

**POLICY BRIEF**

**Chancen und Hürden  
der marinen geologischen  
CO<sub>2</sub>-Speicherung**



# Über

Dieser Policy Brief beruht auf den Factsheets der Forschungsmission CDRmare der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM), die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den norddeutschen Bundesländern gefördert wird. Der Policy Brief wurde verfasst von Prof. Dr. Andreas Oschlies<sup>1,2</sup>, Prof. Dr. Achim Kopf<sup>3,4</sup>, Prof. Dr. Alexander Proelß<sup>5</sup>, Prof. Dr. Klaus Wallmann<sup>1,2</sup>, Dr. Nadine Mengis<sup>1</sup>, Prof. Dr. Gregor Rehder<sup>6</sup>, Ulrike Bernitt<sup>1</sup>, Kristin Hamann<sup>1</sup>, Sina Löschke (Redaktionsbüro schneehohl.net) und Sandra Ketelhake<sup>1</sup>.

In diesem Policy Brief betrachten wir die marine Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS).

## Beitragende Institutionen

<sup>1</sup> GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, <sup>2</sup> Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, <sup>3</sup> MARUM, <sup>4</sup> Universität Bremen, <sup>5</sup> Universität Hamburg, <sup>6</sup> Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde

## Dieser Policy Brief ist folgendermaßen zu zitieren

CDRmare (2024): Policy Brief, Chancen und Hürden der marinen geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung, CDRmare Research Mission, pp. 1-14, DOI: 10.3289/CDRmare.15\_V2

Dies ist eine Veröffentlichung unter der Creative Commons Lizenz 4.0 International (einschließlich Grafiken / ohne Cover-Foto):  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

<https://cdrmare.de> | <https://geostor.cdrmare.de> | <https://aims3.cdrmare.de>

Twitter: @CDRmare

Cover photography: National Oceanography Centre (GB)

Layout: Rita Erven<sup>1</sup>, CDRmare

## Was ist zu tun – Kernaussagen

# 1

Kein Entweder-Oder: Wir brauchen CCS und CO<sub>2</sub>-Entnahme, um unser nationales Netto-Null-Ziel bis 2045 zu erreichen.

Carbon Capture and Storage (CCS) ist für die Industriebranchen, bei denen die Entstehung von CO<sub>2</sub> nicht komplett vermieden werden kann, dringend erforderlich, um die Emissionen direkt zu verhindern. Um unvermeidbare Rest-Emissionen zu kompensieren, benötigen wir außerdem Methoden der CO<sub>2</sub>-Entnahme, die teilweise mit CCS kombiniert werden. Nur so kann Treibhausgasneutralität erreicht werden.

# 2

Industrielle Projekte zur Erkundung von Speicherstandorten in der Deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) seewärts der 12-Meilen-Zone müssen zeitnah ermöglicht werden.

Diese Projekte müssen durch öffentlich geförderte Forschung begleitet werden, um die standortspezifischen Umweltrisiken unabhängig und objektiv zu bewerten und die Einhaltung des Vorsorgeprinzips zu gewährleisten. Zunächst muss ein rechtlicher Rahmen für die Erteilung einer Erkundungserlaubnis geschaffen werden. Anschließend – nach der Entwicklung einer Carbon Management Strategie – muss das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) angepasst werden, um die Vergabe von Speicherlizenzen in der deutschen AWZ zu ermöglichen.

# 3

Die Erforschung der Speicherung von CO<sub>2</sub> in Basaltgestein im mittelozeanischen Rücken muss weiter gefördert werden, um Auswirkungen für die Umwelt, aber auch Fragen zur technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Machbarkeit zu klären.

Um das große Speicherpotential von CO<sub>2</sub> in Basaltgestein der ozeanischen Kruste nutzen zu können, müssen die theoretischen Vorüberlegungen zur Speicherung in der Praxis überprüft werden. Die dafür benötigten wissenschaftlich begleiteten Pilotstudien können nur umgesetzt werden, wenn Änderungen im Hohe-See-Einbringungsgesetz (HSEG) auf den Weg gebracht und verabschiedet werden.

### Anmerkung:

*Die im Rahmen der Forschungsmission CDRmare durchgeführten und geplanten wissenschaftlichen Aktivitäten dienen einzig und allein Forschungszwecken. Das Ziel der Arbeiten im Rahmen der Forschungsmission CDRmare ist, bestehende Wissenslücken zur Kohlendioxid-Speicherung zu schließen und herauszufinden, ob eine Kohlendioxid-Einlagerung in der deutschen Nordsee und im Meeresboden des mittelozeanischen Rückens im Vergleich zu Speicherungen an Land nachhaltige, effektive und langfristig kostengünstige Optionen sind.*

*Dieser Policy Brief geht auf die zwei bereits genannten Optionen der marinen geologischen Speicherung von Kohlendioxid ein: Zum einen die CO<sub>2</sub>-Speicherung in der deutschen Nordsee, welche vom technologischen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Reifegrad vor einer Weiterentwicklung in einem Demonstrationsprojekt steht. Zum anderen die CO<sub>2</sub>-Speicherung in Basalt für welche zurzeit noch grundlegende technologische und wirtschaftliche Fragestellungen abschließend geklärt werden müssen.*

## Wir brauchen CCS und CO<sub>2</sub>-Entnahme, um unser nationales Netto-Null-Ziel bis 2045 zu erreichen

In der naturwissenschaftlichen Klimaforschung herrscht Konsens: Die Menschheit wird den Klimawandel und seine zunehmend drastischeren Folgen und Risiken nur dann eindämmen, wenn sie die Menge ihrer jährlichen Kohlendioxid-Emissionen in die Atmosphäre auf eine rechnerische Null reduziert (Netto-Null).

Selbst mit ambitionierter Klimapolitik wird die Menschheit zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch CO<sub>2</sub>-Rest-Emissionen freisetzen. Sie entstehen zum Beispiel bei der Zementherstellung, im Flug- und Schwerlasttransport, in der Landwirtschaft, aber auch bei der Müllverbrennung. Dabei gibt es keinen gesellschaftlichen Konsens darüber, wie hoch mögliche Rest-Emissionen sein und welche Sektoren diese verursachen dürfen. Schätzungen für Deutschland geben eine Spanne an: Diese werden momentan in **optimistischen Emissions-Vermeidungspfaden auf 10 bis 20 Prozent der heutigen Emissionen** prognostiziert.

Um diese Rest-Emissionen auszugleichen, muss das **Kohlendioxid direkt an seinen Quellen abgefangen sowie aus der Atmosphäre entnommen werden.**

Kohlendioxid ist ein langlebiges Gas. Seine Entnahme und Speicherung müssen daher effektiv und dauerhaft sein. Einige Kohlendioxid-Entnahme-Methoden wie Direct Air Capture (DAC) und Bioenergiegewinnung mit Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) sind auf die Speicherung im geologischen Untergrund angewiesen.

## Marines CCS machbar und notwendig – nur wo und wie?

In Europa wird CCS bisher nur in Norwegen in industriellem Maßstab angewendet. Das CO<sub>2</sub> wird dabei unter dem Meeresboden verpresst. Viele europäische Firmen erschließen zurzeit weitere CO<sub>2</sub>-Speicher unter der Nordsee, um dort CO<sub>2</sub>

aus industriellen Quellen zu entsorgen. In einer Reihe von europäischen Forschungsprojekten konnte gezeigt werden, dass bei der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung unter dem Meeresboden nur geringe Risiken bestehen, die durch eine geeignete Regulierung weiter minimiert werden können.

Seit 2022 hat sich die CCS-Diskussion in Deutschland entscheidend verändert. Es wird zunehmend wahrgenommen, dass die ambitionierten Klimaziele der Bundesregierung (Treibhausgasneutralität bis 2045) ohne CCS nicht erreicht werden können. Aktuelle Studien zeigen, dass in Deutschland pro Jahr circa 62 bis 127 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>eq aufgefangen und sicher gespeichert werden müssen, um die Klimaziele zu erreichen. Dabei wird CCS besonders für die Zementindustrie und andere industrielle Sektoren diskutiert, bei denen CO<sub>2</sub>-Emissionen auch bei Einsatz von erneuerbaren Energien und grünem Wasserstoff nicht vermieden werden können. Es gibt mittlerweile einen breiten Konsens unter den politischen Parteien in Deutschland, dass die CCS-Debatte neu geführt und auch der bestehende rechtliche Rahmen zur CO<sub>2</sub>-Speicherung aktualisiert werden muss.

## Kohlendioxid-Speicherung in geologischen Formationen der deutschen Nordsee

Als geologische Kohlendioxid-Speicher eignen sich Sandsteinformationen, die sowohl an Land als auch im tiefen Untergrund der Schelfmeere (800 Meter und tiefer) zu finden sind. Diese

Gesteinsschichten weisen Poren zwischen den einzelnen

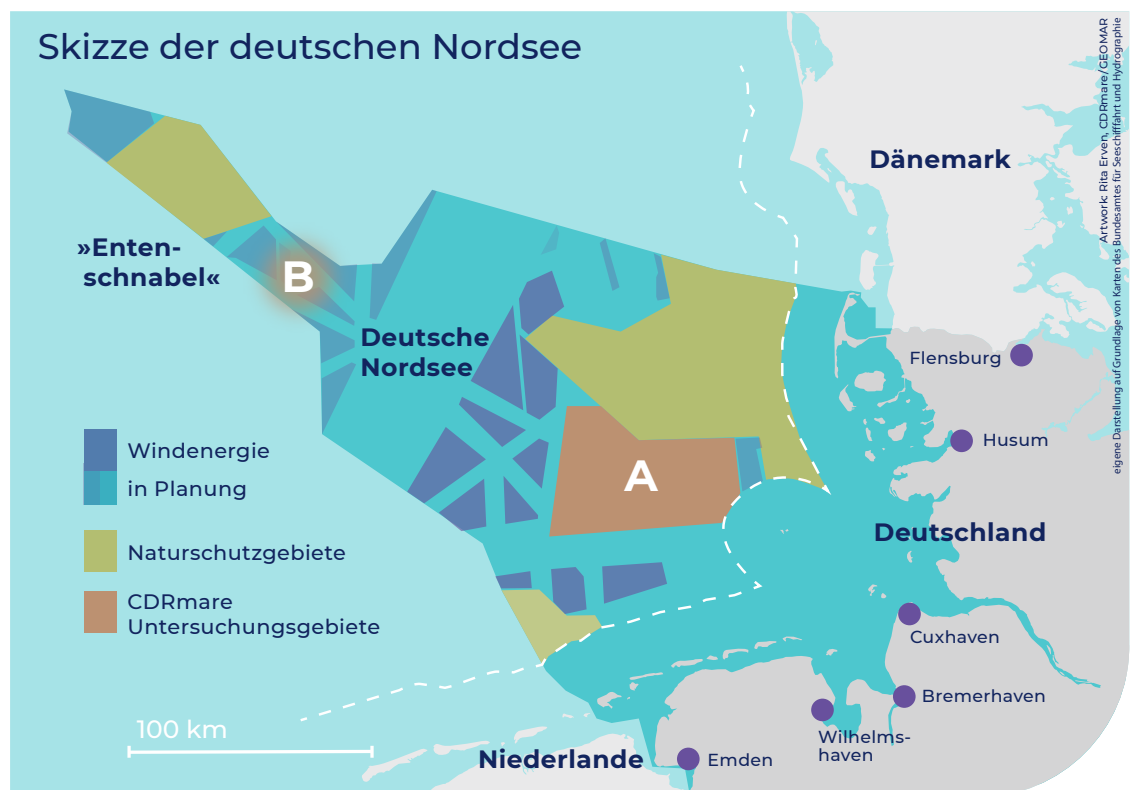
Sandkörnern auf, in denen sich das eingeleitete Kohlendioxid ausbreiten kann.

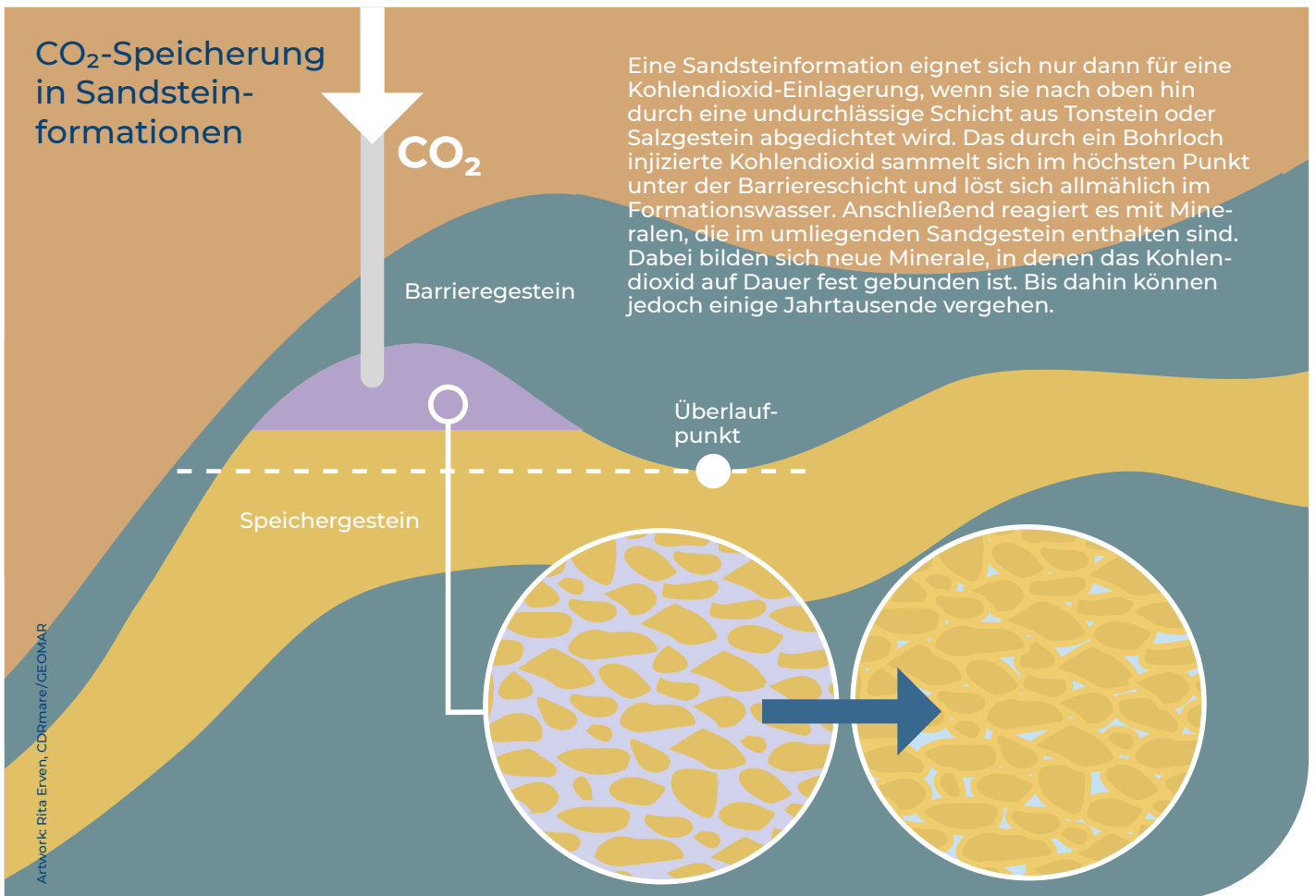
Erfüllt ein Speicherstandort diese und weitere geologische Voraussetzungen, kann das abgeschiedene Kohlendioxid komprimiert und über eine oder mehrere Bohrungen in die Speicherformationen injiziert werden. Dort breitet sich das Kohlendioxid in den mit salzigem Wasser gefüllten Gesteinsporen aus.

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.

**Unter der deutschen Nordsee könnten laut führenden CCS-Expert:innen etliche Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> eingespeichert werden.** Die vorläufigen Schätzungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) über ein **Potenzial von 2 bis 8 Milliarden Tonnen** werden gerade vom CDRmare-Forschungsverbund GEOSTOR genauer erfasst. Die laufenden Arbeiten bestätigen, dass alleine im Buntsandstein jenseits der 12-Seemeilen Zone (Ausschließliche Wirtschaftszone, AWZ) einige Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> gespeichert werden können. Vor dem Hintergrund ist davon auszugehen, dass sich bis zum Ende des Jahrhunderts beispielsweise etwa 30 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr in den Untergrund der deutschen Nordsee verpressen lassen. Dafür würden keine Gebiete in Küstennähe benötigt, da sich die geeigneten Gebiete etwa 100 Kilometer vor der deutschen Küste befinden.

Für die Gebiete A (West-Schleswig-Block) und B (Entenschnabel) wird in GEOSTOR detailliert untersucht, ob sie potenziell für ein CO<sub>2</sub>-Demonstrationsprojekt geeignet sind.





### Warum kann CO<sub>2</sub> in Sandstein dauerhaft gebunden werden?

Im Laufe der Zeit löst sich das Kohlendioxid im Formationswasser auf. Die dabei entstehende Lösung ist schwerer als Wasser, so dass das Kohlendioxid nicht mehr zur Oberfläche aufsteigt. Anschließend reagiert das im Wasser gelöste Kohlendioxid mit im Sandstein enthaltenen Mineralen und wird dabei in gelöstes **Bikarbonat** umgewandelt. In dieser Form hat der eingebrachte Kohlenstoff keine schädliche Klimawirkung mehr, selbst dann nicht, falls das gelöste Bikarbonat in das Meer entweichen sollte. Wie schnell die Umwandlung von Kohlendioxid in Bikarbonat abläuft, hängt davon ab, wie viele reaktive Minerale im Speichergestein vorhanden sind. Das Bikarbonat bildet schließlich Feststoffe, in denen der eingebrachte Kohlenstoff dauerhaft gebunden wird. Es können jedoch einige Jahrtausende vergehen, bevor diese Prozesse abgeschlossen sind.

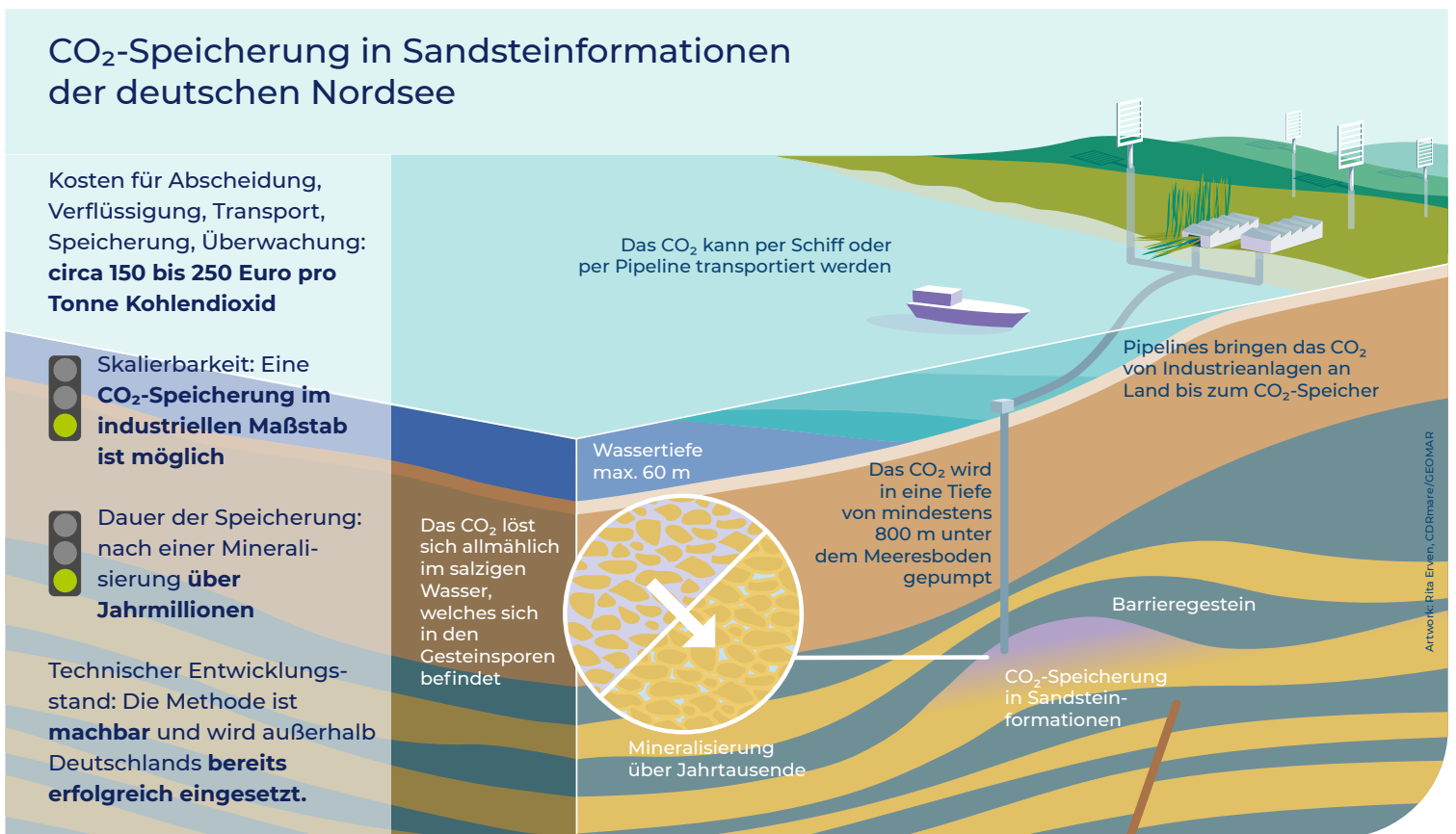
### Wie ist eine dauerhafte Speicherung von CO<sub>2</sub> im Untergrund technisch realisierbar, und ist das ökonomisch und ökologisch sinnvoll?

In GEOSTOR 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. Die sichere und dauerhafte Speicherung großer Mengen Kohlendioxid im tiefen Meeresgrund der Nordsee ist technisch machbar und wird bereits seit mehr als zwei Jahrzehnten unter norwegischen Gewässern erfolgreich praktiziert. Als Schelfmeer ist die Nordsee 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.

Aufgrund der steigenden Preise für Kohlendioxid-Emissionszertifikate wird die Speicherung des Treibhausgases im tiefen Meeresuntergrund allmählich zum lohnenden Geschäft. Eine Tonne Kohlendioxid abzuscheiden, über eine Pipeline in das Meeresgebiet hinauszuleiten und dort im Untergrund zu verpressen, kostet schätzungsweise 150 bis 250 Euro. Zertifikate zur Emission der gleichen Menge Kohlendioxid in die Atmosphäre kosteten im Jahr 2022 etwa 80 Euro.

Aufgrund der Erfahrungen aus laufenden Kohlendioxid-Speicherprojekten und umfangreicher Forschung in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten, lässt sich die Frage zu Risiken für Mensch und Umwelt bei der Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der deutschen Nordsee gut beantworten. Ein Teil des in den Untergrund injizierten Kohlendioxids kann durch sogenannte Störungen oder entlang von Bohrlöchern aufsteigen und am Meeresboden austreten (Leckagen). Sehr salziges Formationswasser sowie möglicherweise darin enthaltene Schwermetalle und andere für die Umwelt schädliche Stoffe können am Meeresboden austreten und die lokalen Ökosysteme beeinträchtigen. Druckveränderungen im Speichergestein können vorhandene geologische Störungen reaktivieren und Erdbeben auslösen, welche die Standfestigkeit und die Funktionalität von am Meeresboden verankerten Infrastrukturen gefährden könnten. Meeressäuger können 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. **Risiken können durch die Auswahl von geeigneten Speicherstandorten und durch eine stringente Regulierung der Speicherung im Kohlendioxidspeichergesetz (KSpG) weitgehend minimiert werden.**



Für die Speicherung im tiefen Meeresuntergrund wird flüssiges Kohlendioxid via Schiff oder durch eine Pipeline in das Meeresgebiet transportiert und durch eine oder mehrere Bohrungen in tiefliegende poröse Sandsteinformationen gepresst. Dort breitet sich das Kohlendioxid in den Poren aus und sammelt sich am höchsten Punkt des Speichers unter der Barrierschicht. Mit der Zeit löst sich das Kohlendioxid im Formationswasser und reagiert mit Mineralen, die im umliegenden Sandstein enthalten sind. Dabei bilden sich Minerale (Karbonate), in denen das Kohlendioxid auf Dauer fest gebunden ist. Bis dahin können jedoch einige Jahrtausende vergehen.

## Welche langfristigen und zielgerichteten wissenschaftlichen Beobachtungen müssen konzipiert werden, um CCS in Sandstein zu überwachen?

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 Kohlendioxid-Leckagen rechtzeitig zu entdecken, auch dann noch, wenn die Kohlendioxid-Injektion bereits abgeschlossen ist. Aktive seismische Messungen spielen dabei eine wichtige Rolle. Um ihren Einfluss auf die Meeresbewohner jedoch so gering wie möglich zu halten, sollten sie auf ein Mindestmaß reduziert werden.

In Forschungsverbund GEOSTOR 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, wie oben beschrieben. Hierfür müssten beispielsweise hochsensible Messgeräte auf dem Meeresboden platziert werden, die dann völlig geräuschlos sowohl natürlich auftretende seismische Ereignisse aufzeichnen als auch solche, die durch eine CO<sub>2</sub>-Injektion entstünden. Für den Einsatz passiv-seismischer Verfahren spricht, dass mit ihnen eine kontinuierliche Überwachung möglich ist. Bedacht werden muss allerdings, dass bei passiv-seismischen Messgeräten, die am Meeresboden liegen, diese vor Zerstörungen geschützt werden müssen. Das heißt, der Fischfang und das Anker von Schiffen und Booten müssten eventuell eingeschränkt werden. Vor der Umsetzung eines Kohlendioxid-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.

## Welche rechtlichen Rahmenbedingungen herrschen für diese Methode vor und welche Voraussetzungen müssen hergestellt werden, um Demonstrationsprojekte im industriellen Maßstab zu ermöglichen?

In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Rechts- und Geowissenschaftler:innen, unter welchen Voraussetzungen Demonstrationsprojekte zur Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der deutschen Nordsee mit den gesetzlichen und verordnungsrechtlichen Vorgaben vereinbar sind, und inwiefern Antrags- und Genehmigungsverfahren konkretisiert werden müssen, um Meeresschutz und -nutzung miteinander zu vereinbaren.

Aufgrund der bestehenden gesetzlichen Regelungen in Deutschland sind Projekte zur Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund in der deutschen Nordsee momentan nicht möglich. Auf internationaler Ebene hingegen wurden bereits im Jahr 2006 wichtige rechtliche Weichen gestellt: Mittlerweile kann die unterirdische Einlagerung von Kohlendioxid im Festlandsockel eines Küstenstaates und in anderen Gebieten des Meeresuntergrunds sowohl nach dem **Londoner Protokoll** als auch dem für die Nordsee geltenden **Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks** (OSPAR Übereinkommen) unter bestimmten Voraussetzungen erlaubt werden. Deutschland ist beiden Verträgen beigetreten.

Für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union gilt zudem die EU-Richtlinie zur Speicherung von Kohlendioxid, die Deutschland im August 2012 national unter anderem mit dem **Kohlendioxid-Speicherungsgesetz** (KSpG) in das nationale Recht 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 Kohlendioxidsspeichern bis zum Ende des Jahres 2016 hätten eingereicht werden müssen. 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 Meeres-



gebiete 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 Meeresuntergrunds 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 Rechtslage für Projekte zur Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der deutschen Nordsee klärungsbedürftig. Angesichts der zunehmenden Dringlichkeit, wirkungsvollen Klima- und Umweltschutz zu betreiben, sollten die bestehenden Hürden zum Zwecke der Demonstration dieser marinen CCS-Methode im nationalen KSpG abgebaut und durch mit allen Akteuren abgestimmte Lösungen ersetzt werden

## Speicherung von Kohlendioxid in Basaltgestein der ozeanischen Kruste

Die **Ozeankruste** ist ein Ort, an dem Kohlendioxid für Jahrtausende gebunden werden kann. Jedoch gibt es nur wenige Orte der Welt, wo diese Kruste über den Meeresspiegel hinausragt, z.B. bei Island. Aus diesem Grund untersuchen Forschende des

Verbunds AIMS<sup>3</sup> die Option, Kohlendioxid in Meeresregionen zu verpressen, in denen riesige Areale geeigneter Basaltkruste in mittlerer bis großer Wassertiefe liegen. Das Basaltgestein der oberen Ozeankruste ist porös und besonders reaktionsfreudig. Diese Struktur entsteht, wenn sich die 6 bis 8 Kilometer dicke Ozeankruste neu bildet. Das geschieht in sogenannten Spreizungszonen wie zum Beispiel dem Mittelatlantischen Rücken. In diesen Zonen der Erde bewegen sich zwei Erdplatten langsam auseinander, weil zwischen ihnen heißes Magma aus dem Erdinnern an die Oberfläche dringt. Kommt es mit dem kalten Meerwasser in Berührung, wird es an seiner Oberfläche »abgeschreckt«. Dabei verändert sich die Struktur des oberflächennahen Gesteins grundlegend und bildet ein Netzwerk aus winzigen Hohlräumen und Gängen.

**Wie viel Kohlendioxid sich speichern ließe, ist noch nicht umfassend untersucht.** Denn potenziell geeignete Gesteinsschichten finden sich nicht nur an mittelozeanischen Rücken, sondern auch in den sogenannten Flutbasaltprovinzen. Zu den derzeit laufenden Projekten gehören zum Beispiel Carbfix auf Island, das Forschungsvorhaben CO<sub>2</sub>Basalt auf dem Vöring-Plateau vor der Küste Norwegens sowie ein wissenschaftliches Projekt namens SolidCarbon im Cascadiabecken vor der Küste Kanadas.

### Warum kann CO<sub>2</sub> in Basaltkruste dauerhaft gebunden werden?

Der große Porenraum im **Basaltgestein** bietet ausreichend Volumen, um große Mengen verflüssigtes Kohlendioxid oder aber kohlendioxidreiches Wasser einzuleiten. Außerdem bietet der Porenraum viel Gesteinsoberfläche, an der das im Meerwasser gelöste Kohlendioxid mineralisieren kann. Das heißt, es wird durch die Bildung neuer Minerale gebunden.

Das Basaltgestein der oberen Ozeankruste enthält zahlreiche Minerale wie Eisen und Magnesium, die mit dem im Wasser gelösten Kohlendioxid reagieren. Im Zuge dieser Reaktion entsteht **Mineralkarbonat** – oder vereinfacht gesagt ein Gestein, in dem das einstige Kohlendioxid für Jahrtausende fest

gebunden ist. Dieser natürliche Prozess läuft ohnehin in der vom Meerwasser durchströmten oberen Basaltkruste ab. Durch die gezielte Zugabe von Kohlendioxid könnte der Prozess beschleunigt werden. Das Kohlendioxid-Meerwasser-Gemisch wäre aufgrund des hohen Druckes schwerer als reines Meerwasser und Leckagen aus dem Untergrund damit unwahrscheinlicher.

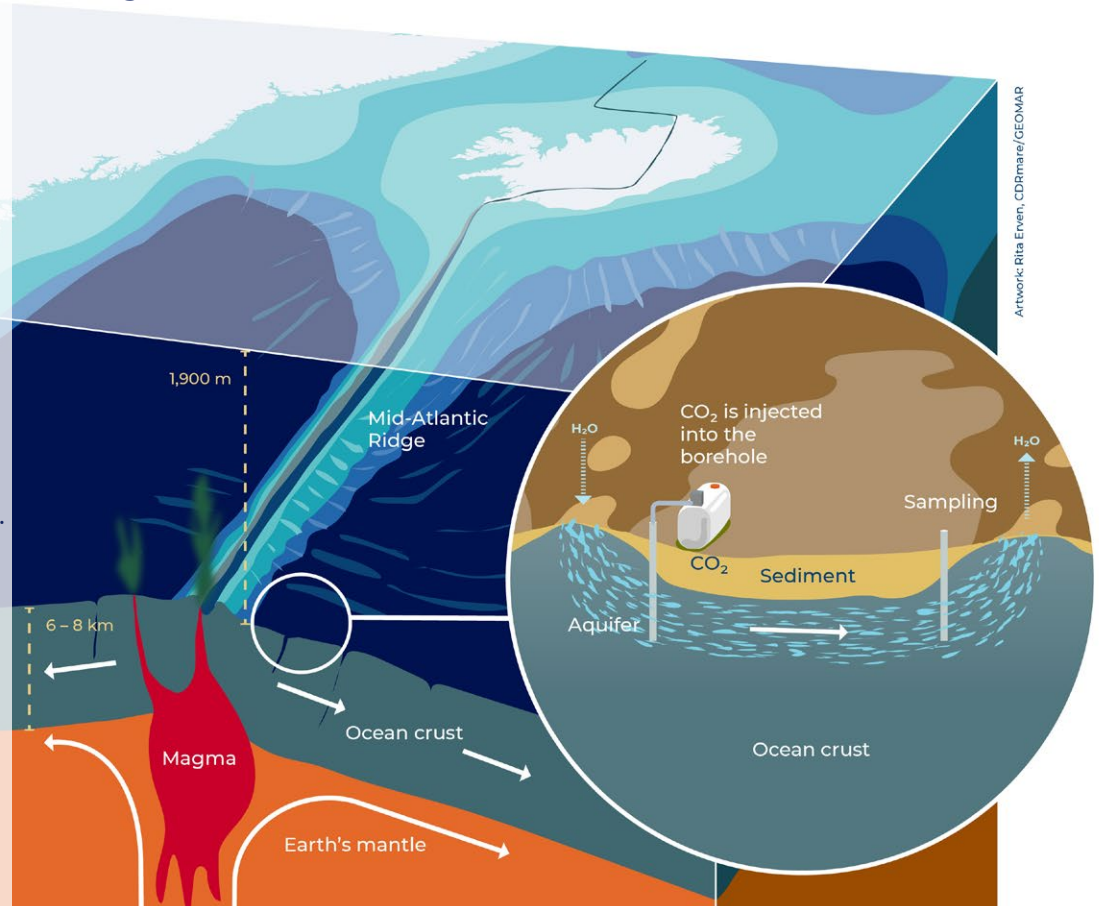
## Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer-Kruste

Kosten: auf Island etwa 25 bis 45 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>, aber für **größere Meerestiefen bislang unklar.**

Skalierbarkeit: Eine **Kohlendioxid-Einlagerung im industriellen Maßstab ist theoretisch möglich.**

Dauer der Speicherung: Nach seiner Mineralisierung ist das Kohlendioxid für **viele Jahrmillionen** fest gebunden.

Technischer Entwicklungsstand: Auf Island wird mit Kohlendioxid angereichertes Meerwasser seit dem Jahr 2014 erfolgreich in die obere Ozeankruste verpresst. **In größeren Wassertiefen ist dieses Verfahren bisher nur unzureichend getestet worden.**



*Das hochporöse und reaktionsfreudige Basaltgestein der oberen Erdkruste ist ein idealer Speicherort für abgeschiedenes Kohlendioxid. In einem ersten Kohlendioxid-Einleitungsexperiment in der Tiefsee untersuchen Forschende nun, ob das auch unter Tiefseebedingungen der Fall ist und auf welche Weise sich das injizierte Kohlendioxid im Basaltgestein verteilt und dort mineralisiert.*

Ist die dauerhafte Speicherung von CO<sub>2</sub> im mittelozeanischen Rücken technisch machbar und ökonomisch und ökologisch sinnvoll?

Bei einer möglichen Speicherung von Kohlendioxid in **der oberen Basaltschicht der Kruste des mittelozeanischen Rückens** liegen die industriellen Zentren, in denen das meiste Kohlendioxid anfällt, meist fernab. Folglich müsste das Treibhausgas zunächst in verflüssigter Form über lange Strecken transportiert werden, bevor es in das Basaltgestein eingeleitet werden könnte.

Wenn das verflüssigte Kohlendioxid in größerer Wassertiefe direkt in den Porenraum der Basalte verpresst wird, stünden nicht nur mehr potentielle Speicherorte zur Auswahl. Es ließen sich innerhalb kurzer Zeit auch sehr große Mengen Kohlendioxid einlagern, die aufgrund von Druck und Temperatur automatisch im Speichergestein verbleiben. Die Mineralisierungsrate ließe sich zudem steigern, indem dem Kohlendioxid Meerwasser beigemischt und es so verdünnt werden würde. Allerdings würde bei diesem Ansatz deutlich mehr Zeit benötigen werden, um dieselbe Menge Kohlendioxid zu verpressen, da die Ozeankruste an der Rückenflanke kälter ist.

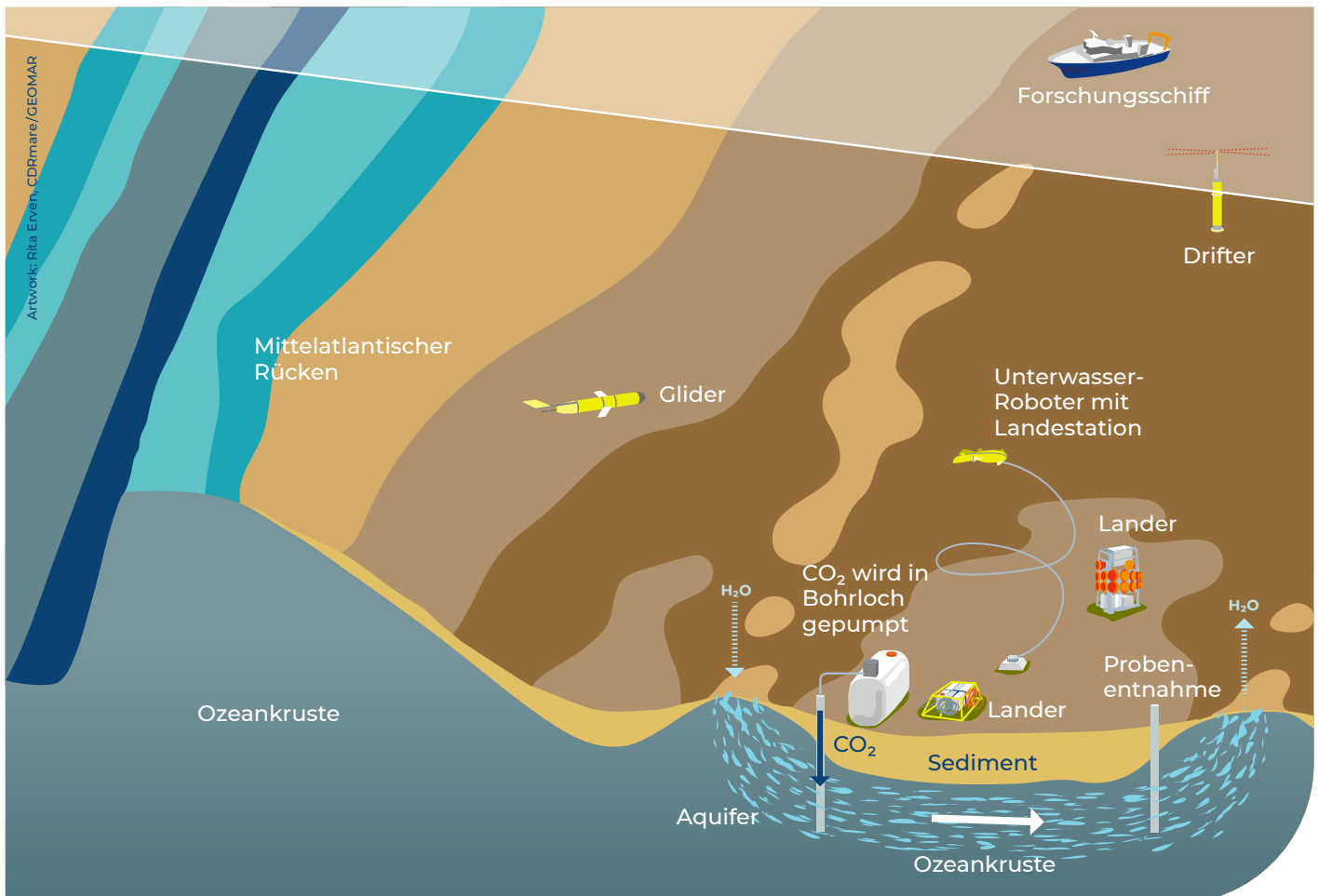
Arbeiten in der Tiefsee bringen meist hohe Kosten mit sich und die Fachleute könnten dadurch Gefahr laufen, an die Grenzen der technischen Machbarkeit zu stoßen.

In AIMS<sup>3</sup> wird ein **erstes wissenschaftliches Experiment im Sommer 2023 in der nordatlantischen Tiefsee** durchgeführt. Forschende werden etwa 40 Meter tief in das Basaltgestein an der Ostflanke des Reykjanes-Rückens bohren und in den Bohrlöchern Temperatur-, Druck- und chemische Sensoren installieren. Diese werden in der Folgezeit alle wichtigen physikalischen und chemischen Parameter der oberen Erdkruste erfassen. Zwei Jahre später, im Sommer 2025, will das Forscherteam Kohlendioxid durch die Bohrlöcher in das Basaltgestein injizieren und dessen Verteilung und chemische Reaktionen mit dem Porenwasser und dem umliegenden Gestein langfristig überwachen. Dabei werden die Wissenschaftler:innen das Kohlendioxid sowohl in reiner, verflüssigter Form verpressen als auch gemischt mit Meerwasser in verschiedenen Konzentrationen bis hin zu »Sprudelwasser« (circa 2 Prozent Kohlendioxid).

Dabei gilt es herauszufinden, ob alle theoretischen Vorüberlegungen zur Kohlendioxid-Speicherung in der oberen ozeanischen Kruste richtig und zielführend sind und eine Kohlendioxid-Injektion in den Tiefsee-Untergrund tatsächlich umsetzbar ist. Es stellt sich zum Beispiel die Frage, mit welchen Verfahren sich die Speicherstätte in der Tiefsee verlässlich und langfristig überwachen ließe oder welche Kosten entstünden und ob es mögliche Fallstricke gäbe, die bislang keinerlei Berücksichtigung gefunden haben. Außerdem wollen die Forschenden herausfinden, mit welchen Methoden sie das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis erreichen. Dazu gehört auch eine Antwort auf die Frage, in welcher Konzentration und in welchen Mengen Kohlendioxid in das Basaltgestein injiziert werden sollte, um optimale Reaktionsprozesse zu ermöglichen.

## Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste

Skizze des Versuchsaufbaus Forschungsverbund AIMS<sup>3</sup>



Den Bohrungen und dem Experiment gingen umfangreiche Vorerkundungen im Sommer 2022 voraus. Bei dieser ersten Forschungsfahrt wurde das Gebiet geophysikalisch vermessen, die Sedimentschicht im anvisierten Becken umfassend untersucht, und ein als Lander bezeichnetes Forschungsgerät am Meeresboden abgestellt, welches die biogeochemischen Stoffflüsse aufzeichnete. Auf Basis der verschiedenen Ergebnisse wurden im Anschluss die optimalen Bohrstellen für das Einleitungsexperiment bestimmt.

### Welche langfristigen und zielgerichteten wissenschaftlichen Beobachtungen müssen konzipiert werden, um CCS in Basalt zu überwachen?

Der Ozean ist der größte Kohlenstoffspeicher unseres Planeten. Seine Wassermassen enthalten bereits auf natürliche Weise viel Kohlenstoff – vor allem in Form von gelöstem Kohlendioxid, gelöstem Hydrogencarbonat und gelöstem Karbonat. Dieser Umstand stellt Wissenschaftler:innen vor die Aufgabe, bei Feldexperimenten zur Kohlendioxid-Speicherung genau zu unterscheiden, welcher Anteil des enthaltenen Kohlenstoffs natürlichen Ursprungs ist und welcher Anteil im Zuge des Experimentes in die Wassersäule gelangen könnte.

Für die Speicherung in Basaltgestein ist eine Herausforderung, Methoden zu finden, mit denen sich die Verteilung des injizierten Kohlendioxids im Basaltgestein sowie mögliche chemische Reaktionen flächendeckend und vor allem zeitnah überwachen lassen. Beides geht entweder durch **geochemische Messungen direkt im Gestein** oder aber durch die **Entnahme von Porenwasser**, dessen Proben im Anschluss analysiert werden. **Tiefseetaugliche Lösungen** für solche Forschungsarbeiten gibt es bisher nur wenige, vor allem kaum tiefseetaugliche Sensoren – die Grundlage für schnelle, vergleichsweise günstige Messungen.

In dem Forschungsverbund AIMS<sup>3</sup> entwickeln Wissenschaftler:innen und Ingenieur:innen gemeinsam (tief)seetaugliche Sensoren für die schnelle Echtzeitbestimmung der Temperatur, des pH-Werts sowie des Kohlendioxid- und Kohlenstoffgehaltes im Porenwasser der oberen Erdkruste, sowie im bodennahen Tiefenwasser. Mit diesen Sensoren werden sowohl Kontroll-Bohrlöcher in unmittelbarer Nähe des Injektionsbohrloches ausgestattet als auch alle Messsysteme, die den Meeresboden und die untere Wassersäule rund um die Injektionsstellen auf mögliche Kohlendioxid-Leckagen hin überwachen. Die Geräte und ihre vielen Sensoren müssen nicht nur der kalten Umgebungstemperatur und dem hohen Druck in der Tiefsee standhalten. Da Schiffseinsätze teuer sind, müssen sie eigenständig und so energiesparend operieren, dass sie über lange Zeiträume hinweg am Meeresboden verbleiben können – ganz ohne Signale oder Wartung vom Schiff aus.

In dem Forschungsverbund AIMS<sup>3</sup> werden außerdem **neue tiefseetaugliche Lander-Systeme** entwickelt, die den oberen Teil des Meeresbodens und das bodennahe Tiefenwasser nach Kohlendioxid-Leckagen absuchen sollen. Solche Systeme bestehen in der Regel aus einem Grundgerüst, welches mit Batterien, missionsspezifischer Messtechnik und Auftriebskörpern ausgestattet ist und mit einer Metallplatte beschwert in die Tiefsee hinabgelassen wird. Ist der Einsatz beendet, wird die Metallplatte via Funksignal ausgeklinkt und der Lander steigt mit seinen Daten wieder zur Meeresoberfläche auf.

### Was sind die rechtlichen Rahmenbedingungen dieser Methode und welche rechtlichen Voraussetzungen müssen für die weitere Erforschung geschaffen werden?

Die Kohlendioxid-Speicherung in Basaltgestein im mittelozeanischen Rücken wirft auch rechtliche Fragen auf. So bedarf es unter anderem der Klärung, ob das Transportieren und Einlagerungen von CO<sub>2</sub> in den Meeresboden zu Forschungszwecken mit geltendem Recht vereinbar wäre. Diese Frage stellt sich vor allem deshalb, weil das 1996 geschlossene **Protokoll zum Londoner Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffe (Londoner Protokoll, LP)** – ein verbindlicher völkerrechtlicher Vertrag, dem die Bundesrepublik Deutschland beigetreten ist – dem Grunde nach auch auf ein Einbringen im Meeresuntergrund anwendbar ist. Somit handelt es sich bei der Kohlendioxid-Speicherung in Basaltgestein um eine Tätigkeit im Ozean, die im Rahmen des Seevölkerrechts ähnlich wie eine Abfallbeseitigung geregelt ist, in

der Sache aber auf die Erhöhung des Kohlendioxid-Aufnahmepotenzials des Meeresbodens abzielt und somit ein Klimaschutzrechtliches Ziel verfolgt. Mangels Existenz von Haftungsregelungen, die konkret auf die wissenschaftliche Meeresforschung und/oder das Einbringen von Stoffen in den Meeresuntergrund bezogen sind, besteht dabei unter anderem im Hinblick auf die Folgen etwaiger CO<sub>2</sub>-Austritte und andere Langfristfolgen Rechtsunsicherheit. Noch nicht abschließend geklärt ist darüber hinaus, ob und gegebenenfalls, in welchem Umfang diese Art der Speicherung und deren Erforschung auf seevölkerrechtlicher Ebene von den Vorgaben über den Tiefseebodenbergbau erfasst sein könnten.

Der auf die Ziele des Klimaschutzes ausgerichtete Zweck der Kohlendioxid-Speicherung in Basaltgestein spiegelt sich im deutschen **Gesetz über das Verbot der Einbringung von Abfällen und anderen Stoffen und Gegenständen in die Hohe See** (Hohe-See-Einbringungsgesetz, HSEG), bislang nicht ausreichend wider. Dieses Gesetz, mit dem die Bundesrepublik Deutschland das Londoner Protokoll in innerstaatliches deutsches Recht überführt hat, regelt, ob und gegebenenfalls unter welchen Bedingungen das Einbringen von Stoffen in die Wassersäule und den Meeresuntergrund genehmigungsbedürftig und -fähig sind. Einlagerungen von CO<sub>2</sub> in den Meeresboden jenseits der unter deutscher Hoheitsgewalt stehenden Meeresgebiete lässt es bislang nicht zu – auch wenn zu beachten ist, dass das HSEG nur insoweit gilt, als die Einleitung in der deutschen AWZ, von deutschen Schiffen aus, von in deutschem Eigentum stehenden Anlagen auf Hoher See aus oder von fremden Schiffen, die in Deutschland mit verflüssigtem CO<sub>2</sub> beladen wurden, aus erfolgt. Die Kohlendioxid-Speicherung in Basaltgestein setzt deshalb, soweit sie von deutschen Schiffen aus vorgenommen werden soll, eine Änderung bzw. Ergänzung des HSEG voraus, mit der diese Tätigkeit als genehmigungsfähig anerkannt wird.

## Referenzen

- Bundesregierung (2022): *Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG)*, Berlin, p. 216.
- CDRmare (2024): *Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee*, CDRmare Research Mission – Version 2, pp. 1-8, DOI 10.3289/CDRmare.06\_V4.
- CDRmare (2023): *Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste*, CDRmare Research Mission – Version 2, pp. 1-8, DOI 10.3289/CDRmare.10\_V2.
- CDRmare (2022): *Der natürliche Kohlenstoffkreislauf der Erde – Kohlenstoffspeicher Ozean: So nimmt das Meer Kohlendioxid auf*. CDRmare Research Mission, pp. 1-8, DOI 10.3289/CDRmare.04.
- Lübbers, S., Wünsch, M., Lovis, M., Wagner, J., Sensfuß, F., Luderer, G. and Bartels, F. (2022): *Vergleich der »Big 5« Klimaneutralitätsstudien*. DENA.
- Mengis et al. (2022): *Net-zero CO<sub>2</sub> Germany—a retrospect from the year 2050*. *Earth's Future*, 10(2):e2021EF002324
- Merfort, A., Stevanovic, M., and Strefler, J. (2023): *Energiewende auf Netto-Null: Passen Angebot und Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen? Kopernikus-Projekt Ariadne*, Potsdam
- Proelß, A. and Westmark, L. (2022): *Seevölkerrechtliche Anforderungen der unterseeischen Speicherung von CO<sub>2</sub>*. *KlimR*, 8/2022. pp. 234-240.

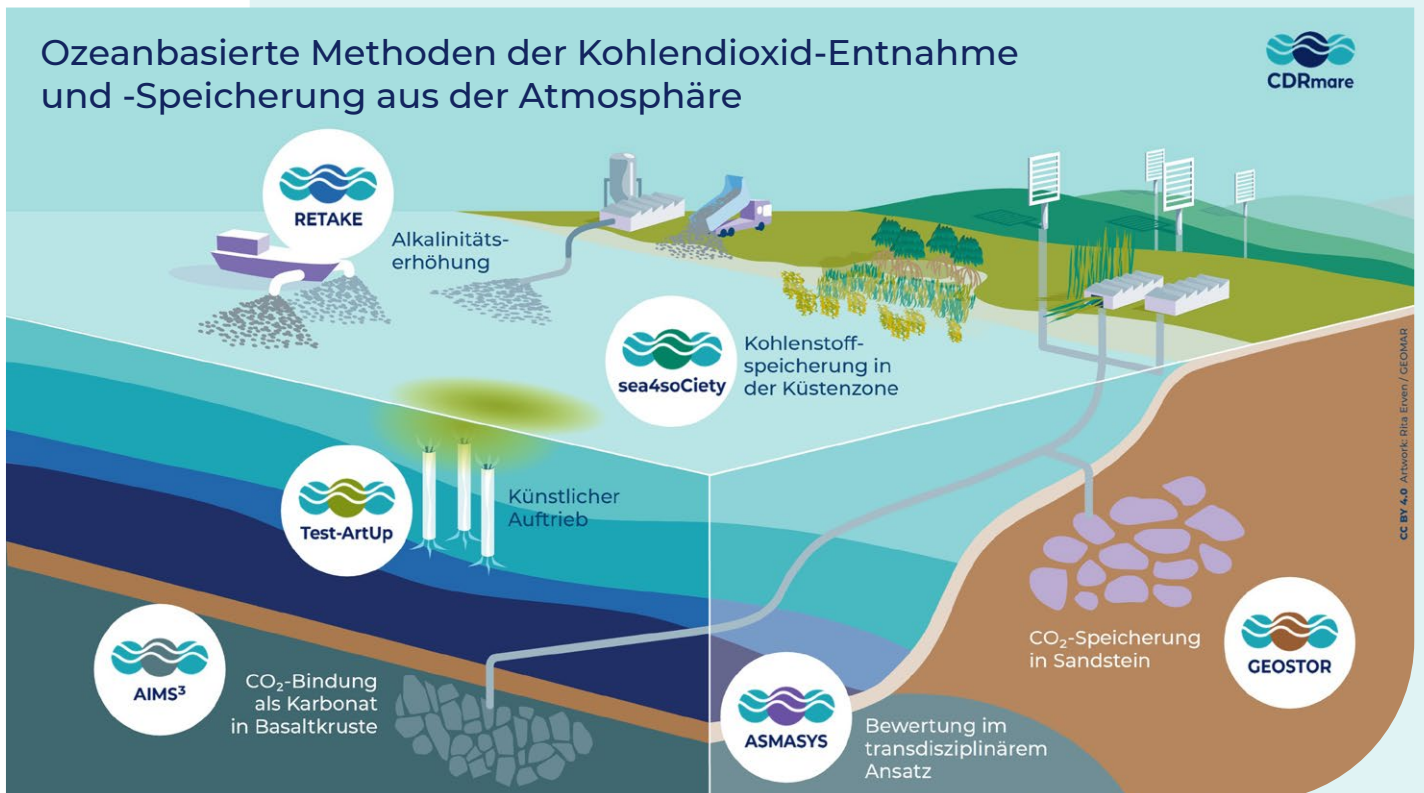


Die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den norddeutschen Bundesländern geförderte Forschungsmission »Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung – CDRmare« (CDR: Carbon Dioxide Removal) der Deutschen Allianz Meeresforschung untersucht, ob und in welchem Umfang der Ozean eine wesentliche Rolle bei der Entnahme und Speicherung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre spielen kann. Es werden dabei die Wechselbeziehungen mit und die Auswirkungen auf die Meeresumwelt, das

Erdsystem und die Gesellschaft sowie geeignete Ansätze für die Überwachung, Attribution und Bilanzierung der marinen Kohlenstoffspeicherung in einer sich verändernden Umwelt betrachtet. Seit August 2021 wird CDRmare in seiner ersten dreijährigen Phase vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit 26 Mio. Euro gefördert.

Bisher werden vor allem landbasierte Ansätze zur CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Speicherung diskutiert, die häufig in Konkurrenz mit anderen Landnutzungen stehen. Weitere Lösungsoptionen bietet der Ozean aufgrund seiner umfassenden klimaregulierenden Fähigkeiten.

Die Forschungsmission CDRmare besteht aus sechs Konsortien, die verschiedene Methoden der marinen CO<sub>2</sub>-Entnahme und Speicherung (Alkalinisierung, Blue Carbon, künstlicher Auftrieb, CCS) im Hinblick auf ihr Potenzial, ihre Risiken und ihre Zielkonflikte untersuchen und sie in einem transdisziplinären Bewertungsrahmen zusammenführen. Wichtig zu wissen: Alle Methoden haben ein unterschiedliches Kohlendioxid-Entnahmepotenzial und sind im Hinblick auf ihren technischen Entwicklungsstand im unterschiedlichen Maße anwendungsbereit.



GEFÖRDERT VOM

