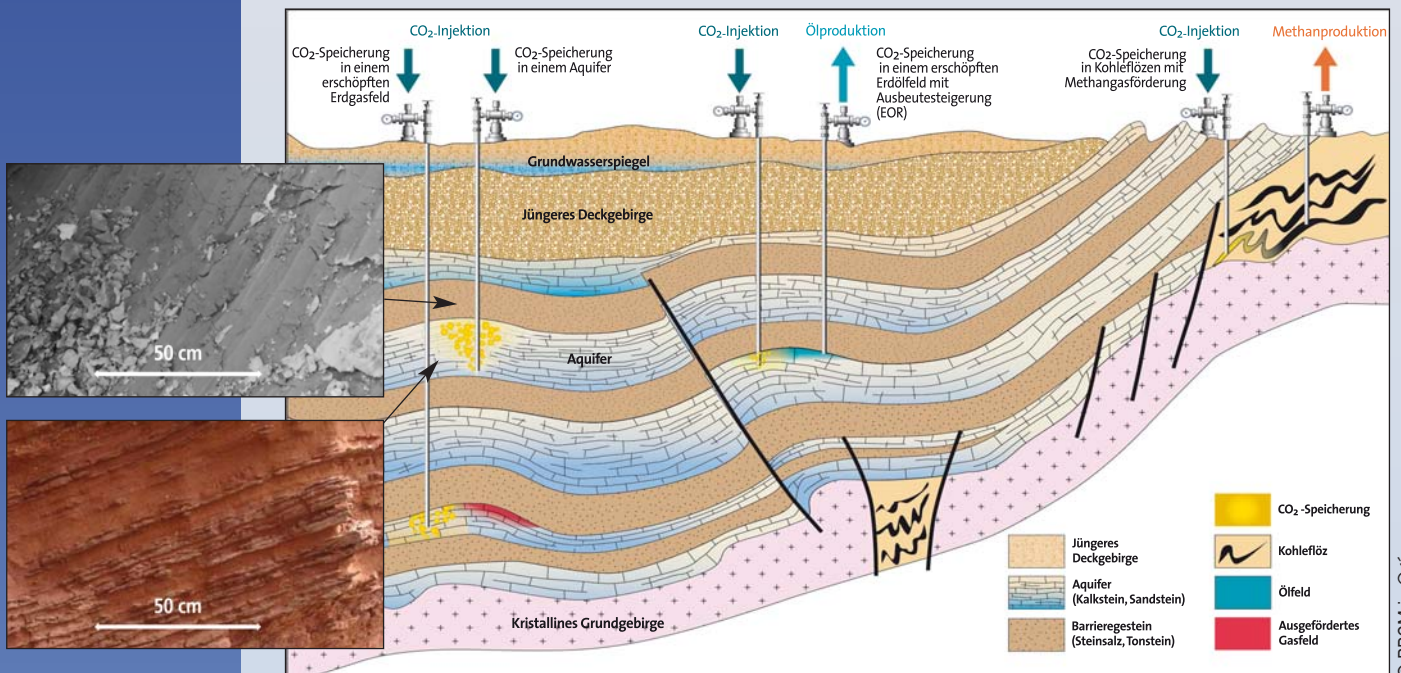


Abbildung 1
CO₂ wird in tief liegende, geologische Schichten porösen und durchlässigen Gesteins eingebracht (siehe Sandstein im unteren Einschubbild), das durch undurchlässiges Gestein überlagert wird (siehe Tonstein im oberen Einschubbild). Dieses hindert das CO₂ daran, sich in Richtung Erdoberfläche auszubreiten. Die wichtigsten Speichermöglichkeiten sind:

1. Erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, ggf. mit Ausbeutesteigerung (EOR*);
2. Salinare Aquifere*;
3. Tief liegende, nicht abbauwürdige Kohleflöze, lokal auch mit Methangasförderung.

Es gibt drei Speichermöglichkeiten für CO₂ (Abb. 1):

1. Erschöpfte Erdgas- und Ölfelder sind aufgrund der Kohlenwasserstoffexploration und -gewinnung gut erkundet und bieten sofort nutzbare Möglichkeiten für eine CO₂-Speicherung.
2. Salinare Aquifere* bieten ein größeres Speicherpotenzial, sind aber generell nicht so gut erforscht wie Kohlenwasserstoff-Lagerstätten.
3. Nicht abbauwürdige Kohleflöze – eine Option für die Zukunft, an der zur Zeit noch geforscht wird.

Die Speicher

Geeignete Speichergesteine* haben genügend Poren und Risse, in denen Fluide wie Gas, Formationswasser oder Öl zirkulieren können. Wenn CO₂ injiziert wird, verdrängt es diese Fluide aus dem Porenraum. Geeignete Wirtsgesteine für die geologische Speicherung von CO₂ sollten daher eine hohe Porosität* und Permeabilität* aufweisen und sind in Sedimentbecken* zu finden. Dort wechseln sich durchlässige Formationen mit undurchlässigen Gesteinen ab, die als Barriere wirken. Sedimentbecken* enthalten oft Erdöl- und Erdgaslagerstätten und natürliche CO₂-Ansammlungen, was beweist, dass sie Flüssigkeiten und Gase für lange Zeiträume sicher einschließen können.

Viele Abbildungen zu den möglichen CO₂-Speicheroptionen zeigen den geologischen Untergrund stark vereinfacht mit nur horizontalen Schichten. In der Wirklichkeit besteht er oft aus ungleich verteilten, manchmal gefalteten und von Störungen* durchzogenen Gesteinsformationen. Genaue Kenntnisse des Standorts und geowissenschaftliche Erfahrung sind erforderlich, um beurteilen zu können, ob bestimmte unterirdische Strukturen für die langfristige CO₂-Speicherung geeignet sind oder nicht.

Potenzielle CO₂-Speichergesteine* müssen vielen Kriterien genügen. Die wichtigsten davon sind:

- es muss hinreichend durchlässig sein (ausreichende Porosität* und Permeabilität*) und über genügend Speicherkapazität verfügen;
- es muss von einem undurchlässigen Barrieregestein* (z.B. Tonstein, Mergel, Salzgesteine) überlagert sein, das eine Migration des CO₂ nach oben verhindert;
- es muss eine strukturelle "Falle" (z.B. eine kuppelförmige Aufwölbung) aufweisen, die die seitliche CO₂-Ausbreitung einschränkt;
- es muss in einer Tiefe von mindestens 800 Metern liegen, damit das verdichtete, physikalisch überkritische* CO₂ durch die dort vorherrschenden Druck- und Temperaturverhältnisse in diesem Zustand hoher Dichte bleibt;

- es darf kein Süßwasser enthalten, das als Trinkwasserressource genutzt werden könnte.

Wo Speicherstandorte in Europa zu finden sind

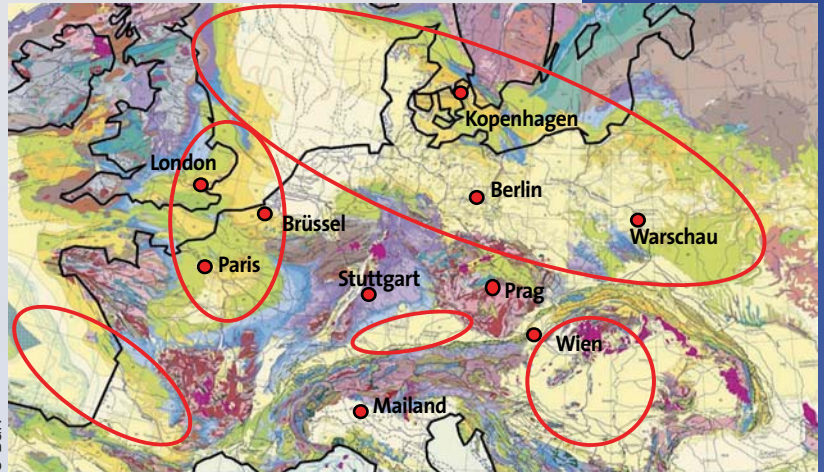
Sedimentbecken* sind in Europa weit verbreitet, zum Beispiel in der Nordsee oder im Vorland von Gebirgen (**Abb. 2**). Viele Gesteinsformationen in den europäischen Sedimentbecken* erfüllen die Kriterien für die geologische CO₂-Speicherung und werden derzeit von Forschern kartiert und charakterisiert. Andere Bereiche Europas, z.B. große Teile von Skandinavien, bestehen aus Kristallingesteinen und enthalten daher keine geeigneten Speichergesteine*.

Ein Bereich mit hohem Speicherpotenzial ist das Südliche Permbecken, das sich von England bis Polen erstreckt (in Abbildung 2 durch die größte Ellipse dargestellt). Auf die Sedimente haben Prozesse eingewirkt, die die Porenräume mit Sole*, Öl oder Erdgas gefüllt haben. Die Tonschichten zwischen den porösen Sandsteinschichten wurden zu Gesteinsschichten mit niedriger Permeabilität* komprimiert, was das Aufsteigen von Flüssigkeit verhindert. Viele Sandsteinformationen befinden sich in Tiefen zwischen 1 und 4 km, wo der Druck hoch genug ist, um CO₂ als dichte Phase zu speichern. Der Salzgehalt in den Formationswässern steigt in diesen Tiefen von etwa 100 g/l auf 400 g/l – mit anderen Worten, diese Solen* sind viel salziger als Meerwasser (35 g/l). Tektonische Bewegungen im Becken haben zu plastischen Verformungen der Steinsalz-Formationen geführt. Dadurch wurden Hunderte kuppelförmiger Strukturen geschaffen, in denen sich manchmal Erdgas sammelte. Diese fallenartigen Strukturen werden im Hinblick auf mögliche CO₂-Speicherstätten und Pilotprojekte untersucht.

Speicherkapazität

Kenntnisse über die CO₂-Speicherkapazität werden von Politikern, Aufsichtsbehörden und den Betreibern benötigt. Schätzungen der Speicherkapazität sind meistens sehr grobe Werte und basieren auf der räumlichen Ausdehnung potenziell geeigneter Formationen. Kapazitätsabschätzungen müssen für verschiedene Größenordnungen differenziert werden: vom überregionalen Maßstab bei nationalen Kapazitäten über Sedimentbecken* bis hin zu einzelnen Speicherstandorten. Für konkrete Speicherstandorte müssen detaillierte Kapazitätsberechnungen die Komplexität der realen geologischen Struktur berücksichtigen.

Volumetrische Kapazität: Veröffentlichte nationale Speicherkapazitätsabschätzungen basieren generell auf Berechnungen des Porenvolumens der Speicherformationen. Theoretisch kann die Speicherkapazität einer bestimmten Formation errechnet werden, indem man ihre Fläche mit ihrer Dicke, ihrer durchschnittlichen Porosität* und der durchschnittlichen Dichte des CO₂ unter Speicherbedingungen multipliziert. Da der



Porenraum mit Sole* gefüllt ist, kann jedoch nur ein kleiner Teil für die Speicherung von CO₂ genutzt werden, wobei man generell von 1-3% ausgeht (Speichereffizienz).

Realistische Kapazität: Für konkrete Speicherstätten können durch detaillierte Untersuchungen realistische Kapazitäten berechnet werden. Die Formationsdicke ist nicht immer konstant und die Eigenschaften eines Speichergesteins* können über kurze Entfernungen variieren. Durch detaillierte Kenntnis der Größe, Form und geologischen Eigenschaften des Speichers kann die Berechnung entsprechend genauer erfolgen als bei der volumetrischen Kapazität, die nur Durchschnittswerte berücksichtigt. Auf der Grundlage eines digitalen 3D-Modells der Speicherstätte kann die Injektion und Ausbreitung von CO₂ mit Computern simuliert werden, um eine realistische Speicherkapazität zu berechnen.

Praktikable Kapazität: Kapazität ist nicht nur eine Frage von geologischen Eigenschaften. Ob eine geeignete Speicherstätte genutzt wird oder nicht, hängt auch von sozio-ökonomischen Faktoren ab. So wird z.B. der Transport des CO₂ von der Quelle zum Speicherstandort durch die Transportkosten begrenzt. Die Kapazität hängt auch von der Reinheit des CO₂ ab. Letztlich treffen Politik und öffentliche Akzeptanz die Entscheidung darüber, ob eine verfügbare Speicherkapazität tatsächlich genutzt wird oder nicht.

Zusammenfassend wissen wir, dass es in Europa eine hohe Kapazität für die Speicherung von CO₂ gibt, selbst wenn es in Hinblick auf die Komplexität, die Verschiedenartigkeit und die sozioökonomischen Faktoren Unsicherheiten gibt. Das EU-Projekt GESTCO* schätzte die CO₂-Speicherkapazität in den Erdöl- und Erdgasfeldern im Nordseegebiet auf 37 Gt. Somit könnten große Anlagen in dieser Region über mehrere Jahrzehnte hinweg CO₂ injizieren. Die Aktualisierung und weitere Charakterisierung von Speicherkapazitäten in Europa ist Gegenstand laufender Forschung in den einzelnen Mitgliedsstaaten und in dem europaweiten Projekt Geocapacity*.

Abbildung 2
Geologische Karte von Europa mit den wichtigsten Sedimentbecken* (rote Ellipsen), die geeignete Gesteine für die CO₂-Speicherung aufweisen (modifiziert aus: Geologische Karte von Europa, 1:5.000.000).



Wie können wir große Mengen CO₂ transportieren und speichern?

Nachdem das CO₂ im Kraftwerk oder an der Industrieanlage abgeschieden worden ist, wird es verdichtet, transportiert und über eine oder mehrere Bohrungen in die Speicherformation eingebracht. Die ganze Prozesskette muss optimal abgestimmt sein, damit die Speicherung von mehreren Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr möglich ist.

Verdichtung

Sobald das CO₂ vom Rauchgas im Kraftwerk oder der Industrieanlage abgetrennt worden ist, wird der resultierende hochkonzentrierte CO₂-Strom getrocknet und zu einem überkritischen* Phasenzustand verdichtet, der wesentlich weniger Raum in Anspruch nimmt als Gas. Dadurch werden der Transport und die Speicherung effizienter (**Abb. 1**). Die Trocknung ist erforderlich, um einer Korrosion von Anlagen und Infrastruktur entgegenzuwirken sowie die Bildung von Hydraten (das sind eisähnliche Kristalle, die die Anlage und Rohre verstopfen können) zu vermeiden. Die Verdichtung wird zusammen mit der Trocknung in einem mehrstufigen Prozess, in wiederholten Zyklen von Kompression, Abkühlung und Wasserabscheidung, durchgeführt. Druck, Temperatur und Wassergehalt müssen jeweils an die Art des Transports und die Druckanforderungen am Speicherplatz angepasst werden. Die Hauptfaktoren für das Design der Kompressoranlage sind die Gasflussrate, der Ansaug- und der Verdichtungsdruck, die Wärmekapazität des Gases und die Effizienz des Kompressors. Die Kompressionstechnologie ist bereits verfügbar und in vielen Industriebereichen gängige Praxis.

Abbildung 1
Stationen der geologischen Speicherung von CO₂. Um CO₂ vom Ort seiner Emission zum Ort seiner sicheren und dauerhaften Speicherung zu bringen, muss es eine ganze Prozesskette durchlaufen: Abscheidung, Verdichtung, Transport und Injektion.

Transport

CO₂ kann per Schiff oder Pipeline transportiert werden. Der Schiffstransport von CO₂ für industrielle Zwecke wird derzeit nur in sehr kleinem Maße durchgeführt (10.000-15.000 m³). Er könnte aber für CCS*-Projekte, bei denen der CO₂-Emittent in der Nähe einer Küste, aber weit von einem geeigneten Speicherort entfernt

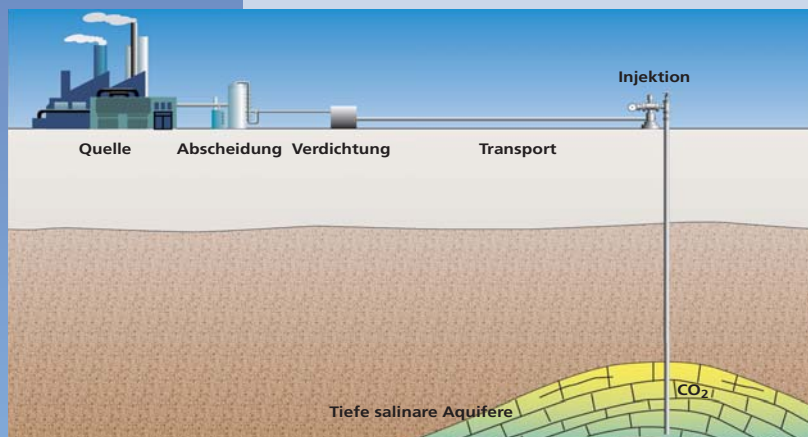
liegt, eine attraktive Option sein. Die für den Transport von Flüssiggas (LPG) verwendeten Schiffe sind als druckdichte und gekühlte Systeme für den CO₂-Transport im Flüssigzustand geeignet. Die neuesten LPG-Schiffe fassen Volumina von bis zu 200.000 m³ und können bis zu 230.000 t CO₂ transportieren. Allerdings bietet der Schiffstransport keinen stetigen CO₂-Fluss und am Hafen sind deshalb Anlagen zur Zwischenspeicherung erforderlich.

Der Pipeline-Transport von CO₂ wird schon heute im großen Maßstab von Ölgesellschaften durchgeführt, die mit Ausbeutesteigerung bei der Ölproduktion (Enhanced Oil Recovery*, EOR) arbeiten. Weltweit gibt es etwa 3000 km CO₂-Pipelines, die meisten davon in den USA. Dies ist wirtschaftlicher als der Schiffstransport und bietet außerdem den Vorteil des stetigen CO₂-Flusses von der Abscheidungsanlage bis zur Speicherstätte. Bestehende CO₂-Pipelines transportieren CO₂ unter hohen Druckverhältnissen im überkritischen* Zustand. Drei wichtige Faktoren bestimmen die Menge, die eine Pipeline fassen kann: ihr Durchmesser, der Transportdruck und dementsprechend ihre Wanddicke.

Injektion

Wenn das CO₂ am Speicherstandort ankommt, wird es unter Druck in das Speichergestein* eingebracht (**Abb. 2**).

Der Injektionsdruck muss höher sein als der Druck im Reservoir, um das Formationswasser vom Injektionspunkt zu verdrängen. Die Anzahl der Injektionsbohrungen hängt von der zu speichernden Gesamtmenge, der Injektionsrate (eingebrachtes CO₂-Volumen pro Stunde), der Permeabilität* und Dicke des Speicherhorizonts, dem für eine sichere Injektion maximal zulässigen Druck und der technischen Auslegung der Bohrung ab. Da das Hauptziel die dauerhafte Speicherung von CO₂ ist, müssen wir sicher sein, dass die Formation hydraulisch intakt ist. Hohe Injektionsraten können zu einem Druckanstieg am Injektionspunkt führen, insbesondere in Formationen mit geringer Permeabilität*. Der Injektionsdruck darf auf keinen Fall die Bruchgrenze von Speicher- und Barrieregestein* übersteigen. Mit Hilfe von geomechanischen Analysen und Modellen wird der maximale Injektionsdruck bestimmt, bei dem Brüche in der Formation vermieden werden. Chemische Prozesse können die Geschwindigkeit



© BRGM im@gé

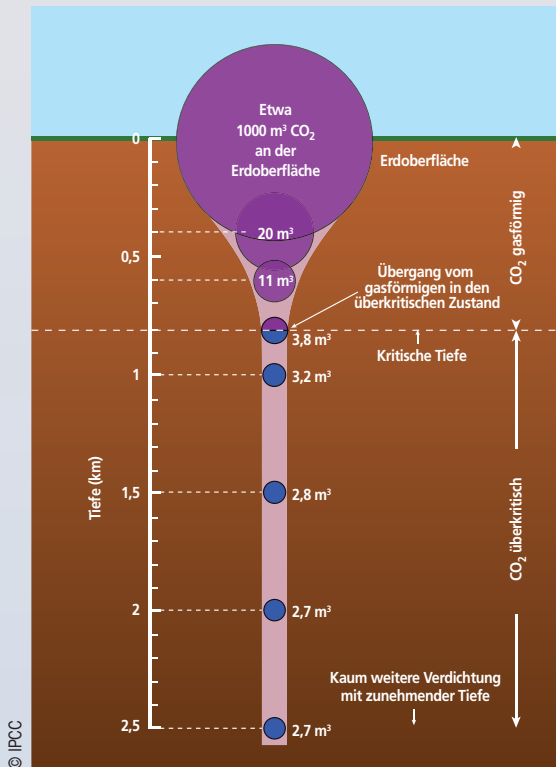


Abbildung 2
 Wenn das CO₂ in den Untergrund eingebracht wird, wird es bei etwa 0,8 km Tiefe zu einer überkritischen* Flüssigkeit. Sein Volumen wird dabei drastisch reduziert: von 1000 m³ an der Oberfläche auf 3,8 m³. Dies ist einer der Gründe, der die geologische Speicherung großer Mengen von CO₂ so attraktiv macht.

beeinträchtigen, mit der das CO₂ in die Formationen eingebracht werden kann. Abhängig von der Art des Speichergesteins*, der Zusammensetzung der Flüssigkeiten und der Speicherbedingungen (Temperatur, Druck, Volumen, Konzentration etc.), kann es in der Nähe der Bohrung zur Lösung oder Ausfällung von Mineralen kommen. Dies kann zu höheren oder niedrigeren Injektionsraten führen. Sobald das CO₂ eingebracht ist, löst es sich teilweise in dem salzigen Formationswasser. Dabei sinkt der pH*-Wert leicht, was durch die Auflösung von Karbonat-Mineralen im Wirtsgestein gepuffert werden kann. Karbonate sind die ersten Minerale, die sich auflösen, weil ihre Reaktionsgeschwindigkeit sehr hoch ist und die Auflösung mit der Injektion beginnt. Dieser Prozess kann die Porosität* und die Injektivität* des Gesteins erhöhen. Allerdings können die Karbonatminerale nach ihrer Auflösung auch wieder ausfallen und die Formation rund um die Bohrung zementieren. Hohe Injektionsraten können den Ausfällungsbereich in weiter entfernte Bereiche verschieben und dadurch die Permeabilitätsverringerung in der Nähe der Bohrung einschränken. Die Austrocknung des Gesteins ist ein weiteres durch Injektion hervorgerufenen Phänomen. Nach der Versauerungsphase löst sich das Restwasser, das um die Injektion herum verblieben ist, in dem eingebrachten, trockenen Gas auf, das seinerseits chemische Stoffe in der Sole* konzentriert. Wenn die Sole* ausreichend konzentriert ist, können Minerale (z.B. Salze) ausfallen

und dadurch wiederum die Permeabilität* im Bereich der Bohrung reduzieren. Die Injektivität* hängt also von den komplexen Wechselwirkungen ab, die lokal um die Injektionsbohrung auftreten, die wiederum von der Zeit und der Distanz zur Bohrung abhängen. Um diese Effekte einschätzen zu können, werden bereits im Vorfeld numerische Simulationen durchgeführt. Die Injektionsraten* müssen sorgfältig gesteuert werden, um diejenigen Prozesse in den Griff zu bekommen, die möglicherweise die Injektion der gewünschten CO₂-Menge begrenzen.

Zusammensetzung des CO₂-Stroms

Die Zusammensetzung (oder Reinheit) des CO₂-Stroms, die sich aus dem Abscheidungsprozess ergibt, hat einen erheblichen Einfluss auf alle nachfolgenden Verfahrensschritte eines CO₂-Speicherprojekts. Das Vorhandensein nur weniger Prozente anderer Substanzen wie Wasser, Schwefelwasserstoff (H₂S), Schwefel- und Stickoxide (SO_x, NO_x), Stickstoff (N₂) und Sauerstoff (O₂) verändert die physikalischen und chemischen Eigenschaften des CO₂-Stroms und damit sein Verhalten und seine Auswirkungen. Bei der Wahl der technischen Anlagen sowie der Entwicklung von Kompressions-, Transport- und Injektionsstrategien muss daher die Zusammensetzung des CO₂-Stroms sorgfältig bedacht werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Transport und die Injektion großer Mengen von CO₂ bereits jetzt machbar sind. Wenn die geologische Speicherung von CO₂ aber im industriellen Maßstab angewendet werden soll, müssen alle Phasen der Prozesskette auf das jeweilige Speicherprojekt zugeschnitten sein. Die Hauptparameter sind die thermodynamischen Eigenschaften des CO₂-Stroms (**Abb. 3**), die Injektionsraten* und die Reservoirbedingungen.

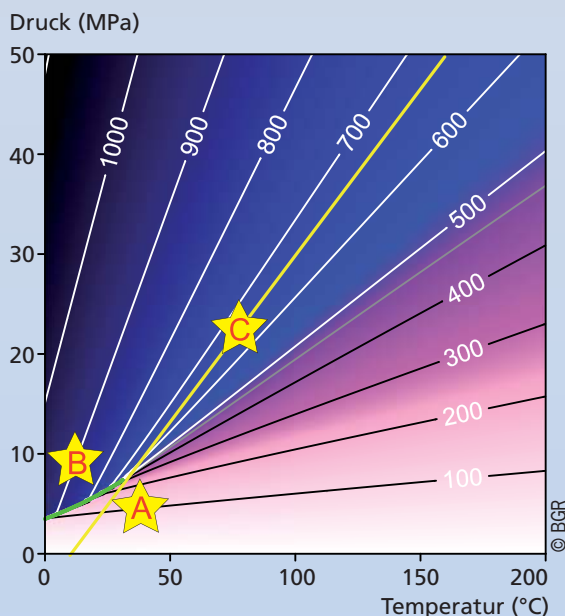


Abbildung 3
 Dichte von reinem CO₂ (in kg/m³) in Abhängigkeit von Temperatur und Druck. Die gelbe Linie entspricht einem typischen Druck- und Temperaturgradienten in Sedimentbecken*. In Tiefen von über 800 m (~8 MPa) ermöglichen die Reservoirbedingungen höhere Dichten (blaue Färbung). Die grüne Kurve ist die Phasengrenze zwischen gasförmigem und flüssigem CO₂. Typische Druck- und Temperaturbedingungen für CO₂ während der Prozesskette sind mit A (Abscheidung), B (Transport) und C (Speicherung) gekennzeichnet.

Was passiert mit dem CO₂, wenn es im Speicher ist?

Wenn das CO₂ in das Speichergestein* eingebracht worden ist, steigt es nach oben und füllt die Porenräume unter dem Barrieregestein* aus. Mit der Zeit wird ein Teil des CO₂ gelöst und irgendwann in Mineralen gebunden. Diese Vorgänge finden in unterschiedlichen Zeiträumen statt und tragen zur dauerhaften und sicheren Speicherung bei.

Rückhaltemechanismen

Wenn das CO₂ in einen Speicher eingebracht wird, füllt es die Porenräume im Gestein, die meistens bereits mit Sole* gefüllt sind.

Nach der Injektion des CO₂ wirken verschiedene Rückhaltemechanismen. Der erste Mechanismus gilt als der wichtigste und verhindert, dass das CO₂ wieder an die Erdoberfläche steigt. Die anderen erhöhen die Effizienz und Sicherheit der Speicherung im Laufe der Zeit.

1. Ansammlung unter dem Barrieregestein* (struktureller Rückhalt)

Da das dichte CO₂ "leichter" ist als Wasser, beginnt es, nach oben zu steigen. Diese Bewegung wird gestoppt, wenn das CO₂ auf eine undurchdringliche Gesteinsschicht trifft, das sogenannte Barrieregestein*. Da es normalerweise aus Ton oder Salz besteht, wirkt dieses Barrieregestein* als Verschluss und verhindert, dass das CO₂ weiter nach oben steigt. **Abbildung 1** zeigt die Aufwärtsbewegung des CO₂ durch die Porenräume des Gesteins, bis es das Barrieregestein* erreicht hat.

2. Bindung in kleinen Poren (kapillarer Rückhalt)

Es kommt zu einer Immobilisierung, wenn die Porenräume im Speichergestein* so eng sind, dass das CO₂ trotz der Dichtedifferenz zum Umgebungswasser nicht mehr aufsteigen kann. Dieser Vorgang tritt hauptsächlich während des Aufstiegs des CO₂ auf und bindet üblicherweise – je nach den Eigenschaften des Speichergesteins* – ein paar Prozent des eingebrachten CO₂.

3. Lösung (Lösungsrückhalt)

Ein Teil des eingebrachten CO₂ löst sich im Formationswasser – der in den Porenräumen des Speichergesteins* vorhandenen Sole*. Wasser mit gelöstem CO₂ ist schwerer als ohne gelöstes CO₂ und tendiert daher dazu, im Speicher nach unten zu sinken. Die Lösungsrate hängt von der Größe der Kontaktfläche zwischen CO₂ und Sole* ab. Es gibt eine maximale Konzentration, über die hinaus kein CO₂ mehr gelöst werden kann. Allerdings kommt es aufgrund der Aufwärtsbewegung des freien CO₂ und der Abwärtsbewegung des in Wasser gelösten CO₂ ständig zu neuen Kontakten zwischen Sole* und CO₂, wodurch wieder mehr CO₂ gelöst werden kann. Diese Vorgänge sind relativ langsam, weil sie in den engen Porenräumen stattfinden. Im Sleipner-Projekt schätzt man, dass sich 10 Jahre nach der Injektion grob 15% des eingebrachten CO₂ aufgelöst haben.

4. Mineralausfällung (mineralischer Rückhalt)

Das CO₂ kann insbesondere in Kombination mit dem Formationswasser mit den gesteinsbildenden Mineralen reagieren. Abhängig vom pH-Wert und der Mineralogie des Speichergesteins* können sich

Mikroskopansicht.

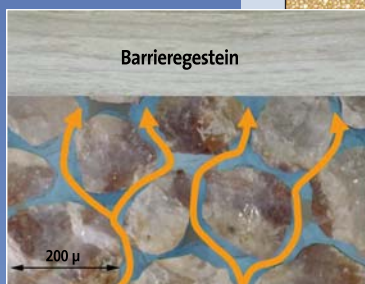
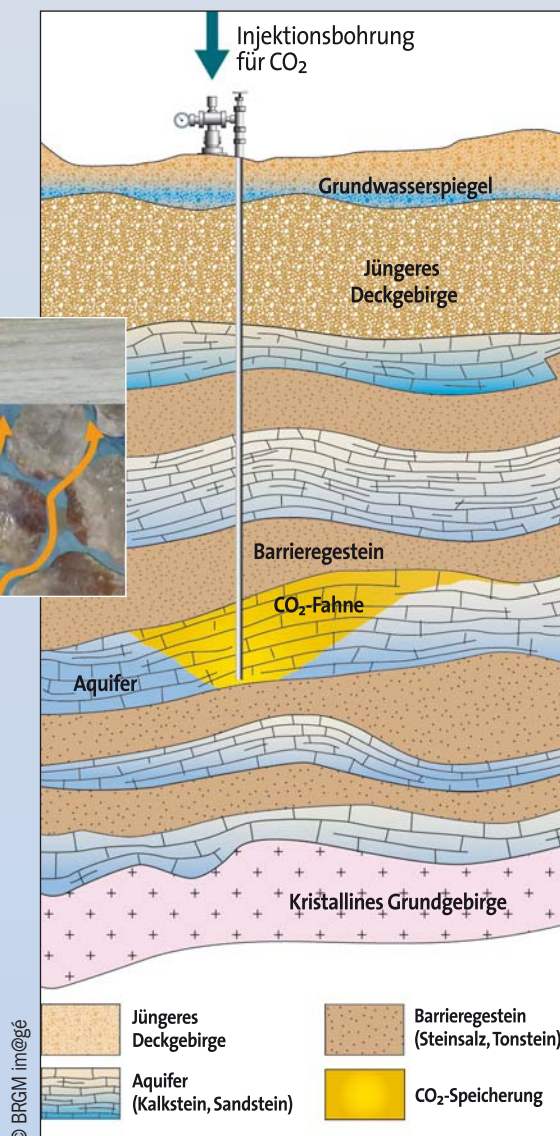


Abbildung 1
Das eingebrachte CO₂, das leichter ist als Wasser, steigt auf und wird von dem darüber liegenden undurchlässigen Barrieregestein* gestoppt.



© BRGM im@gé



Abbildung 2
CO₂ steigt nach oben (hellblaue Blasen), löst sich auf und reagiert mit Gesteinskörnern, wodurch sich Karbonate auf den Korngrenzen niederschlagen (weiß).

bestimmte Minerale auflösen, während andere ausfallen (**Abb. 2**). Nach Schätzungen für den Standort Sleipner wird dort auch nach sehr langer Zeit nur ein relativ kleiner Teil des CO₂ durch Mineralisierung gebunden. Nach 10.000 Jahren sollten nur 5% des eingebrachten CO₂ mineralisch gebunden sein, während 95% in Lösung gegangen sind und kein CO₂ als separate Phase übrig bleibt.

Die relative Bedeutung dieser Rückhaltemechanismen ist standortspezifisch, d.h. sie hängt von den Eigenschaften des jeweiligen Standorts ab. So verbleibt das CO₂ in kuppelförmigen Speicherstrukturen voraussichtlich auch über sehr lange Zeiträume hinweg in einer eigenständigen Phase, während in flachlagernden Speichern wie Sleipner das meiste CO₂ gelöst oder mineralisiert wird.

Abbildung 3 zeigt die vorhergesagte Entwicklung der Anteile der verschiedenen CO₂-Rückhaltemechanismen für das Sleipner-Projekt.

Woher wissen wir das alles?

Das Wissen um diese Vorgänge stammt insbesondere aus folgenden vier Quellen:

- **Labormessungen:** an Gesteinsproben können Experimente zu Fließeigenschaften, Mineralisierungs- und Lösungsprozessen durchgeführt werden, die Einblick in die kleinmaßstäblichen Vorgänge in Raum und Zeit geben.
- **Numerische Simulation:** mit Computerberechnungen kann das Verhalten von CO₂ über längere Zeiträume prognostiziert werden (**Abb. 4**). Laborexperimente werden zur Kalibrierung herangezogen.
- **Untersuchung natürlicher CO₂-Lagerstätten,** in denen CO₂ (normalerweise vulkanischen Ursprungs) für lange Zeiträume – häufig Millionen von Jahren – im Untergrund eingeschlossen war. Diese natürlichen Analoga* liefern uns Informationen über das Gasverhalten und die langfristigen Auswirkungen von CO₂ auf den Untergrund.

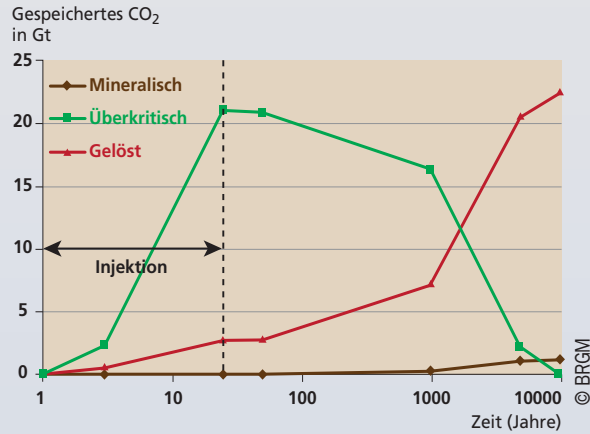


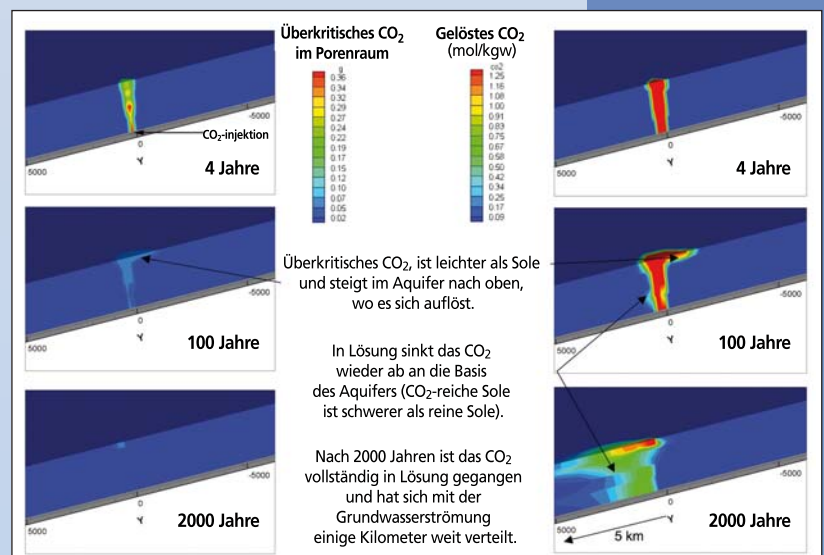
Abbildung 3
Anteile von verschiedenen Rückhaltemechanismen im CO₂-Speicher von Sleipner basierend auf numerischer Simulation. CO₂ wird durch die Mechanismen 1 und 2 in überkritischer* Form, durch Mechanismus 3 in gelöster Form und durch Mechanismus 4 in mineralischer Form im Untergrund eingeschlossen.

- **Überwachung bestehender Demonstrationsprojekte für die geologische Speicherung von CO₂,** wie Sleipner (vor der Küste von Norwegen), Weyburn (Kanada), In Salah (Algerien) und K12-B (vor der Küste der Niederlande). Die Ergebnisse von Kurzzeit-Simulationen können mit den im Feldversuch gewonnenen Daten verglichen werden und dadurch verbesserte Modelle liefern.

Nur durch ständige Kombination und Abgleich dieser vier Informationsquellen ist es möglich, verlässliche Kenntnisse über die Vorgänge 1000 m unter der Erdoberfläche zu gewinnen.

Zusammenfassend können wir sagen, dass die Sicherheit eines Standorts für die CO₂-Speicherung im Laufe der Zeit zunimmt. Die wichtigste Herausforderung ist, ein Speichergestein* mit einem geeigneten Barrieregestein* darüber zu finden, das für CO₂ undurchlässig ist (struktureller Rückhalt). Lösung, Mineralausfällung und kapillare Bindung tun ein Übriges, um das CO₂ dauerhaft und sicher im Untergrund zu binden.

Abbildung 4
3D-Modellierung der CO₂-Migration im salzwasserführenden Dogger-Aquifer* in Frankreich, nach der Injektion von 150.000 Tonnen über 4 Jahre. Links ist das überkritische* CO₂ und rechts das in Salzwasser aufgelöste CO₂ abgebildet, von oben nach unten 4, 100 und 2000 Jahre nach Beginn der Injektion. Die Simulation basiert auf Felddaten und Experimenten.



Kann CO₂ aus dem Reservoir entweichen und wenn ja, was wären die Folgen?

Ein Vergleich mit natürlichen CO₂-Lagerstätten zeigt, dass für sorgfältig ausgewählte Speicherstandorte keine Undichtigkeiten (Leckagen) zu erwarten sind. Natürliche CO₂-Vorkommen helfen uns, die Bedingungen zu verstehen, unter denen das Gas zurückgehalten oder freigesetzt wird. Darüber hinaus zeigen uns undichte natürliche Standorte, was die möglichen Auswirkungen von ausströmendem CO₂ sein könnten.

Leckagewege

Generell sind potenzielle Leckagewege entweder anthropogenen (Bohrungen) oder natürlichen Ursprungs (Kluftsysteme und Störungen*). Sowohl aktive als auch stillgelegte Bohrungen 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 (**Abb. 1**). Es gibt verschiedene Verfahren, eine Bohrung abzuteufen und neue Bohrungen sind generell sicherer als alte. Es wird aber erwartet, dass das von Bohrungen ausgehende Risiko gering ist, weil sie mit Hilfe sensibler geochemischer und geophysikalischer Methoden sehr effektiv überwacht werden können und es vielfältige Erfahrungen (aus der Erdöl/Erdgasindustrie) für gegebenenfalls erforderliche Abhilfemaßnahmen bei der Beseitigung von Problemen gibt.

Fließpfade entlang natürlicher Klüfte und Störungen*, die im Barrieregestein* oder Deckgebirge* existieren könnten, sind komplexer, weil es sich um ungleichmäßige Flächen mit variabler Permeabilität* handelt. Mit einem guten wissenschaftlichen und technischen Verständnis von dichten und undichten natürlichen Systemen können wir CO₂-Speicherprojekte entwerfen, die CO₂ und Methan

genau wie natürliche Lagerstätten für Tausende bis Millionen von Jahren sicher eingeschlossen haben.

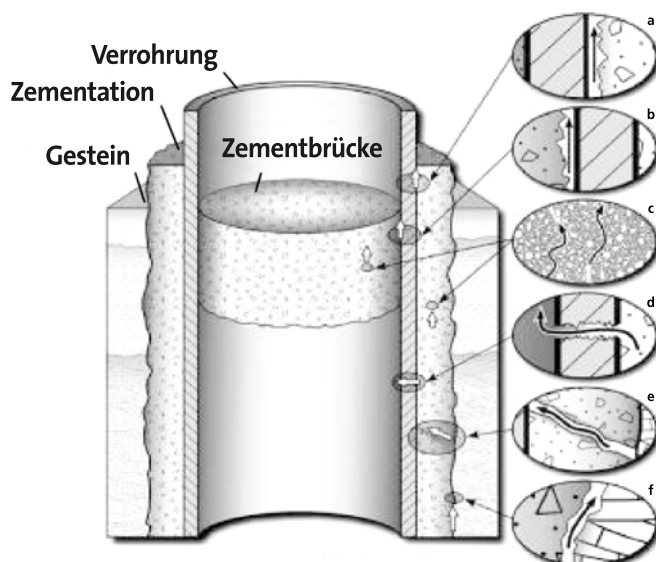
Was man von natürlichen CO₂-Lagerstätten lernen kann

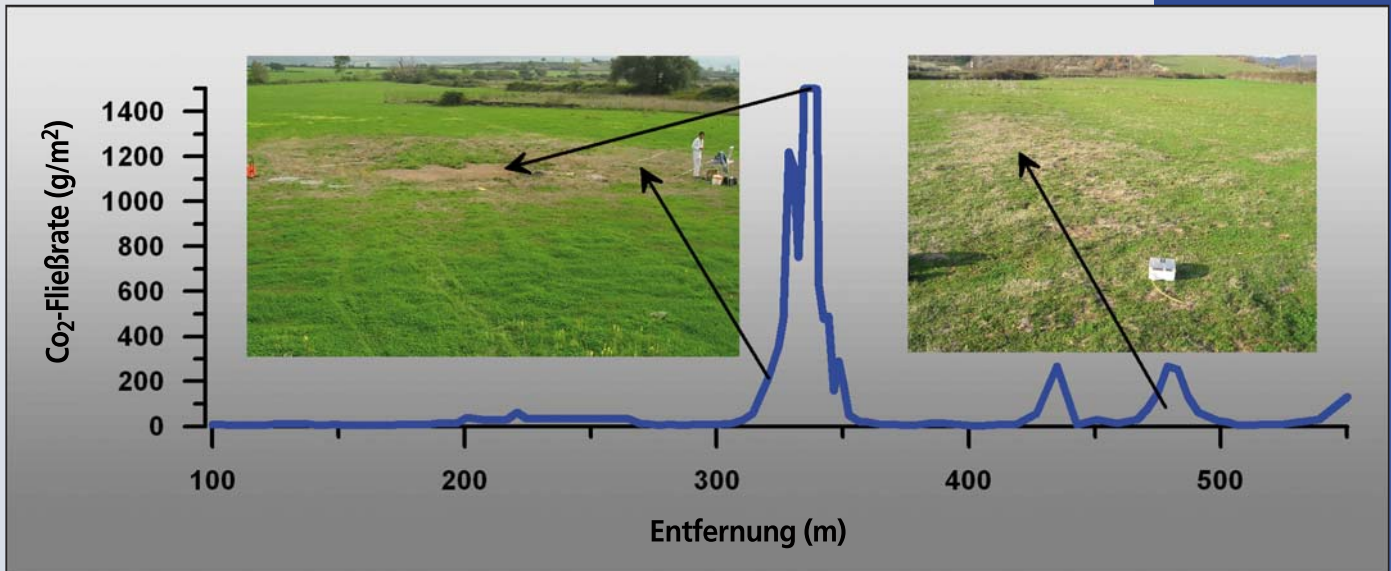
Natürliche Systeme (sogenannte Analoga) sind sehr wertvolle Informationsquellen, die unser Verständnis über das unterirdische Fließverhalten von Gas und über den Austausch von Gasen zwischen der Erde und der Atmosphäre verbessern. Die Haupteigenschaften aus der Untersuchung zahlreicher dichter und undichter natürlicher Analoga* sind:

- Unter günstigen geologischen Bedingungen kann natürlich entstandenes Gas für Hunderttausende bis Millionen von Jahren an Ort und Stelle gehalten werden.
- Isolierte Gaslagerstätten gibt es sogar unter denkbar ungünstigsten geologischen Rahmenbedingungen (vulkanische Gebiete).
- Die Migration einer größeren Menge von Gas erfordert Auftrieb oder Advektion (d.h. druckgetriebener Fluss), weil Diffusion ein sehr langsamer Prozess ist.
- Damit es zur Advektion kommt, muss der Speicherdruck (im Porenraum) nahe dem lithostatischen Druck* sein, um Klüfte und Störungen* offen zu halten oder neu zu bilden.
- Natürliche Gasaustrittsstellen finden sich fast ausschließlich entlang aktiver Störungen* in vulkanischen oder tektonisch aktiven Regionen.
- Erhebliche Entgasungen treten nur selten auf und konzentrieren sich auf stark gestörte vulkanische und geothermale Regionen, wo natürliches CO₂ kontinuierlich produziert wird.
- Gasaustritte an der Erdoberfläche haben meist eine geringe Ausdehnung und haben einen begrenzten räumlichen Einfluss auf ihre Umwelt.

Daher muss eine Kombination spezifischer Bedingungen zusammenkommen, bevor es zu einer Leckage kommen kann. Dementsprechend unwahrscheinlich ist es, dass ein gut ausgewählter und sorgfältig errichteter CO₂-Speicher undicht wird. Obwohl das Leckagepotenzial gering ist, müssen die damit zusammenhängenden Prozesse und Auswirkungen vollständig verstanden werden, um Standorte mit höchstmöglicher Sicherheit für die CO₂-Speicherung auszuwählen und zu betreiben.

Abbildung 1
Mögliche Leckagewege für CO₂ in einer Bohrung über Fugen (a, b, f) oder durch alteriertes Material (c, d, e).





Auswirkungen auf den Menschen

Wir atmen ständig CO₂ ein. CO₂ ist nur in stark erhöhten Konzentrationen gefährlich für den Menschen. Konzentrationen von etwa 5% verursachen Kopfschmerzen, Schwindelgefühl und Übelkeit. Darüber hinausgehende Konzentrationen können bei zu langer Exposition zu Bewusstlosigkeit und Tod führen. Wenn das CO₂ im Freien ausströmt, wird es jedoch schnell in der Luft verdünnt, auch bei nur schwachem Wind. Ein mögliches Risiko für die Bevölkerung ist somit auf Leckagen in geschlossenen Räumen oder in topographischen Senken beschränkt, wo sich CO₂, das dichter ist als Luft, am Boden anreichern kann.

Die Kenntnis der Eigenschaften von natürlichen Gasaustritten ist hilfreich bei der Gefahrenprävention und beim Gefahrenmanagement. Tatsächlich leben viele Menschen in Gegenden mit natürlichen CO₂-Austritten. In Ciampino, in der Nähe von Rom, gibt es Häuser in nur 30 m Entfernung von Gasaustrittsstellen, an denen täglich etwa 7 Tonnen CO₂ in die Atmosphäre strömen und die CO₂-Konzentration im Boden 90% erreicht. Die Bewohner schützen sich durch einfache Vorsichtsmaßnahmen – wie etwa die Häuser immer gut zu lüften und nicht im Keller zu schlafen.

Auswirkungen auf die Umwelt

Die möglichen Auswirkungen auf Ökosysteme variieren, je nachdem, ob sich der Speicherstandort an Land oder unter dem Meer befindet.

In marinen Ökosystemen wäre der Haupteffekt eines CO₂-Austritts die lokale Absenkung des pH-Werts und die damit zusammenhängenden Auswirkungen auf Lebewesen, die am Meeresboden leben und sich nicht wegbewegen können. Allerdings ist die Wirkung einer CO₂-Austrittsstelle räumlich begrenzt und das Ökosystem erholt sich nach Versiegen des CO₂ schnell wieder.

Bei den Ökosystemen an Land kann die Auswirkung im Wesentlichen wie folgt zusammengefasst werden:

- **Vegetation** – Obwohl erhöhte CO₂-Gaskonzentrationen im Boden (bis etwa 30%) Fruchtbarkeit und Wachstum von Pflanzen sogar begünstigen können, können über diesem Schwellenwert liegende Werte für einige – jedoch nicht alle – Pflanzen tödlich sein. Dieser Effekt ist aber auf die unmittelbare Umgebung um den Austrittsort beschränkt. In wenigen Metern Entfernung bleibt die Vegetation gesund (**Abb. 2**).
- **Grundwasserqualität** – Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers könnte sich verändern, da das Wasser saurer wird und möglicherweise Stoffe aus den Gesteinen und Mineralen des Aquifers* löst. Sollte CO₂ in einen Süßwasseraquifer eindringen, wären die Auswirkungen lokal begrenzt. Diese sind Gegenstand laufender Forschungsaktivitäten. In Europa sind viele Grundwässer mit natürlichem CO₂ angereichert und werden in Flaschen abgefüllt als Mineralwasser verkauft.
- **Gesteinsintegrität** – Die Ansäuerung des Grundwassers kann zu Lösungsprozessen im Gestein bis hin zur Bildung von Karstschloten führen. Allerdings tritt dies nur unter sehr spezifischen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen auf (tektonisch aktives Gebiet, Aquifere* mit hoher Durchflussgeschwindigkeit, karbonatreiche Mineralogie). Solche Bereiche werden bei der Auswahl von Speicherstandorten aber von vornherein vermieden.

Da die Auswirkungen einer angenommenen CO₂-Leckage vom jeweiligen Standort abhängen, können wir nur mit der genauen Kenntnis der dort vorherrschenden geologischen und strukturellen Rahmenbedingungen Gasverhalten und Migrationswege vorhersagen und mögliche Auswirkungen auf Mensch und Ökosystem bewerten bzw. verhindern.

Abbildung 2
Auswirkungen einer CO₂-Leckage auf die Vegetation bei hohem (links) und niedrigem (rechts) Gasfluss. Die Auswirkungen sind auf die unmittelbare Umgebung der CO₂-Austrittsstelle begrenzt.

Wie können wir die Speicher überwachen – an der Oberfläche, aber auch in der Tiefe?

Alle CO₂ Speicherstätten müssen aus betrieblichen, sicherheitstechnischen, umwelttechnischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Gründen überwacht werden. Eine Überwachungsstrategie muss definieren, was genau überwacht werden und wie dies erfolgen soll.

Wozu brauchen wir eine Überwachung?

Erst die Überwachung der Speicherstätte stellt sicher, dass das Hauptziel der geologischen Speicherung von CO₂ erreicht wird: die langfristige Isolierung des anthropogen erzeugten CO₂ von der Atmosphäre. Es gibt zahlreiche weitere Gründe für die Überwachung von Speicherstätten:

- **Betriebliche Gründe:** zur Kontrolle und Optimierung des Injektionsprozesses.
- **Sicherheits- und Umweltschutzgründe:** zum Schutz von Mensch, Tier und Ökosystem in der Nähe der Speicherstätte sowie die Erreichung der Klimaschutzziele.
- **Gesellschaftliche Gründe:** zur Schaffung von Transparenz über die Sicherheit eines Speicherbetriebs.
- **Finanzielle Gründe:** zur Überprüfung der tatsächlich gespeicherten CO₂-Mengen, um sie als „vermeidene Emissionen“ im Emissionshandelsprogramm der EU anrechnen lassen zu können.

Sowohl der natürliche Gashaushalt der Umwelt (die sogenannte „baseline“) als auch das Verhalten des Speichers müssen laut der EU-Richtlinie RL 2009/31/EG über CCS*, die am 25. Juni 2009 in Kraft getreten ist, überwacht werden. Die Betreiber müssen demonstrieren, dass der Speicherbetrieb den Bestimmungen entspricht und auch in ferner Zukunft noch entsprechen wird. Die Überwachung reduziert Unsicherheiten beim prognostizierten Verhalten der Speicherstätte und sollte daher auch nachhaltig mit dem Sicherheitsmanagement verbunden sein.

Was genau wird überwacht?

Die Überwachung kann verschiedene Bereiche und Prozesse des Speicherstandorts zum Ziel haben, zum Beispiel:

- Ausbreitung der CO₂-Fahne*. Die Ausbreitung des

CO₂ vom Injektionspunkt in den Speicher hinein muss nachvollzogen werden. Dazu stehen viele ausgereifte Methoden zur Verfügung, insbesondere die sogenannte 4D-Seismik, die bereits bei mehreren Demonstrations- und Pilotprojekten erfolgreich angewendet worden ist (**Abb. 1**). Durch die Überwachung der CO₂-Fahne* lassen sich Prognosen zur weiteren Ausbreitung des CO₂ kalibrieren und präzisieren.

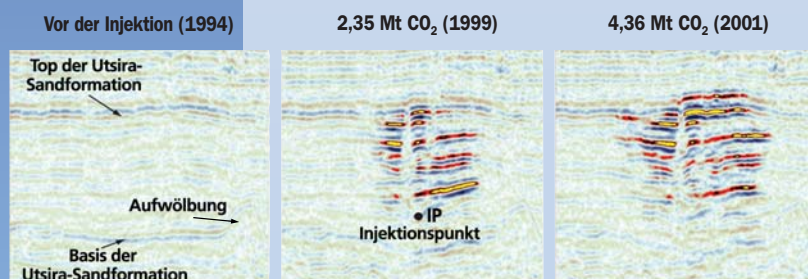
- **Integrität des Barrieregesteins*.** Die Überwachung ist wichtig, um den sicheren Einschluss des CO₂ im Speichergestein* zu überwachen und bei einer unerwarteten Aufwärtsbewegung des CO₂ frühzeitig warnen zu können. Besonders während der Injektionsphase, wenn die Druckverhältnisse im Speicher vorübergehend erheblich erhöht sein können, muss vermehrt auf die Stabilität des Barrieregesteins* geachtet werden.

- **Integrität der Bohrungen.** Dies ist ein wichtiger Punkt, weil Bohrungen potenziell einen direkten Migrationspfad an die Erdoberfläche bieten können. CO₂-Injektionsbohrungen oder alte, aufgegebene Bohrungen müssen während der Injektionsphase und darüber hinaus genau beobachtet werden, um ein unerwartetes Entweichen des CO₂ zu verhindern. Darüber hinaus dient die Überwachung zur Überprüfung, ob alle Altbohrungen effektiv versiegelt worden sind. Geophysikalische und geochemische Überwachungsmethoden, die in der Kohlenwasserstoffindustrie seit langem Standard sind, können in oder über Bohrungen als Frühwarnsystem installiert werden.

- **Deckgebirge*.** Bei vielen Speicherstätten finden sich über dem Barrieregestein* weitere geologische Schichten mit günstigen Speicher- und Barriereeigenschaften. Diese können als Sicherheitsreserve dienen, falls die primäre Barriere wider Erwarten undicht wird (sog. Multibarrierenkonzept). Entsprechend sollten sie auch überwacht werden. Die Methoden sind die gleichen wie für den eigentlichen Speicher.

- **Überwachung an der Erdoberfläche.** Um sicherzustellen, dass das eingebrachte CO₂ nicht an die Erdoberfläche gewandert ist, stehen eine Reihe geochemischer, biochemischer und Fernerkundungs-Methoden zur Verfügung. Mit diesen können Leckagen aufgespürt sowie die Verteilung des CO₂ im Boden, in der Atmosphäre und im Meer festgestellt und überwacht werden (**Abb. 2**).

Abbildung 1
Seismische Überwachung der CO₂-Fahne* im Sleipner Pilot-Projekt. Links: vor der Injektion („Baseline“), die 1996 begann; Mitte: 3 Jahre nach Beginn der Injektion (1999); rechts: 5 Jahre nach Beginn der Injektion (2001).



- Menge des gespeicherten CO₂. Obwohl die Menge des eingebrachten CO₂ leicht am Bohrloch gemessen werden kann, ist die Quantifizierung und Verifizierung im Reservoir technisch aufwändig. Im Falle einer Leckage muss die freigesetzte Menge quantifiziert werden, um in die nationale CO₂-Bilanz und den Emissionshandel einkalkuliert werden zu können.
- Bodenhebung. Der durch die CO₂-Injektion erhöhte Reservoirdruck kann zu geringfügiger Hebung führen. Hier stehen Fernerkundungsmethoden (Aufnahmen aus Flugzeugen oder von Satelliten) zur Verfügung, mit denen selbst geringste Bodenveränderungen gemessen werden können.
- Mikroseismizität*. In bestimmten Fällen kann die Injektion von CO₂ dazu führen, dass die Wahrscheinlichkeit von Mikroseismizität* erhöht wird. Deshalb muss auch die Mikroseismizität* ständig überwacht werden.

Wie wird überwacht?

Bei bestehenden Demonstrations- und Forschungsprojekten ist bereits eine breite Palette von Überwachungsmethoden zum Einsatz gekommen. Dazu gehören direkte Methoden, die das CO₂ selbst überwachen, und indirekte, die seine Auswirkungen auf Gestein, Flüssigkeiten und die Umwelt messen. Zu den direkten Methoden gehört die Analyse von Flüssigkeiten aus Bohrungen oder die Messung von Gaskonzentrationen im Boden und der Atmosphäre. Zu den indirekten Methoden gehören geophysikalische Messungen (Seismik), die Überwachung des Drucks in Bohrungen oder Messungen des pH-Werts im Grundwasser.

Eine Überwachung ist immer erforderlich, egal ob sich der Speicherort unter dem Meer oder an Land befindet. Die Wahl geeigneter Überwachungsmethoden hängt von den technischen und geologischen Eigenschaften der Speicherstätte und den Zielen der Überwachung ab. Es steht eine breite Palette von Methoden zur Verfügung

(Abb. 3), von denen viele in der Öl- und Gasindustrie gang und gäbe sind. Diese Techniken werden an die Spezifikationen von CO₂ angepasst. Es wird auch an der Optimierung bestehender Methoden und der Entwicklung innovativer Techniken geforscht, um die Auflösung und Verlässlichkeit zu verbessern, Kosten zu reduzieren, den Betrieb zu automatisieren und die Wirksamkeit der Speicherung zu demonstrieren.

Überwachungsstrategie

Die Überwachungsstrategie standortspezifisch angepasst sein. Berücksichtigt werden müssen insbesondere die Speicher-geometrie und -tiefe, die erwartete Ausbreitung der CO₂-Fahne*, potenzielle Leckagewege, die Geologie des Deckgebirges*, das Injektionsschema sowie geographische Parameter wie Topographie, Bevölkerungsdichte, Infra-struktur und Ökosysteme. Sobald die geeignetsten Messmethoden und -orte ausgewählt worden sind, müssen vor Beginn des Speicherbetriebs „Baseline“-Messkampagnen als Referenz für Abweichungen von der Norm erstellt werden. Außerdem muss jedes Überwachungsprogramm flexibel genug sein, um sich im Laufe eines Speicherprojekts weiterentwickeln zu können. Eine solche Überwachungsstrategie bildet eine wesentliche Komponente für die Risikoanalyse und Überprüfung der Sicherheit und Leistungsfähigkeit eines Standorts.

Zusammenfassend wissen wir, dass CO₂-Speicherstätten bereits jetzt mit den vielen auf dem Markt oder in Entwicklung befindlichen Methoden überwacht werden können. Die Forschung ist derzeit dabei, nicht nur neue Werkzeuge (insbesondere für den Meeresboden) zu entwickeln, sondern auch die Überwachungsqualität zu optimieren und die Kosten zu reduzieren.



© CO₂-GeoNet

Abbildung 2
Überwachungsboje mit Sonnenkollektoren zur Stromversorgung, Schwimmkörpern und einer Vorrichtung zur Entnahme von Gasproben am Meeresboden.

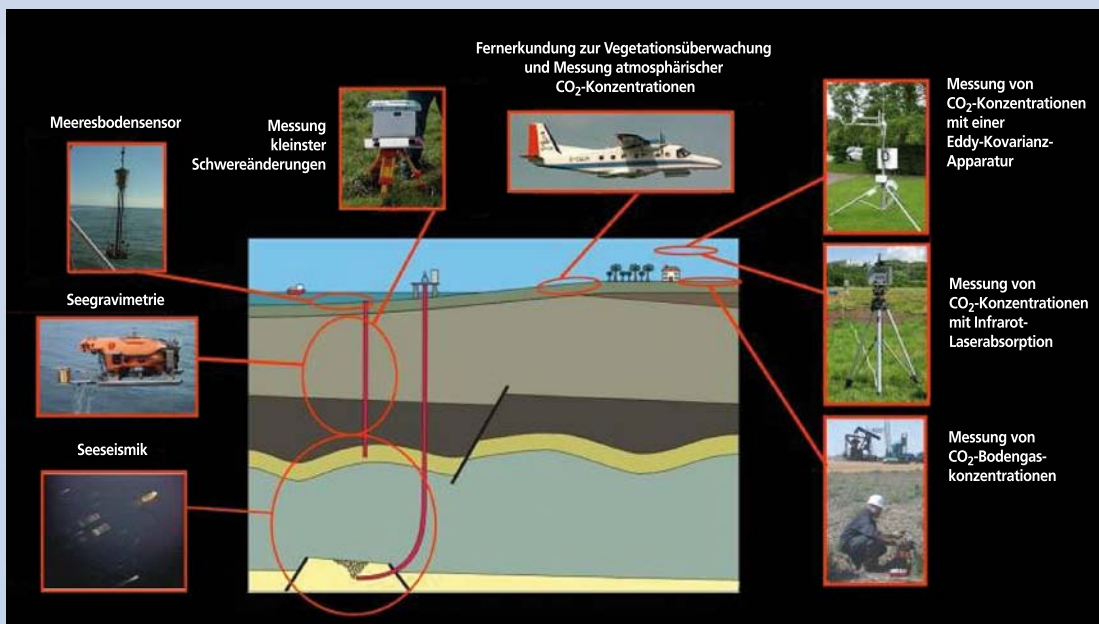


Abbildung 3
Kleine Auswahl verfügbarer Überwachungsmethoden für CO₂-Speicher und ihre Umgebung.

Welche Sicherheitskriterien müssen auferlegt und eingehalten werden?

Um Sicherheit und Effektivität der CO₂-Speicherung sicherzustellen, müssen von den Aufsichtsbehörden Auflagen für den Betrieb vorgeschrieben und von den Betreibern eingehalten werden.

Obwohl die CO₂-Speicherung inzwischen allgemein als möglicher Baustein zur Milderung des Klimawandels akzeptiert wird, müssen Sicherheitskriterien im Hinblick auf die menschliche Gesundheit und die lokale Umwelt erst noch aufgestellt werden. Erst dann kann die Technik im industriellen Maßstab eingesetzt werden. Diese Kriterien können als Anforderungen definiert werden, die den Betreibern von den Aufsichtsbehörden auferlegt werden, um sicherzustellen, dass auch auf lange Sicht keine Auswirkungen auf Gesundheit, Sicherheit und Umwelt (einschließlich der Grundwasserressourcen) zu erwarten sind. Das zentrale Thema bei der geologischen Speicherung von CO₂ ist ihre Dauerhaftigkeit. Leckagen werden daher eigentlich nicht erwartet. Trotzdem oder vielleicht gerade deshalb müssen Risiken eingeschätzt und die Frage 'was wäre wenn?' vom Betreiber beantwortet werden. Nach den Studien des Weltklimarates IPCC* muss das eingebrachte CO₂ mindestens 1000 Jahre lang im Untergrund bleiben, damit sich die atmosphärische CO₂-Konzentration stabilisieren oder sogar verringern kann. Dies geschieht durch natürlichen Austausch mit dem Wasser der Ozeane, wodurch der Anstieg der Oberflächentemperatur und die globale Erwärmung minimiert werden. Allerdings müssen die lokalen Auswirkungen eines CO₂-Speichers auf einer Zeitskala eingeschätzt werden, die von einigen Tagen bis hin zu Tausenden von Jahren reicht.

Jedes Speicherprojekt durchläuft im Laufe seiner Lebenszeit mehrere Stadien (**Abb. 1**). Während all dieser Stadien wird die Sicherheit gewährleistet durch:

- sorgfältige Charakterisierung und Auswahl von Standorten;

und damit Vermeidung von ungünstigen Wechselwirkungen mit der Bohrung, dem Speichergestein*, dem Barrieregestein* und – im Fall einer Leckage – mit dem darüber liegenden Grundwasser.

Sicherheitskriterien für ein Projekt

Vor der Aufnahme jeglicher Arbeiten muss die Sicherheit nachgewiesen werden. Bei der Auswahl des Standorts müssen folgende Komponenten überprüft werden:

- Speichergestein* und Barrieregestein*;
- das Deckgebirge* und hier insbesondere diejenigen undurchlässigen Schichten, die als Sekundärbarriere dienen könnten;
- Geologische Störungen* oder Bohrungen, die als potenzielle Migrationspfade an die Oberfläche dienen könnten;
- Trinkwasser führende Schichten;
- Besiedlungsdichte und Umweltschutzaspekte an der Erdoberfläche.

Zur Bewertung der Geologie und Geometrie des Speicherstandorts werden Methoden der Öl- und Gasexploration eingesetzt. Die Ausbreitung des CO₂, geochemische Wechselwirkungen und geomechanische Effekte können mit numerischen Simulationen langfristig prognostiziert werden. Auch die Parameter für eine effiziente Injektion können so ermittelt werden. Dementsprechend kann nach einer sorgfältigen Charakterisierung des Standorts ein sicheres, 'normales' Speicherverhalten definiert werden, bei dem wir davon ausgehen, dass das CO₂ im Speicher verbleiben wird. Eine Risikobewertung muss auch Abweichungen und weniger wahrscheinliche Szenarien bedenken, einschließlich unerwarteter Vorfälle. Insbesondere müssen potenzielle Leckagewege und ihre Auswirkungen vorausschauend bedacht werden (**Abb. 2**). Jedes Leckage-Szenario sollte durch Experten analysiert und - soweit möglich - numerisch modelliert werden, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens und den Schweregrad der Konsequenzen zu bewerten. Beispielsweise sollte die Entwicklung der CO₂-Fahne* sorgfältig kartiert werden, um mögliche Verbindungswege zu geologischen Störungen* frühzeitig zu identifizieren. Im Rahmen der Risikobewertung sollte die relative Bedeutung verschiedener Eingangsparameter und ihrer Unsicherheiten sorgfältig abgeschätzt werden. Die potenziellen Auswirkungen des CO₂ auf Mensch und Umwelt sollten durch Verträglichkeitsstudien geprüft werden, was in jedem Genehmigungsverfahren für industrielle Anlagen Standard ist. Bei diesem Verfahren

Abbildung 1
Die verschiedenen Stadien eines Speicherprojekts.



- Sicherheitsanalysen;
- den korrekten Betrieb;
- einen geeigneten Überwachungsplan;
- einen geeigneten Sanierungsplan.

Die damit zusammenhängenden Ziele sind:

- Dichtigkeit des Speichers;
- Bohrlochsicherheit;
- Bewahrung der Speichereigenschaften (einschließlich der Porosität*, Permeabilität* und Injektivität*);
- Erhalt der Undurchlässigkeit des Barrieregesteins*;
- Berücksichtigung der Zusammensetzung des CO₂-Stroms

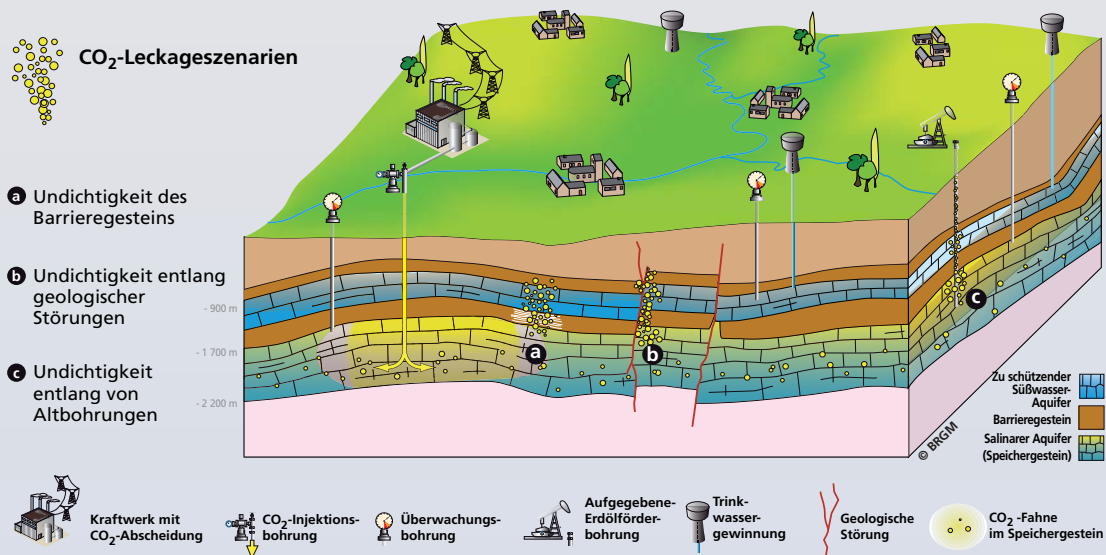


Abbildung 2
Beispiele potenzieller
Leckage-Szenarien.

werden sowohl normale als auch Leckage-Szenarien durchgespielt, um jegliche Risiken im Zusammenhang mit der Anlage abzuschätzen.

Kurz- und langfristige Überwachungsprogramme sollten entsprechend der Verträglichkeitsanalyse erstellt werden, um die im Rahmen der verschiedenen Szenarien festgelegten Parameter zu kontrollieren. Hauptziele sind die Darstellung der CO₂-Ausbreitung, die Überprüfung der Integrität von Bohrungen und Barrieregestein*, das Aufspüren von Leckagen und die Beurteilung der Grundwasserqualität. Der Abhilfe- und Schadenminderungsplan ist die letzte Komponente der Sicherheitsanalyse und enthält eine Liste von Korrekturmaßnahmen für den Fall einer Leckage oder unnormalen Verhaltens. Er berücksichtigt die Integrität des Barrieregesteins* und der Bohrungen, sowohl während als auch nach der Injektion, und beinhaltet auch extreme Abhilfemaßnahmen wie das Leerpumpen eines Speichers (Rückholbarkeit). Hierzu ist ausführliches Know-how aus den Standardmethoden der Erdöl- und Erdgasindustrie vorhanden, wie Bohrungsreparaturen, Reduzierung des Injektionsdrucks, partielle oder vollständige Gasrückförderung, Wasserförderung zur Druckreduzierung, Gasförderung aus oberflächennahen Horizonten usw.

Sicherheitskriterien während und nach der Betriebsphase

Das Hauptaugenmerk für die Sicherheit eines Speichers liegt auf der Betriebsphase. Nachdem die Injektion beendet ist, macht der Druckabfall den Speicherstandort sicherer. Das Vertrauen darauf, dass CO₂ sicher eingebracht und gelagert werden kann, beruht auf der bereits vorhandenen Erfahrung der Industrie. CO₂ ist ein alltägliches Produkt, das in diversen Industriezweigen verwendet wird, so dass die Handhabung dieser Substanz keine neuen Probleme aufwirft. Die Arbeitsprozesse und ihre Steuerung beruhen in erster Linie auf dem Know-how der Erdöl- und Erdgasindustrie, insbesondere der saisonalen Speicherung von Erdgas und den Methoden zur Ausbeutesteigerung bei der Ölförderung (EOR*). Die Hauptparameter, die gesteuert werden müssen, sind:

- der Injektionsdruck und die Flussrate – ersterer darf den

kritischen Druck zur Bruchbildung im Barrieregestein* nicht überschreiten;

- das injizierte Volumen, zum Abgleich mit den Modellprognosen;
- die Zusammensetzung des CO₂-Stroms;
- die Integrität der Injektionsbohrung(en) und aller anderen Bohrungen innerhalb und in der Nähe der CO₂-Fahne*;
- die Ausbreitung der CO₂-Fahne*;
- die Geländestabilität.

Während der Injektion muss das tatsächliche Verhalten des eingebrachten CO₂ wiederholt mit den Prognosen verglichen werden. Dadurch wird das Wissen über den Standort kontinuierlich verbessert. Wenn ein unerwartetes Verhalten entdeckt wird, sollten die Überwachungsprogramme aktualisiert und ggf. Korrekturmaßnahmen ergriffen werden. Wird eine Leckage vermutet, können geeignete Überwachungsmethoden auf einen bestimmten Bereich des Speicherstandorts, vom Reservoir bis zur Oberfläche, fokussiert werden. Diese würden den Aufstieg von CO₂ und eventuelle negativen Auswirkungen auf Grundwasser, Mensch und Umwelt entdecken.

Nach Abschluss der Injektion beginnt die Verschlussphase: Bohrungen müssen ordnungsgemäß verschlossen und stillgelegt, das Modellierungs- und Überwachungsprogramm aktualisiert und ggf. Korrekturmaßnahmen in Angriff genommen werden. Sobald das Risiko als ausreichend niedrig betrachtet wird, kann die Haftung für die Lagerung auf die nationalen Behörden übertragen und der Überwachungsplan minimiert oder später eingestellt werden.

Die europäische CCS*-Richtlinie 2009/31/EG schafft einen rechtlichen Rahmen für die Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂ und stellt sicher, dass CCS* einen realisierbaren Weg für den Klimaschutz darstellt, der sicher und verantwortlich begangen werden kann.

Zusammenfassend sind Sicherheitskriterien für den erfolgreichen industriellen Einsatz der CO₂-Lagerung wesentlich. Sie müssen an jeden einzelnen Speicherstandort angepasst werden. Die Sicherheitskriterien sind für die öffentliche Akzeptanz besonders wichtig und spielen eine wesentliche Rolle im Genehmigungsverfahren, bei dem die Aufsichtsbehörden über die Sicherheitsanforderungen entscheiden müssen.

Aquifer: durchlässige (poröse und permeable) Gesteinsformation, die Wasser enthält. Oberflächennahe Aquifere enthalten Süßwasser, das für die Trinkwassergewinnung verwendet wird. Die tiefer liegenden Schichten sind mit Sole* gefüllt, die für den menschlichen Verzehr ungeeignet ist. Solche Aquifere werden als salinare Aquifere bezeichnet.

Barrieregestein: undurchlässige Gesteinsschichten über einem Speichergestein*, die als Barriere gegen Flüssigkeits- und Gasbewegungen dienen.

CCS: international gebräuchliche Abkürzung für CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CO₂ Capture and Storage).

CO₂-Fahne: räumliche Verbreitung der freien CO₂-Phase im Gestein.

CSLF: Abkürzung für Carbon Sequestration Leadership Forum. Das CSLF ist eine internationale Initiative zum Klimaschutz, die ihren Schwerpunkt in der Entwicklung kosteneffektiver Technologien zu Abscheidung, Transport und langfristiger Lagerung von Kohlendioxid hat.

Deckgebirge: die geologischen Gesteinsschichten zwischen dem Barrieregestein* und der Erdoberfläche bzw. dem Meeresboden.

Enhanced Oil Recovery (EOR): Methode zur Ausbeutesteigerung bei der Erdölproduktion: durch Injektion von Flüssigkeiten oder Gasen (z.B. Heißdampf oder CO₂) in die Lagerstätte wird zusätzliches Öl mobilisiert.

Geocapacity: ein (abgeschlossenes) europäisches Forschungsprojekt zur Einschätzung der geologischen Speicherkapazität für anthropogene CO₂-Emissionen in Europa.

GESTCO: ein (abgeschlossenes) europäisches Forschungsprojekt zur Einschätzung der geologischen Speichermöglichkeiten für CO₂ in 8 Ländern (Norwegen, Dänemark, Großbritannien, Belgien, Niederlande, Deutschland, Frankreich und Griechenland).

IEA-GHG: Das F&E-Programm zu Treibhausgasen der Internationalen Energieagentur. Ziel ist die Bewertung von Technologien zur Reduzierung der Treibhausgasemission, die Verbreitung der Ergebnisse dieser Studien und die Benennung von Zielen für Forschung, Entwicklung und Demonstration und die Förderung der entsprechenden Arbeiten.

Injektivität: beschreibt, wie gut eine Flüssigkeit oder Gas (wie CO₂) in eine geologische Formation eingebracht werden kann. Sie wird definiert als die Injektionsrate geteilt durch die Druckdifferenz zwischen Bohrung und Formation am Injektionspunkt.

IPCC: Abkürzung für Intergovernmental Panel on Climate

Change (Weltklimarat). Diese Organisation wurde 1988 von der WMO (Weltorganisation für Meteorologie) und dem UNEP (Umweltprogramm der Vereinten Nationen) gegründet, um die für das Verständnis des Klimawandels und seiner Auswirkungen relevanten wissenschaftlichen, technischen und sozioökonomischen Informationen zu beurteilen. Das IPCC und Al Gore erhielten 2007 den Friedensnobelpreis.

Lithostatischer Druck: Umgebungsdruck, der auf ein Gestein in der Tiefe wirkt. Der lithostatische Druck wird von der überlagernden Gesteinssäule ausgeübt und nimmt mit der Tiefe zu.

Mikroseismizität: leichtes Zittern oder Vibration in der Erdkruste, welches durch verschiedene natürliche oder künstliche Auslöser verursacht werden kann.

Natürliches Analog: natürliche CO₂-Anreicherung oder Lagerstätte, deren Untersuchung unser Verständnis der langfristigen Entwicklung von CO₂ in tiefen geologischen Systemen verbessert. Es gibt sowohl dichte als auch undichte natürliche CO₂-Lagerstätten.

Permeabilität: Fähigkeit von porösen Gesteinen zur Durchleitung einer Flüssigkeit; sie ist ein Maß dafür, wie leicht Flüssigkeit unter einem Druckgradienten fließt.

pH: Maß für den Säuregrad einer Lösung.

Porosität: Anteil des Porenraums am Gesamtvolumen eines Gesteins in Prozent. Der Porenraum eines Gesteins ist mit verschiedenen Flüssigkeiten oder Gasen gefüllt – normalerweise Wasser. Aber auch Öl, Erdgas oder natürlich gebildetes CO₂ können in den Gesteinsporen vorhanden sein.

Sedimentbecken: Senke, in der über geologische Zeiträume Sedimentgesteine in Schichten übereinander abgelagert werden. Die bekanntesten Sedimentgesteine sind Tonstein, Sandstein, Kalkstein, Mergel, Gips und Steinsalz.

Sole: sehr salziges Wasser, d.h. mit einer hohen Konzentration an gelösten Salzen.

Speichergestein: Gesteinsformation, die ausreichend porös und permeabel ist, um CO₂ aufzunehmen und zu lagern. Sandstein und Kalkstein sind die am häufigsten vorkommenden Speichergesteine.

Störung: Eine Zone im Gestein, entlang derer Scherbewegungen den ursprünglichen Gesteinsverband durchtrennt und versetzt haben.

Überkritisch: Phasenzustand oberhalb von bestimmten Drücken und Temperaturen (CO₂: 7,38 MPa und 31,03°C), der weder flüssig noch gasförmig ist. Überkritisches CO₂ verhält sich wie ein Gas, hat aber eine Dichte wie eine Flüssigkeit.

Weiterführende Informationen:

CCS-Sonderbericht des Weltklimarats IPCC:

http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

CCS-Webseite der Europäischen Kommission:

<http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/>

Europäische CCS-Richtlinie:

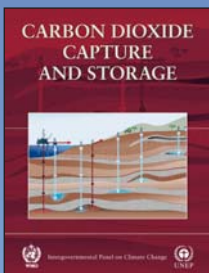
http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccp1_en.htm

ETS-System:

<http://ec.europa.eu/environment/climat/emission.htm>

Webseite der IEA GHG über Überwachungsmethoden:

http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html



Was CO₂GeoNet für Sie tun kann

CO₂GeoNet ist ein Europäisches Exzellenznetzwerk, das unabhängige wissenschaftliche Informationen über die Sicherheit und Effizienz der geologischen CO₂-Speicherung bereitstellt. Der Verbund umfasst mehr als 150 Wissenschaftler an 13 öffentlichen Forschungsinstituten, die in allen Aspekten der Forschung zur geologischen CO₂-Speicherung international hoch angesehen sind. Das Netzwerk wurde von der Europäischen Kommission im Rahmen des 6. Rahmenprogramms gefördert.

Diese Institute sind an CO₂GeoNet beteiligt:

BGR , BGS , BRGM , GEUS , Heriot Watt University , IFP , Imperial College , NIVA , OGS , IRIS , SINTEF , TNO , Sapienza Universität in Rom .

Aktivitäten des Netzwerks

Die Forscher des Netzwerks arbeiten zusammen, um das Wissen über die geologische CO₂-Speicherung kontinuierlich zu erweitern und die Werkzeuge für eine sichere Anwendung weiter zu verbessern. Sie sind in mehreren hochkarätigen Forschungsprojekten mit allen Aspekten dieses Themas befasst: Speichergestein*, Barrieregestein*, potenzielle Wege der CO₂-Migration an die Oberfläche, mögliche Auswirkungen auf Menschen und lokale Ökosysteme im Falle einer Leckage sowie Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation.

Die Stärke von CO₂GeoNet liegt in seiner Fähigkeit, multidisziplinäre Teams von sehr erfahrenen Spezialisten zu bilden und dadurch die individuellen Facetten der geologischen Speicherung und ihre Wechselwirkungen untereinander und in einem übergeordneten System besser zu verstehen.

Neben seinen Forschungsaktivitäten bietet CO₂GeoNet außerdem:

- Schulung und Förderung von Wissenschaftlern und Ingenieuren, die für die Umsetzung der Technologie gebraucht werden;
- wissenschaftliche Beratung und Prüfung von Projektvorschlägen (geotechnische Qualität, Umweltschutz, Risikomanagement, Planungs- und behördliche Fragen usw.);
- unabhängige, neutrale Informationen auf der Grundlage eigener Forschungsergebnisse;
- Dialog mit allen Akteuren und Betroffenen.

Um die öffentliche Akzeptanz für die geologische CO₂-



Speicherung als praktikablen Beitrag zum Klimaschutz zu verbessern, hat CO₂GeoNet die grundlegende Frage „Was bedeutet eigentlich geologische Speicherung von CO₂?“ in Angriff genommen. Ein Gremium exzellenter CO₂GeoNet-Wissenschaftler hat Antworten auf sechs Fragen zu diesem Thema erarbeitet, die auf dem neusten Stand der Technik sind. Sie basieren auf zehn Jahren europäischer Forschung und den praktischen Erfahrungen bei weltweiten Demonstrationsprojekten. Mit der vorliegenden Broschüre sollen einem breiten Publikum klare und unparteiische wissenschaftliche Informationen zugänglich gemacht und der Dialog über die geologische CO₂-Speicherung gefördert werden. Die englische Originalausgabe wurde beim ersten Schulungs- und Dialogworkshop des Netzwerks präsentiert, der am 3. Oktober 2007 in Paris stattfand. Die Teilnehmer des Workshops waren Vertreter von Interessenverbänden und Industrie, Ingenieure und Wissenschaftlicher, politische Entscheidungsträger, Journalisten, NROs, Soziologen, Lehrer und Studierende – insgesamt 170 Menschen aus 21 verschiedenen Ländern. Der Workshop gab ihnen die Möglichkeit, Standpunkte zu diskutieren und das Wissen über die geologische CO₂-Speicherung zu erweitern.

Wenn Sie weitere Informationen wünschen oder sich für eine ähnlich gestaltete Schulung über die geologische CO₂-Speicherung interessieren, wenden Sie sich bitte an das Sekretariat von CO₂GeoNet unter info@co2geonet.com, oder besuchen Sie unsere Website unter www.co2geonet.eu.

CO₂GeoNet

Das Europäische Exzellenznetzwerk für die geologische Speicherung von CO₂



www.co2geonet.eu

Sekretariat: info@co2geonet.com

BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFP**, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Sapienza University of Rome Dip. Scienze della Terra.

ISBN : 978-2-7159-2456-7