

Geologische Methoden

## Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee

Die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund der Nordsee ist technisch machbar und wird bereits seit Jahrzehnten unter norwegischen Gewässern praktiziert. Auch unter der deutschen Nordsee existieren Gesteinsformationen, in denen sich vermutlich große Mengen Kohlendioxid speichern ließen. Dennoch bleiben wichtige Fragen offen, die in der Forschungsmission CDRmare adressiert und beantwortet werden sollen – mit dem Ziel, ein Demonstrationsprojekt zur Kohlendioxid-Speicherung im geologischen Untergrund der deutschen Nordsee zu ermöglichen.

## Die dauerhafte Speicherung von Kohlendioxid im Meeresuntergrund

**In der naturwissenschaftlichen Klimaforschung herrscht Konsens: Die Menschheit wird den Klimawandel und seine zunehmenden Folgen und Risiken nur dann eindämmen, wenn sie die Menge ihrer jährlichen Kohlendioxid-Emissionen in die Atmosphäre auf eine rechnerische Null reduziert (netto null). Deutschland beispielsweise strebt eine ausgeglichene Bilanz seiner Treibhausgasemissionen (einschließlich Methan und Lachgas) bis zum Jahr 2045 an.**

Vom Menschen verursachte Kohlendioxidemissionen entstehen durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle sowie durch Veränderungen der Landnutzung, etwa durch das Brandrodung von Wäldern, die Umwandlung von Grün- in Ackerland oder das Trockenlegen von Feuchtgebieten. Bislang weiß niemand, wie die Menschheit diese Emissionen künftig voll-

ständig auf ökologische und sozialverträgliche Weise vermeiden kann. Vielmehr gehen Expert:innen davon aus, dass die Menschheit auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch Restmengen an Kohlendioxid emittieren wird. Deren Höhe liegt voraussichtlich bei 5 bis 15 Prozent der aktuellen Emissionen. Sie entstehen zum Beispiel bei der Zement- und Stahlherstellung, im Luftverkehr und beim Schwerlasttransport, in der Landwirtschaft, aber auch bei der Müllverbrennung.

Um diese Rest-Emissionen auszugleichen, wird der Mensch Kohlendioxid im selben Umfang aus der Atmosphäre entnehmen müssen. Anschließend muss das Gas sicher eingelagert werden. Einige der Rest-Emissionen lassen sich aber auch von vornherein vermeiden, indem ihre Freisetzung in die Atmosphäre verhindert wird. Dazu wird das Kohlendioxid an seiner Quelle abgeschieden

Deutschlands einzige Hochseeinsel Helgoland besteht aus Sandsteinformationen, wie Geolog:innen sie auch in großer Tiefe unter dem Meeresboden der Nordsee finden und als Speicher für abgeschiedenes Kohlendioxid vorschlagen.

Foto: Frederic Diercks, Pixabay



und anschließend dauerhaft unterirdisch gespeichert. Fachleute bezeichnen diese technologische Option zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen als Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (englisch: carbon capture and storage), kurz CCS.

Mit ihr sollen künftig nicht nur unvermeidbare Kohlendioxid-Emissionen der Industrie verhindert werden, die Einlagerung von Kohlendioxid im Untergrund ist auch zentraler Bestandteil wichtiger CO<sub>2</sub>-Entnahmefethoden wie Direct Air Capture und Bioenergiegewinnung mit Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (BECCS).

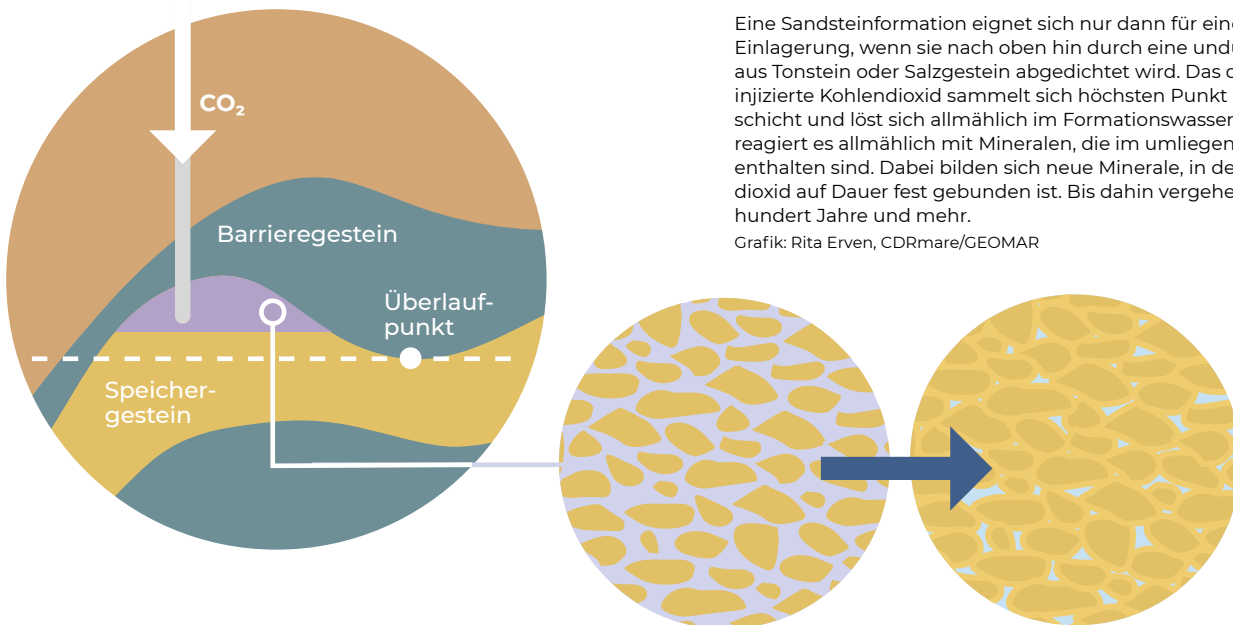
Als geologische Kohlendioxid-Speicher eignen sich in erster Linie Sandsteinformationen, die man sowohl an Land als auch im tiefen Untergrund der Schelfmeere (800 Meter und tiefer) findet. Diese Gesteinsschichten weisen Poren zwischen den einzelnen Sandkörnern auf, in denen sich das eingeleitete Kohlendioxid ausbreiten kann. Voraussetzung für eine dauerhafte Speicherung ist, dass die Speichergesteine von einer geeigneten Barrierschicht, z. B. aus Tonstein oder Salzgestein, überlagert werden. Eine solche Schicht dichtet das Speichergestein ab und verhindert ein Aufsteigen und mögliches Entweichen des eingeleiteten Kohlendioxids.

Erfüllt ein Speicherstandort diese und weitere geologische Voraussetzungen, kann das abgeschiedene Kohlendioxid komprimiert und über eine oder mehrere Bohrungen in die Speicherformationen injiziert werden. Dort breitet sich das Kohlendioxid in den mit sehr salzigem Wasser gefüllten Gesteinsporen aus und löst sich allmählich darin auf. Expert:innen nennen dieses salzige Porenwasser auch »Formationswasser«. Da das injizierte Kohlendioxid leichter ist als das Formationswasser, steigt es im Speichergestein auf, sammelt sich am höchsten Punkt unter der Barrierschicht und verbleibt so im Speichergestein.

Im Laufe der Zeit reagiert das im Porenwasser gelöste Kohlendioxid dann chemisch mit dem umliegenden Sandstein, oder genauer gesagt mit einigen im Sandstein enthaltenen Mineralen. Diese kann es auflösen oder umwandeln und so neue Minerale bilden. Welche chemischen Prozesse hierbei in welcher Geschwindigkeit ablaufen, hängt von den im Speichergestein enthaltenen Mineralen und ihrer Reaktionsfreudigkeit ab. Bei der Reaktion mit bestimmten Mineralen können Karbonate entstehen, in denen das Kohlendioxid chemisch für Jahrtausende fest gebunden wird. Bis es so weit ist, vergehen aber einige hundert Jahre und mehr.

Eine Sandsteinformation eignet sich nur dann für eine Kohlendioxid-Einlagerung, wenn sie nach oben hin durch eine undurchlässige Schicht aus Tonstein oder Salzgestein abgedichtet wird. Das durch ein Bohrloch injizierte Kohlendioxid sammelt sich am höchsten Punkt unter der Barrierschicht und löst sich allmählich im Formationswasser. Anschließend reagiert es allmählich mit Mineralen, die im umliegenden Sandgestein enthalten sind. Dabei bilden sich neue Minerale, in denen das Kohlendioxid auf Dauer fest gebunden ist. Bis dahin vergehen jedoch einige hundert Jahre und mehr.

Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR



## Kohlendioxid-Speicherprojekte in der Nordsee

**Die Nordsee weist viele Gebiete auf, die sich für die Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund eignen könnten. Berechnungen zufolge könnten etwa 150 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> in ihren unterirdischen Sandsteinformationen eingelagert werden. Als Schelfmeer ist die Nordsee zudem nicht besonders tief. Ihre maximale Wassertiefe beträgt in deutschen Gewässern gerade einmal 60 Meter, was den Aufbau oder die Installation von Injektionseinrichtungen auf Plattformen und am Meeresboden vergleichsweise einfach macht.**

Einige Nordsee-Anrainerstaaten injizieren Kohlendioxid bereits heute tief in den Meeresuntergrund oder stehen kurz vor der Errichtung von CCS-Projekten. Den Auftakt machte der norwegische Erdölkonzern Equinor (ehemals Statoil) im Jahr 1996: Nachdem die Regierung Norwegens eine landesweite Kohlendioxidsteuer eingeführt hatte, wurde das im Erdgas enthaltene Kohlendioxid nicht mehr in die Atmosphäre freigesetzt, sondern vor Ort auf der Offshore-Produktionsplattform abgetrennt und in eine Sandsteinformation tief unter der Plattform injiziert.

Andere Firmen und Länder folgen nun diesem Beispiel, denn aufgrund der steigenden Preise für Kohlendioxid-Emissionszertifikate wird die Speicherung des Treibhausgases im tiefen Meeresuntergrund allmählich zum lohnenden Geschäft. Eine Tonne CO<sub>2</sub> abzuscheiden, über eine Pipeline in das Meeresgebiet hinauszuleiten und dort im Untergrund zu verpressen, kostet schätzungsweise 50 bis 150 Euro. Zertifikate zur Emission

der gleichen Menge Kohlendioxid in die Atmosphäre kosteten Anfang des Jahres 2022 etwa 80 Euro. Derzeit werden mehrere neue Projekte zur Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der Nordsee geplant und umgesetzt – so zum Beispiel vor der Küste Rotterdams (Niederlande), unter der dänischen und britischen Nordsee sowie unter norwegischen Gewässern.

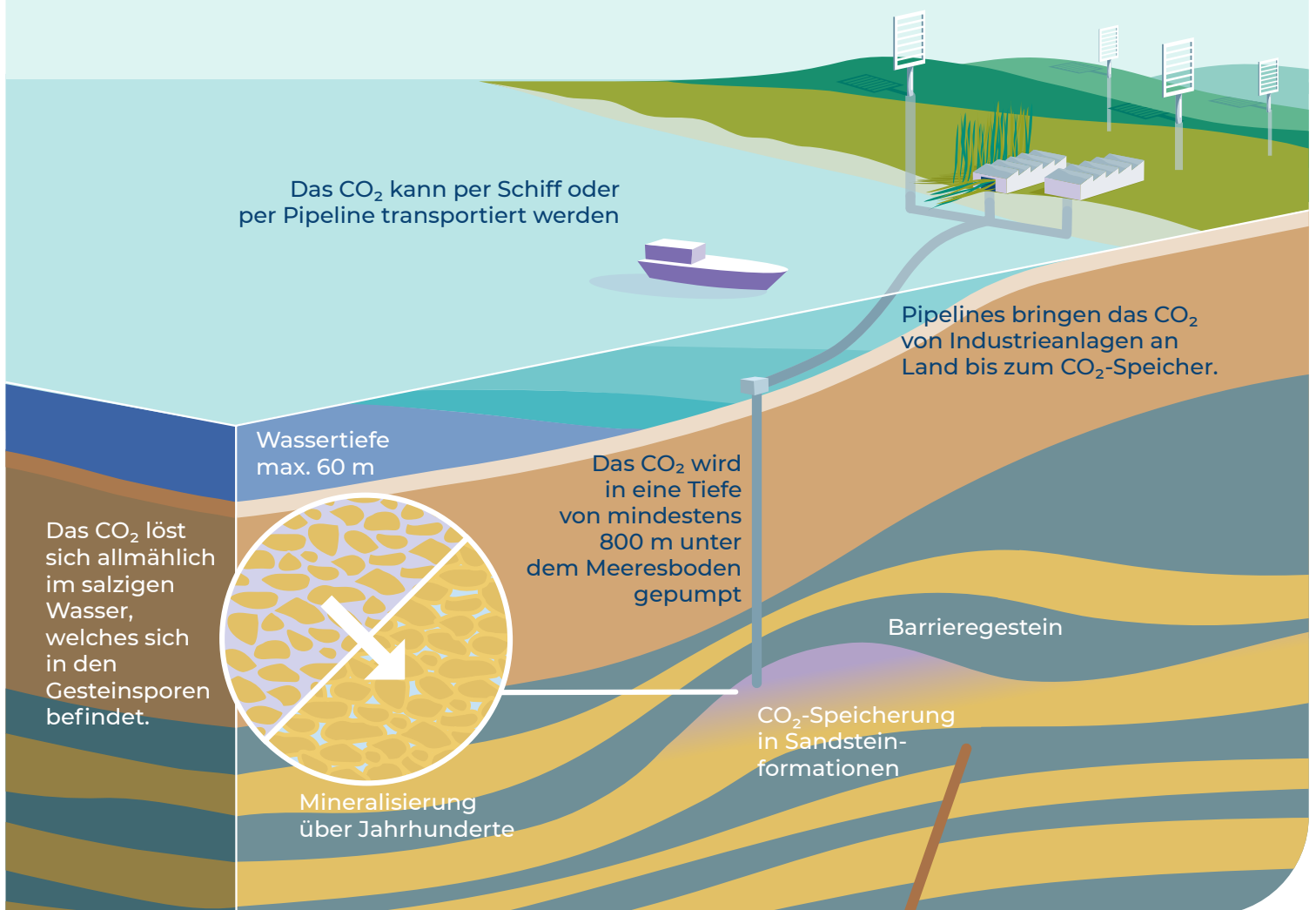
## CO<sub>2</sub>-Speicherung in Sandsteinformationen der deutschen Nordsee

Kosten für Abscheidung, Verflüssigung, Transport, Speicherung, Überwachung: **circa 50 bis 150 Euro pro Tonne Kohlendioxid**

Skalierbarkeit:  
Eine **CO<sub>2</sub>-Speicherung im industriellen Maßstab ist möglich**

Dauer der Speicherung:  
nach einer Mineralisierung **über Jahrtausende**

Technischer Entwicklungsstand:  
Die Methode ist **machbar** und wird außerhalb Deutschlands **bereits erfolgreich eingesetzt**.



Für die Speicherung im tiefen Meeresuntergrund wird flüssiges Kohlendioxid durch eine Pipeline oder aber per Schiff in das entsprechende Meeresgebiet transportiert und durch ein oder mehrere Bohrungen in tiefliegende poröse Sandsteinformationen gepresst.

Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

## Ein machbares Verfahren mit offenen Fragen

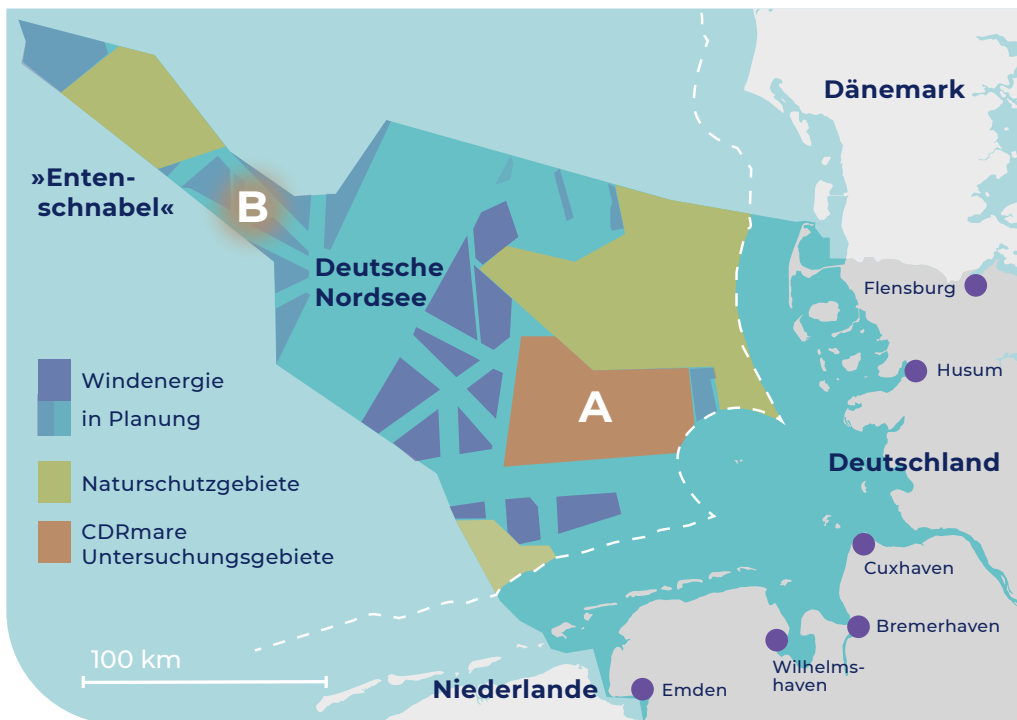
Die sichere Einlagerung und Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund der Nordsee ist seit Jahrzehnten technisch machbar. Bevor ein Demonstrationsprojekt unter der deutschen Nordsee angedacht werden kann, gibt es jedoch eine Menge offener Fragen zu beantworten

### Wie viel Kohlendioxid könnte im Untergrund der deutschen Nordsee gespeichert werden?

Bislang existieren nur grobe Schätzungen darüber, wie viel Kohlendioxid sich in den Sandsteinformationen der deutschen Nordsee einlagern ließe. Diese Schätzungen reichen von 3,6 bis 10,4 Milliarden Tonnen Kohlendioxid. Eine Speicherkapazität dieser Größenordnung würde theoretisch ausreichen, die bislang schwer vermeidbaren Kohlendioxid-Emissionen der deutschen Industrie über mehrere Jahrzehnte hinweg in den Meeresuntergrund zu injizieren. Unklar ist allerdings, wie viel Kohlendioxid die verschiedenen Gesteinsformationen im Untergrund der deutschen Nordsee tatsächlich aufnehmen können und welche Standorte

aufgrund der Speicher- und Barriere-Eigenschaften der Gesteinsschichten in der Tiefe am besten als künftige Speicher geeignet sind.

*In CDRmare überprüfen Forschende die Beschaffenheit und das Speicherpotenzial der Sandsteinformationen in der deutschen Nordsee und kartieren potenzielle Speichergebiete neu. Für zwei ausgewählte Gebiete erstellen sie dreidimensionale hochauflösende numerische Reservoirmodelle, in welchen sie die Einlagerung von 10 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr realitätsnah simulieren können.*



In der Forschungsmission CDRmare erstellen Forschende computerbasierte Reservoirmodelle des tiefen Untergrundes zweier deutscher Nordseegebiete, die in dieser Karte als Gebiet A und B bezeichnet werden. Mithilfe dieser Modelle simulieren sie anschließend die Injektion und Speicherung von 10 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr. Dabei untersuchen sie unter anderem, ob eine Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund den Betrieb geplanter und bereits existierender Offshore-Windkraftanlagen beeinträchtigen würde.

Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR, eigene Darstellung auf Grundlage von Karten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie

### Wie soll das abgeschiedene Kohlendioxid von Land hinaus in das Meeresgebiet transportiert werden und was kostet eine Einlagerung im tiefen Meeresuntergrund?

Bei den beiden laufenden Kohlendioxid-Speicher-Projekten unter norwegischen Gewässern wird bislang nur Kohlendioxid verwendet, welches aus Erdgas abgetrennt und dann im tiefen Untergrund gespeichert wird. Im Sleipner-Projekt in der Nordsee wird das Kohlendioxid quasi auf dem Meer abgeschieden

und verpresst, während im Snøhvit-Projekt in der norwegischen Barentssee das Kohlendioxid von einer Aufbereitungsanlage an Land über Pipelines am Meeresboden zu den Injektionsbohrungen transportiert wird. Ein Transport via Pipelines ist auch für die Kohlendioxid-Speicherung im norwegischen Northern Lights-

Projekt in der Nordsee sowie für weitere Projekte vor der Küste der Niederlande, Dänemark und Großbritanniens vorgesehen.

Die Kostenabschätzungen für verschiedene CCS-Projekte im Meeresgebiet variieren, denn es gibt viele projektspezifische Einflussfaktoren, die allgemeine Aussagen erschweren. Einer neueren internationalen Analyse zufolge liegen die Kosten für die Kohlendioxid-Abscheidung, den Transport, die Injektion in den Untergrund und die anschließende Überwachung des CO<sub>2</sub>-Speichers bei circa 50 bis 150 Euro pro Tonne Kohlendioxid. Für ein Projekt unter der deutschen Nordsee existieren aber bislang

weder technische Konzepte für den Transport und die Speicherung von Kohlendioxid im industriellen Maßstab noch realistische Kostenabschätzungen.

*In CDRmare erarbeiten Forschende für die beiden untersuchten Speichergebiete unter der deutschen Nordsee technische Konzepte für den Transport und die Speicherung von Kohlendioxid im industriellen Maßstab. Außerdem nehmen sie Kostenabschätzungen für den Bau und den Betrieb der dazu notwendigen Anlagen vor.*

## Welche Risiken für Mensch und Umwelt entstehen bei der Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der deutschen Nordsee?

Aufgrund der Erfahrungen aus laufenden Kohlendioxid-Speicherprojekten und umfangreicher Forschung in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten, lässt sich diese Frage prinzipiell gut beantworten. Wo Kohlendioxid im Meeresuntergrund eingelagert wird, bestehen theoretisch die Risiken, dass:

- > ein Teil des in den Untergrund injizierten Kohlendioxids durch sogenannte Störungen oder entlang von Bohrlöchern aufsteigt und am Meeresboden austritt (Leckagen);
- > sehr salziges Formationswasser sowie möglicherweise darin enthaltene Schwermetalle und andere für die Umwelt schädliche Stoffe am Meeresboden austreten und die lokalen Ökosysteme beeinträchtigen;
- > Druckveränderungen im Speichergestein vorhandene geologische Störungen reaktivieren und Erdbeben auslösen, welche die Standfestigkeit und die Funktionalität von am Meeresboden verankerten Infrastrukturen gefährden könnten;
- > Meeressäuger durch Lärm gestört oder möglicherweise geschädigt werden, der bei der Suche nach geeigneten Speicherformationen, beim Bau der Anlagen sowie bei der Überwachung des Speichers entstehen kann.

Welche dieser Risiken tatsächlich auftreten und in welchem Ausmaß, hängt von den lokalen Gegebenheiten ab und muss im Vorfeld eines jeden Kohlendioxid-Speicherprojektes gründlich untersucht werden.

### Wenn Kohlendioxid aus dem Meeresboden entweicht

Der Meeresboden der Nordsee ist keine dicht versiegelte Fläche. Im Gegenteil: An vielen Stellen tritt natürliches Erdgas aus dem Meeresboden aus. Pro Jahr und Austrittsstelle werden etwa 1 bis 70 Tonnen Erdgas freigesetzt. Seine Herkunft ist nicht immer eindeutig. Es wird entweder von Mikroorganismen im Meeresboden gebildet oder kann zum Beispiel durch Störungen und spezielle Sedimentstrukturen (z. B. sogenannte Sandintrusionen) aus dem tiefen Untergrund aufsteigen. Zudem entweicht Erdgas entlang einiger alter Bohrlöcher in einer Größenordnung von 1 bis 19 Tonnen pro Austrittsstelle und Jahr.

*Ob solche Erdgasaustritte beispielgebend für mögliche CO<sub>2</sub>-Leckagen aus großer Tiefe sind, untersuchen Forschende in CDRmare.*

Bislang sind Kohlendioxid-Austritte an modernen, speziell für den Zweck der CO<sub>2</sub>-Speicherung erstellten Bohrungen nicht bekannt. Bei den norwegischen Speicherprojekten, die bereits seit vielen Jahren betrieben werden, wurde bisher ebenfalls kein Kohlendioxid am Meeresboden freigesetzt. Dennoch muss bei der Auswahl von Speicherstandorten auf die Existenz von Störungen und anderen speziellen Sedimentstrukturen im Untergrund geachtet werden, durch die Kohlendioxid und unter Umständen auch Formationswasser zum Meeresboden aufsteigen könnten. Gleichzeitig muss überprüft werden, ob Altbohrungen vorhanden sind und wenn ja, ob diese dicht verschlossen sind.

Im Vorfeld eines CO<sub>2</sub>-Speicherprojektes unter dem Meer muss zudem das Formationswasser in den ausgewählten Speicherformationen chemisch analysiert werden. Auf Basis der Ergebnisse kann beurteilt werden, welche Umweltrisiken auftreten könnten, sollten das Formationswasser und möglicherweise darin enthaltene Schwermetalle oder andere umweltschädliche Stoffe aus dem Meeresboden entweichen.

Freisetzungsexperimente am Meeresboden der Nordsee zeigen, dass sich austretendes Kohlendioxid sofort im bodennahen Meerwasser löst und dabei dessen chemische Eigenschaften verändert. Das Meerwasser rund um die Austrittsstelle versauert, wodurch die Lebensbedingungen insbesondere für Muscheln und andere kalkbildende Tiere beeinträchtigt werden. Das von der Versauerung betroffene Gebiet ist dabei vergleichsweise klein (ca. 50 Quadratmeter), wenn in etwa dieselbe Menge Kohlendioxid entweicht, wie Erdgas an den oben beschriebenen natürlichen Erdgas-Austrittsstellen der Nordsee.

Ähnliche Beobachtungen haben Wissenschaftler:innen auch an Land gemacht. Tritt dort über natürlichen Kohlendioxid-Lagerstätten CO<sub>2</sub> aus dem Untergrund aus, beträgt der Einflussbereich des Gases meist nur wenige Meter oder Zehner-Meter.

Für sorgfältig erkundete und ausgewählte CO<sub>2</sub>-Speicherstandorte im Meeresgebiet gehen die Expert:innen davon aus, dass bei einem planmäßigem Betrieb und einer Einlagerung von circa 10 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr nur ein sehr geringer Anteil CO<sub>2</sub> aus dem Speicher entweichen kann. Die daraus resultierenden Umweltschäden am Meeresboden würden dementsprechend kleine Flächen betreffen.

Dennoch müssen Leckagen weitgehend vermieden werden. Geeignete Frühwarn- und Überwachungssysteme sind nötig, um

Abweichungen vom erwarteten Speicherverhalten frühzeitig zu erkennen und schnell geeignete Gegenmaßnahmen zu treffen.

*In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen in zwei ausgewählten Gebieten den Meeresuntergrund und alle bekannten Bohrlöcher auf mögliche Erdgas-Austritte und entwickeln Methoden zur Eindämmung möglicher CO<sub>2</sub>-Leckagen.*

### Wenn die Kohlendioxid-Injektion Bewegungen im Untergrund auslöst

Wenn Kohlendioxid in ein Speichergestein injiziert wird, steigt der Druck in der Gesteinsformation. Dadurch können unter Umständen vorhandene Störungen innerhalb der Gesteinsformation aktiviert werden. Das heißt, an bestimmten Stellen könnten sich Risse im Gestein weiten oder Gesteinsschichten gegeneinander verschieben. Durch diese Bewegungen im Untergrund können unter Umständen Pfade entstehen, durch die das eingelagerte Kohlendioxid und das Formationswasser aufsteigen und später aus dem Meeresboden austreten können.

In Meeresgebieten, in denen schon auf natürliche Weise Erdbeben auftreten, könnten sich infolge der Druckveränderungen im Speichergestein sogenannte Gebirgsspannungen im Untergrund lösen. Dies könnte Erdbeben auslösen, welche die Standfestigkeit von Windkraftanlagen oder Pipelines gefährden würden. Zum Vergleich: Ein CO<sub>2</sub>-Pilotspeicher im japanischen Nagaoka überstand ein Erdbeben der Intensität 7 unbeschadet. Rückschlüsse auf andere Speicherstandorte sind jedoch nur bedingt möglich, weil dafür standortspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen.

Ob an Land oder im Meer: Potenzielle Standorte für die Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund müssen umfassend erkundet werden. Es gilt, ihre geologische Beschaffenheit, mögliche Leckage-Pfade und die lokal herrschenden Druck- und Temperaturverhältnisse zu untersuchen, bevor über ihre Eignung als CO<sub>2</sub>-Speicher entschieden werden kann. Das heißt: Sollte die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung in Deutschland künftig eingesetzt werden, müssen die geologischen Untersuchungen geeigneter Speicher intensiviert und ausgeweitet werden.

*In CDRmare simulieren und bewerten Forschende die geotechnischen Risiken einer Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der zwei ausgewählten Meeresgebiete für benachbarte bzw. darüber liegende Windparks und andere bauliche Infrastrukturen wie etwa Pipelines.*

### Lärmbelastigungen für Meeressäugetiere

Bei der Suche nach möglichen Kohlendioxid-Speicherstandorten im Meeresuntergrund werden dieselben geophysikalischen Methoden angewandt wie für die Suche nach Erdöl- und Erdgaslagerstätten. Gemeint sind unter anderem aktive seismische Verfahren, bei denen zum Beispiel sogenannte Luftpulser vom Schiff aus zu Wasser gelassen werden. Diese erzeugen bei jedem Puls Schallwellen, die tief in den Untergrund eindringen und von den Gesteinsschichten auf unterschiedliche Weise reflektiert werden. Anhand der Ausbreitung und Reflektion der Schallwellen können Wissenschaftler:innen die Gestalt und den Aufbau des Untergrundes abbilden. Der Nachteil der Luftpulser: Ihre Schallwellen verursachen Unterwasserlärm, über dessen Auswirkungen auf das Leben im Meer und insbesondere auf lärmempfindliche Nordseebewohner wie Schweinswale bisher nur wenig bekannt ist. Da Schweinswale sowohl zur Orientierung, als auch zur Kommunikation und zur Nahrungssuche auf akustische Signale angewiesen sind, beeinflusst Unterwasserlärm ihr Verhalten und kann sie langfristig aus ihrem ursprünglichen Lebensraum vertreiben. Sehr hohe Schallpegel bestimmter Frequenzen können die Tiere zudem verletzen und mitunter dauerhaft schädigen.

*In CDRmare untersuchen Forschende die Auswirkungen aktiver seismischer Messungen, insbesondere den Einsatz von Luftpulsern, auf Schweinswale. Ihr Ziel ist, die Risiken seismischer Messungen und anderer lärmintensiver Arbeiten für ein Demonstrationsprojekt zur CO<sub>2</sub>-Speicherung für die Meeressäugetiere besser einschätzen zu können und entsprechende Schutzmaßnahmen zu entwickeln.*



Schweinswale (*Phocoena phocoena*) erzeugen hochfrequente kurze Echoortungsklicks, um sich unter Wasser zu orientieren, Beute zu identifizieren oder aber untereinander zu kommunizieren. Sie sind demzufolge auf ein gut funktionierendes Gehör angewiesen. Der Einsatz aktiver seismischer Messverfahren erzeugt Schockwellen unter Wasser, welche die Tiere vertreiben und gegebenenfalls verletzen können.

Foto: Sytske Dijkse, Ecomare, Wiki Commons

## Wie lassen sich Kohlendioxid-Speicher langfristig überwachen und Risiken minimieren?

Die Injektion und Speicherung von Kohlendioxid im Meeresuntergrund müssen aus mehreren Gründen umfassend und auch über einen langen Zeitraum überwacht werden – so zum Beispiel, um zu kontrollieren, ob sich das Kohlendioxid wie erwartet im

Speichergestein ausbreitet, und um mögliche CO<sub>2</sub>-Leckagen rechtzeitig zu entdecken, auch dann noch, wenn die CO<sub>2</sub>-Injektion bereits abgeschlossen ist. Aktive seismische Messungen spielen dabei eine wichtige Rolle. Um ihren Einfluss auf die Meeresbe-

wohner jedoch so gering wie möglich zu halten, sollten sie auf ein Mindestmaß reduziert werden.

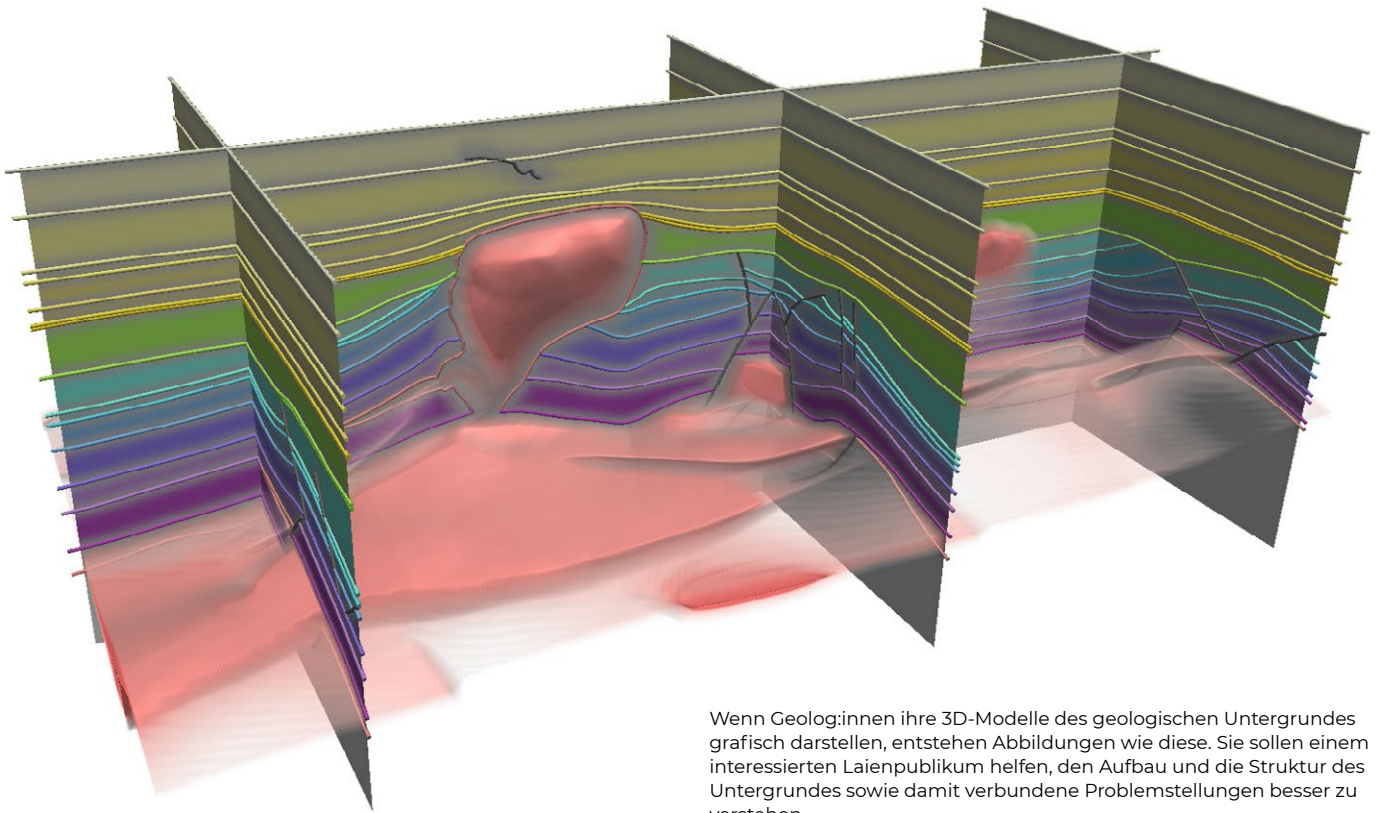
Eine ergänzende Messmethode könnten sogenannte passive seismische Verfahren sein, die bislang aber nur im tiefen Ozean erprobt wurden. Für sie werden hochsensible Messgeräte auf dem Meeresboden platziert, die dann völlig geräuschlos sowohl natürlich auftretende seismische Ereignisse aufzeichnen würden als auch solche, die durch eine CO<sub>2</sub>-Injektion entstünden.

In CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen, ob sie auf Basis passiv erhobener Daten Rückschlüsse auf die CO<sub>2</sub>-Ausbreitung und die Druckverhältnisse im Untergrund ziehen können und in der Lage sind, Störungen und potenzielle Austrittspfade zu identifizieren.

Für den Einsatz passiv-seismischer Verfahren spricht zudem, dass mit ihnen eine kontinuierliche Überwachung möglich ist. Bedacht

werden muss allerdings: Wo passiv-seismische Messgeräte am Meeresboden liegen, müssen diese vor Zerstörungen geschützt werden. Das heißt, der Fischfang und das Anker von Schiffen und Booten müssten eventuell eingeschränkt werden. Vor der Umsetzung eines CO<sub>2</sub>-Speicherprojektes unter der deutschen Nordsee ist es daher dringend erforderlich, die vielen verschiedenen meeresbodennahen Nutzungsansprüche miteinander abzustimmen und bei Bedarf Prioritäten für verschiedene Gebiete festzulegen.

*In CDRmare entwickeln Forschende ein passiv-seismisches und damit lärmfreies Überwachungssystem für künftige Kohlendioxid-Speicher im tiefen Untergrund der Nordsee. Dieses System soll räumlich skalierbar sein und alle Phasen der Kohlendioxid-Speicherung abdecken können – das heißt, sowohl die Zeit vor und während der Injektion des Kohlendioxids in den Untergrund als auch die Zeit danach.*



Wenn Geolog:innen ihre 3D-Modelle des geologischen Untergrundes grafisch darstellen, entstehen Abbildungen wie diese. Sie sollen einem interessierten Laienpublikum helfen, den Aufbau und die Struktur des Untergrundes sowie damit verbundene Problemstellungen besser zu verstehen.

Abbildung: Björn Zehner, BGR

## Beeinträchtigt die Kohlendioxid-Speicherung im Meeresuntergrund andere Formen der Meeresnutzung?

Schifffahrt, Windparks, Fischerei, Pipelines, Erdgasförderung: Die deutsche Nordsee ist bereits heute ein intensiv genutztes Meeresgebiet. Gleichzeitig ist sie aber auch ein wichtiger Lebensraum für viele verschiedene Meereslebewesen, die durch das Ausweisen von Meeresschutzgebieten geschützt und erhalten werden sollen. Um Konflikte mit dem Meeresschutz und anderen Nutzungen zu vermeiden, müssten potenzielle CO<sub>2</sub>-Speicherstandorte in die maritime Raumordnung integriert werden.

Bislang aber berücksichtigen die Meeresraumpläne für deutsche Gewässer nur die Nutzung des Meeresbodens, der Wassersäule

sowie des Luftraums darüber. Eine weitergehende Nutzung des Meeresuntergrundes in verschiedenen Tiefenlagen ist auch in den neuen, im Jahr 2021 in Kraft getretenen Festlegungen nicht erwähnt.

*In CDRmare analysieren Wissenschaftler:innen den Status quo der Meeresraumplanung in der deutschen Nordsee und erarbeiten Möglichkeiten, wie Projekte zur Kohlendioxid-Speicherung künftig in der Planung berücksichtigt und wie mit möglichen Nutzungskonflikten umgegangen werden könnte.*

## Welche rechtlichen Rahmenbedingungen gibt es?

Aufgrund der bestehenden gesetzlichen Regelungen in Deutschland sind Projekte zur CO<sub>2</sub>-Speicherung im Untergrund der deutschen Nordsee momentan nicht möglich. Auf internationaler Ebene hingegen wurden bereits im Jahr 2006 wichtige rechtliche Weichen gestellt: Mittlerweile erlauben sowohl das Protokoll zum Londoner Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffe die unterirdische Einlagerung von Kohlendioxid im Festlandsockel eines Küstenstaates und in anderen Gebieten des Meeresuntergrunds als auch das für die Nordsee geltende Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR Übereinkommen). Deutschland ist beiden Verträgen beigetreten.

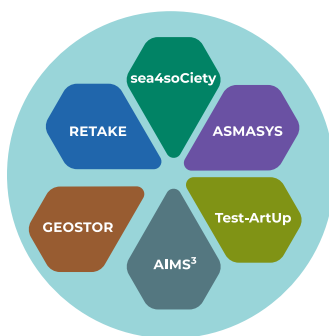
Für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union gilt zudem die EU-Richtlinie zur Speicherung von Kohlendioxid, welche die deutsche Bundesregierung im August 2012 national unter anderem mit dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) umgesetzt hat.

Vor allem zwei Passagen im KSpG verhindern derzeit die Durchführung von Speicherprojekten in der deutschen Nordsee: Das Gesetz enthält zum einen eine Klausel, wonach Anträge für die Zulassung von Kohlendioxid-Speichern bis zum Ende des Jahres 2016 hätten eingereicht werden müssen (anderes gilt für sogenannte Forschungsspeicher). Zum anderen räumt der Bundesgesetzgeber den Bundesländern das Recht ein, bestimmte Gebiete von einer möglichen Kohlendioxid-Speicherung auszunehmen. Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein haben dieses Recht genutzt, um alle unter ihrer Verantwortung stehenden Meeresgebiete von einer Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund auszuschließen. Auf diese Weise haben sie quasi ein Verbot der unterirdischen Kohlendioxid-Speicherung im küstennahen Bereich der deutschen Nordsee verhängt.

Da die Befugnis der Länder, die Erprobung und Demonstration der dauerhaften Speicherung für unzulässig zu erklären, nach dem Wortlaut des KSpG auf »bestimmte Gebiete« beschränkt ist, stieß der pauschale Ausschluss des Meeresuntergrund bereits unmittelbar nach Inkrafttreten des KSpG auf rechtliche Bedenken. Politisch wurde dieser Schritt aufgrund der großen öffentlichen Zustimmung aber nicht weiter diskutiert. Aktuell ist zum Beispiel unklar, ob Kohlendioxid-Speicherprojekte jenseits des 12 Seemeilen breiten Küstenmeers umgesetzt werden könnten, wenn die Antragsfrist verlängert würde, oder ob auch diese dem Länderverbot unterliegen könnten.

Insgesamt ist die gegenwärtige Rechtslage für Projekte zur Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der deutschen Nordsee also in einem erheblichen Maße klärungsbedürftig. Angesichts der zunehmenden Dringlichkeit, den Klimawandel wirkungsvoll zu stoppen, dürften die Hindernisse im nationalen Kohlendioxid-Speicherungsgesetz jedoch zunehmend hinterfragt werden. Die vom KSpG vorgeschriebene erneute Evaluierung der Anwendung des Gesetzes und der international gewonnenen Erfahrungen bietet einen geeigneten Anlass, um Möglichkeiten zu diskutieren, wie diese Hindernisse beseitigt werden können.

In CDRmare untersuchen Rechts- und Geowissenschaftler:innen, unter welchen Voraussetzungen ein künftiges Demonstrationsprojekt zur Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der deutschen Nordsee mit den gesetzlichen und verordnungsrechtlichen Vorgaben vereinbar sein könnte, wenn die Antragsfrist verlängert würde, und inwiefern Antrags- und Genehmigungsverfahren konkretisiert werden müssen, um Meeresschutz und -nutzung miteinander zu vereinbaren.



Alle hier beschriebenen Forschungsarbeiten werden im CDRmare Forschungsverbund »GEOSTOR – Submarine Kohlendioxid-Speicherung in geologischen Formationen der Deutschen Nordsee« durchgeführt.

Im Rahmen der Forschungsmission CDRmare der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM), die sich aus rund 200 Forschenden in 6 Verbänden zusammensetzt, werden verschiedene Methoden der marinen CO<sub>2</sub>-Entnahme und Speicherung (Alkalinisierung, Blue Carbon, Künstlicher Auftrieb, CCS) hinsichtlich ihres Potenzials, ihrer Risiken und Trade-Offs untersucht und in einem transdisziplinären Bewertungsrahmen zusammengeführt. Seit August 2021 wird CDRmare in seiner ersten dreijährigen Phase vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit 26 Mio. Euro gefördert.

### IMPRESSUM

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel // Wischhofstr. 1–3 // 24148 Kiel  
// **Verantwortlich für den Inhalt:** Andreas Oshlies, Gregor Rehder, Achim Kopf, Ulf Riebesell,  
Klaus Wallmann, Martin Zimmer // **Redaktion:** Ulrike Bernitt ([ubernitt@geomar.de](mailto:ubernitt@geomar.de)) //  
**Texte:** Sina Löschke ([schneehohl.net](http://schneehohl.net)) // **Design und Grafiken:** Rita Erven // 1. Mai 2022