

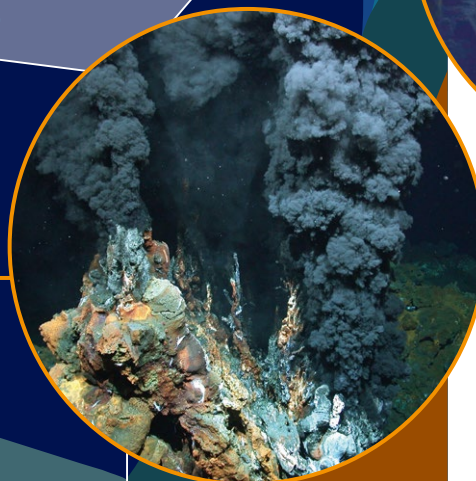
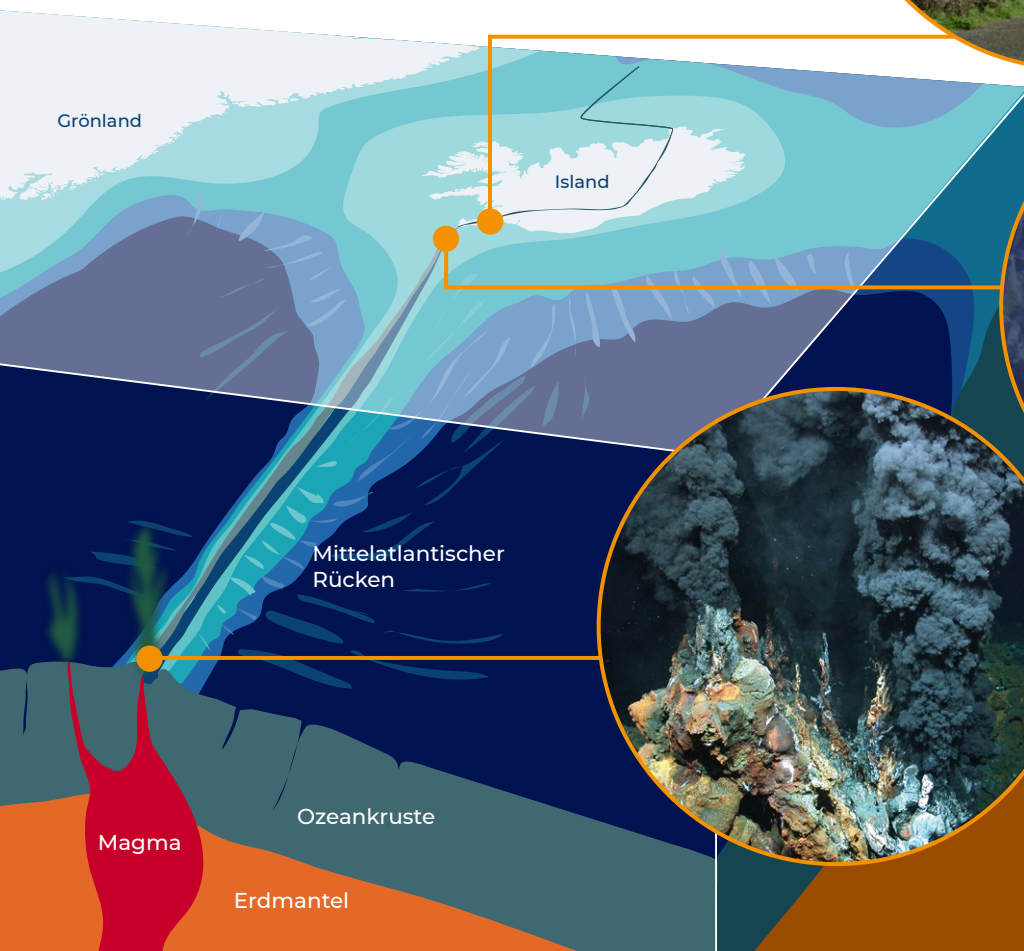
Geologische Methoden

## Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste

Auf Island wird seit dem Jahr 2014 mit Kohlendioxid angereichertes Wasser in die obere Ozeankruste injiziert – und das erfolgreich. Das Kohlendioxid mineralisiert innerhalb kurzer Zeit und wird für Jahrmillionen fest gebunden. Da die Ozeankruste jedoch nur an wenigen Orten der Welt über den Meeresspiegel hinausragt, untersuchen Forschende derzeit die Option, Kohlendioxid in Meeresregionen zu verpressen, in denen riesige Areale geeigneter Basaltkruste in mittlerer bis großer Wassertiefe liegen. Ein möglicher Vorteil: Im Untergrund der Tiefsee würde sich das Kohlendioxid mit Meerwasser mischen, welches im Gestein zirkuliert, oder sich darin lösen. Dieses Kohlendioxid-Meerwasser-Gemisch wiederum wäre aufgrund des hohen Druckes schwerer als reines Meerwasser und Leckagen aus dem Untergrund damit unwahrscheinlicher. Doch wäre eine Kohlendioxid-Speicherung im Tiefsee-Untergrund technisch machbar und am Ende auch ökonomisch sinnvoll? Die Forschungsmission CDRmare liefert Antworten – mithilfe eines weltweit ersten Tiefsee-Forschungsexperimentes zur Kohlendioxid-Speicherung an erkalteten Flanken des Mittelatlantischen Rückens.

## Das große Klimaziel: Eine Netto-Null der Kohlendioxid-Emissionen

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).



Der mittelatlantische Rücken ist eine sogenannte Spreizungszone, in der zwei Erdplatten langsam auseinander driften, weil zwischen ihnen heißes Magma aus dem Erdinneren an die Oberfläche dringt. Er verläuft überwiegend in der Tiefsee, steigt auf Island aber aus dem Meer empor. Sowohl an Land als auch unter Wasser markieren deutlich sichtbare Felsspalten, wo sich die Platten voneinander wegbewegen.

Fotos v.o.: Andrea S. CC BY 2.0 /Flickr.com, Michael Cramer/Pixabay.com, MARUM; Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

Vom Menschen verursachte Kohlendioxid-Emissionen entstehen durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle sowie durch eine veränderte Landnutzung. Bislang weiß niemand, wie die Menschheit diese Emissionen künftig zu 100 Prozent auf ökologische und sozialverträgliche Weise vermeiden kann. Vielmehr gehen Expert:innen davon aus, dass Deutschland auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch Kohlendioxid-Restmengen und andere Treibhausgase emittieren wird. Deren Höhe wird in optimistischen Szenarien auf 10 bis 20 Prozent der aktuellen Emissionen geschätzt. Das entspricht einem Ausstoß von jährlich etwa 60 bis 130 Millionen Tonnen Treibhausgasen, darunter zu einem Großteil Methan und Lachgas.

Um diese Rest-Emissionen auszugleichen, wird die Menschheit Kohlendioxid entweder direkt an den Quellen auffangen oder aber im selben Umfang aus der Atmosphäre entnehmen müssen. Anschließend muss das Gas zu langlebigen Produkten weiterverarbeitet oder unterirdisch eingelagert werden. Verfahren zur Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung werden auch als CCS bezeichnet. Die Abkürzung steht für die englische Bezeichnung: carbon capture and storage. Eine Kernfrage aber lautet nun: Wo auf der Erde lassen sich große Mengen Kohlendioxid sicher und dauerhaft im Untergrund einlagern?

## Porös und reaktionsfreudig: Das Basaltgestein der oberen Ozeankruste

Als geologischer Kohlendioxid-Speicher bieten sich unter anderem die Basaltgesteine der oberen ozeanischen Erdkruste an. Wer beim Wort Basaltgestein an Kopfsteinpflaster denkt, hat tatsächlich Basaltgestein vor Augen. Die Gesteine der oberen 100 bis 400 Meter Ozeankruste aber haben wenig mit dem dichten, feinkörnigen Gestein zu tun, mit dem wir Menschen Marktplätze oder Hofeinfahrten pflastern. Stattdessen sind diese Gesteinsschichten hochporös und stellenweise von zentimetergroßen Blasen durchzogen.

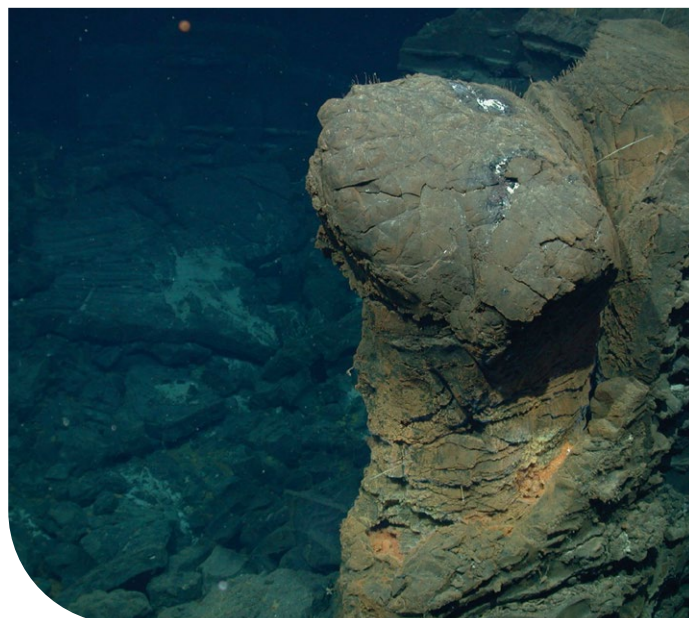
Diese charakteristische Poren- und Blasenstruktur entsteht, wenn sich die 6 bis 8 Kilometer dicke Ozeankruste neu bildet. Das geschieht in sogenannten Spreizungszonen wie zum Beispiel dem Mittelatlantischen Rücken. In diesen Zonen der Erde bewegen sich zwei Erdplatten langsam auseinander, weil zwischen 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. Es wirft Blasen, bricht und reißt an vielen winzigen Stellen und bildet schließlich ein Netzwerk aus winzigen Hohlräumen und Gängen, welches den oberen Teil des Basaltgesteins fortan flächendeckend durchzieht.

Durch dieses unterirdische Porennetzwerk zirkuliert Meerwasser. Man kann sich die oberen 400 Meter Basaltgestein wie ein riesiges Leitungssystem für Fluide (Flüssigkeiten und Gase) vorstellen. Es bildet die größte wasserführende Gesteinsformation (Aquifer) der Erde, direkt unter dem Ozean.

Zugleich erfüllt das abgeschreckte und sich langsam abkühlende Basaltgestein viele Voraussetzungen, um als Kohlendioxid-Speicher zu fungieren. Sein großer Porenraum bietet zum Beispiel ausreichend Volumen, um große Mengen verflüssigtes Kohlendioxid oder aber kohlendioxidreiches Wasser einzuleiten. Außerdem offeriert der Porenraum viel Gesteinsoberfläche, an der das im Meerwasser gelöste Kohlendioxid mineralisieren kann. Das heißt, es wird durch die Bildung neuer Minerale gebunden.

Die chemischen Voraussetzungen für eine solche Mineralisierung sind ebenfalls gegeben. Das Basaltgestein der oberen Ozeankruste enthält zahlreiche Minerale wie Eisen und Magnesium, die mit dem im Wasser gelösten Kohlendioxid reagieren. Im Zuge dieser Reaktion entstehen Karbonatminerale – oder vereinfacht gesagt Gesteine, in denen das einstige Kohlendioxid dann 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 man ihn beschleunigen.

Wie viel Kohlendioxid sich theoretisch in der oberen Ozeankruste speichern ließe, ist noch nicht gründlich untersucht. Derzeit aber gehen Expert:innen davon aus, dass die theoretische mineralische Kohlendioxid-Speicherkapazität der mittelozeanischen Rücken unseres Planeten um ein Vielfaches größer ist als die Menge an Kohlendioxid, die bei der Verbrennung aller fossilen Rohstoff-Vorkommen auf der Erde freigesetzt würde. Denn potentiell geeignete Gesteinsschichten finden sich nicht nur an mittelozeanischen Rücken, sondern auch in den sogenannten Flutbasaltprovinzen, die oft untermeerische Plateaus aus Basalten mit hoher Porosität oder Blasigkeit bilden.

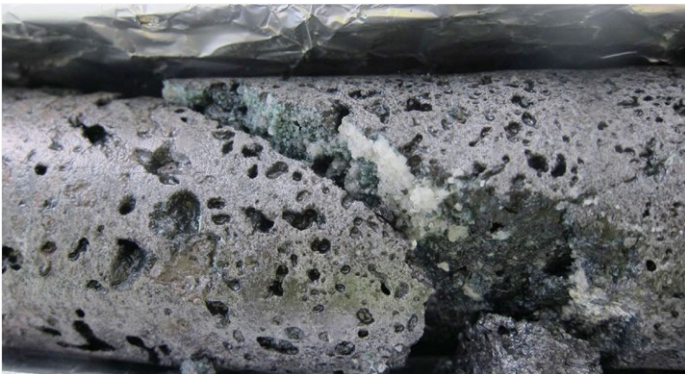


Dieser Unterwasserfels entstand bei einem untermeerischen Lavaausbruch am Mittelatlantischen Rücken in 2950 Metern Wassertiefe. Er weist die typische Oberflächenstruktur erkalteten Basaltgesteins auf. Das Foto wurde vom Tauchroboter MARUM-QUEST im südlichen Atlantischen Ozean aufgenommen. Foto: MARUM, Universität Bremen

## Erfolgsprojekt auf Island: Kohlendioxid mineralisiert im reaktionsfreudigen Basaltgestein

Auf Island wird im Projekt Carbfix seit dem Jahr 2014 abgeschiedenes und im Wasser gelöstes Kohlendioxid in die obere Ozeankruste injiziert. Die Vulkaninsel liegt genau auf dem Mittelatlantischen Rücken, sodass junges, noch warmes und damit sehr reaktionsfreudiges Basaltgestein schon durch vergleichsweise kurze Bohrungen zu erreichen ist. Die Mineralisierungsraten sind dementsprechend hoch: Innerhalb von zwei Jahren mineralisieren aufgrund der hohen Reaktivität der heißen Kruste Islands circa 98 Prozent des injizierten Kohlendioxids und sind somit fest im Untergrund gebunden. Bis Juni 2022 hatte Carbfix nach eigenen Angaben mehr als 80.000 Tonnen Kohlendioxid in die Erdkruste injiziert, wobei allerdings viel geothermische Energie und große Mengen Süßwasser verbraucht wurden.

Da es auf der Welt jedoch nur wenige Orte gibt, an denen ozeanische Kruste über die Meeresoberfläche ragt (etwa auf Island und den Azoren), richtet die Wissenschaft ihren Blick in größere Wassertiefen, wo sich global betrachtet zehntausende Kilometer mittelozeanische Rücken finden, in deren Basaltkruste man Kohlendioxid einlagern könnte.



Für diese Idee spricht, dass in größeren Tiefen hohe Drücke wirken. Diese tragen entweder dazu bei, das injizierte Kohlendioxid im Meerwasser zu lösen, welches in der Basaltkruste zirkuliert – selbiges würde dadurch dichter und schwerer – oder aber, dass sich das Kohlendioxid verflüssigt. Dabei würde es sich derart verdichten, dass es ab einem Druck von 280 bar (ab einer Wassertiefe von etwa 2800 Metern) schwerer wäre als das Meerwasser in vergleichbarer Tiefe und nicht mehr aus dem Untergrund aufsteigen könnte. Kohlendioxid-Leckagen aus dem Untergrund wären somit unwahrscheinlicher, wobei ein mögliches Restrisiko von den lokalen Temperatur- und Druckbedingungen abhängt.

Eine Kohlendioxid-Einlagerung im Tiefseeuntergrund brächte allerdings auch Nachteile: In erkalteter Basaltkruste würde injiziertes Kohlendioxid in einem deutlich geringeren Maße mineralisieren als in warmem Gestein. Außerdem entstünden durch die Arbeit in der Tiefsee hohe Kosten und die Fachleute liefen Gefahr, an die Grenzen der technischen Machbarkeit zu stoßen.

Dieses Foto zeigt Kalzit, welches sich durch die Wechselwirkung zwischen kohlendioxid-haltigem Wasser und dem Gestein am Carbfix-Standort auf Island im Basalt gebildet hat.

Foto: Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir, Wiki Commons

## Ein breites Spektrum der Möglichkeiten

Aufgrund dieser komplexen Ausgangslage müssen die Ziele einer möglichen Speicherung von Kohlendioxid im oberen Teil der Ozeankruste genau abgewogen werden. Das kostengünstigste Verfahren wäre sicherlich, Kohlendioxid im Meerwasser zu lösen und in geringer Wassertiefe niedrigkonzentriert mit hohen Mineralisierungsraten in die Ozeankruste zu verpressen – genau so, wie es bereits auf Island gemacht wird. Die wenige Gebiete, in denen der mittelozeanische Rücken über den Meeresspiegel herausragt, liegen jedoch meist fernab industrieller Zentren, in denen das meiste Kohlendioxid anfällt. Folglich müsste das Treibhausgas zunächst in verflüssigter Form über lange Strecken transportiert werden, bevor es in das Basaltgestein eingeleitet werden könnte.

Würde man hingegen das verflüssigte Kohlendioxid in größerer Wassertiefe direkt in den Porenraum der Basalte verpressen, 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, dort aber nur sehr langsam mineralisieren würden. Die Mineralisierungsrate wiederum ließe sich steigern, indem man dem Kohlendioxid Meerwasser beimischt und es so verdünnt. Allerdings würde man bei diesem Ansatz deutlich mehr Zeit benötigen, um dieselbe Menge Kohlendioxid zu verpressen, da die Ozeankruste an der Rückenflanke kälter ist als beispielsweise bei Carbfix auf Island.



## Auf der Suche nach der optimalen Lösung: Ein Kohlendioxid-Experiment in der Tiefsee

Um künftige politische und gesellschaftliche Diskussionen zur Kohlendioxid-Speicherung in der oberen Ozeankruste mit umfassendem Handlungswissen zu unterfüttern, führen Geolog:innen im Rahmen der Forschungsmission CDRmare ein erstes wissenschaftliches Kohlendioxid-Einleitungsexperiment in der nordatlantischen Tiefsee durch. Mit ihm wollen sie das Spektrum denkbarer Kohlendioxid-Speicheroptionen in der ozeanischen Kruste abstecken – mit Island als landgestütztem Ausgangspunkt auf der einen Seite und den Erkenntnissen aus dem Tiefsee-Experiment als Gegenstück auf der anderen.

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.

Wichtig ist dabei anzumerken: Die im Rahmen der Mission geplanten wissenschaftlichen Bohrungen und das dazugehörige Einleitungsexperiment dienen einzig und allein Forschungszwecken. Selbst wenn alle wissenschaftlichen Arbeiten erfolgreich abgeschlossen werden und sich die obere Ozeankruste als sehr geeignet erweisen sollte, bedeutet dies nicht, dass genau an diesem Ort mit einer Kohlendioxid-Speicherung im großen Maßstab begonnen würde. Das Ziel der Arbeiten im Rahmen der Forschungsmission CDRmare lautet einzig und allein, bestehende Wissenslücken zur Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste zu schließen und herauszufinden, ob eine Kohlendioxid-Einlagerung in der Tiefsee im Vergleich zu Speicherungen an Land oder in den tiefen Sandsteinen unter der Nordsee die nachhaltigere, effektivere und langfristig kostengünstigere Option wäre.

### 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:

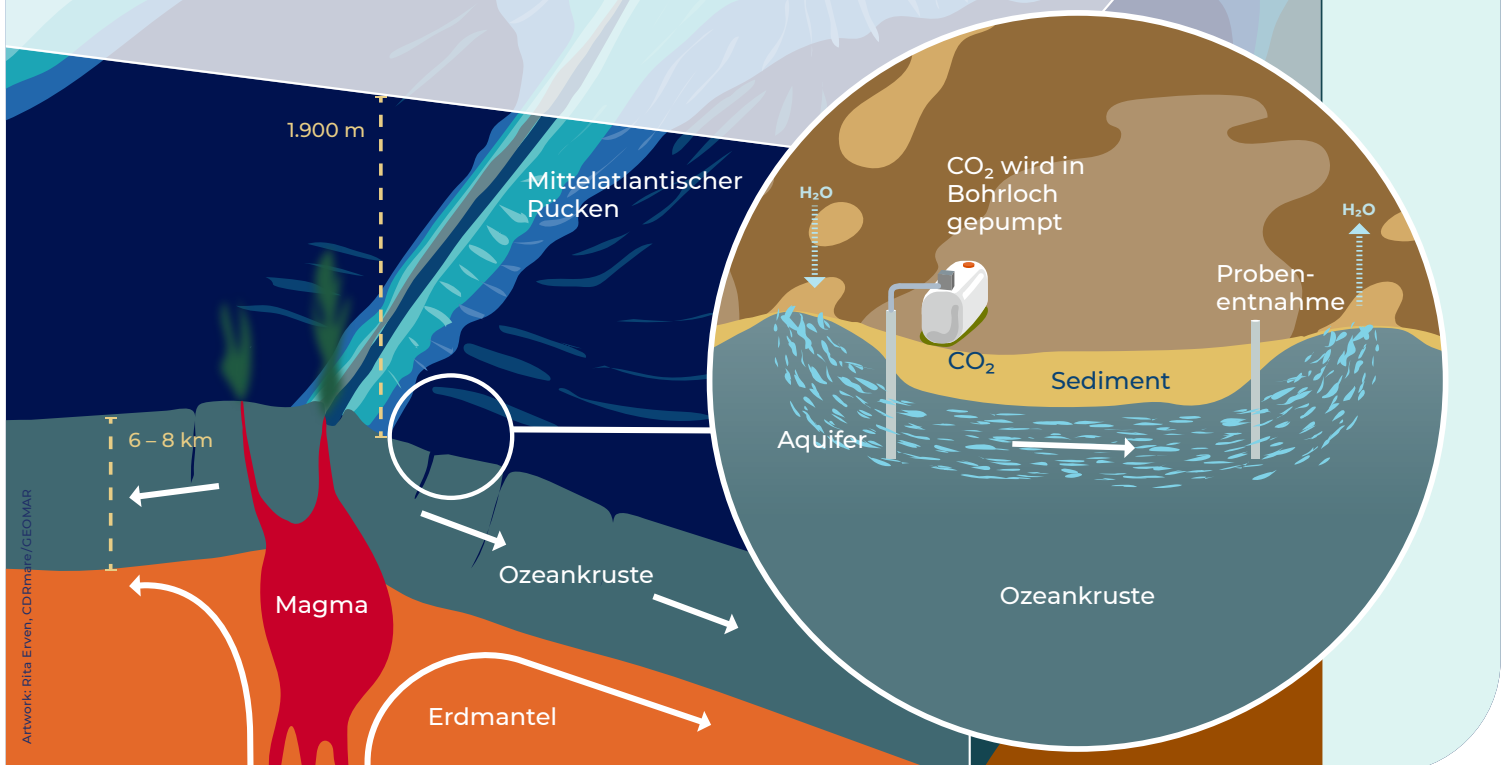
Eine **Kohlendioxid-Einlagerung im industriellen Maßstab ist theoretisch möglich**.

#### Dauer der Speicherung:

Nach seiner Mineralisierung ist das Kohlendioxid für **viele Jahrtausende** 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.**



## Wo und wann soll das Kohlendioxid-Einleitungsexperiment in der Tiefsee stattfinden und was weiß man über die Beschaffenheit der oberen Ozeankruste vor Ort?

*Das Experiment soll im Sommer 2025 in großen Wassertiefen des Nordatlantiks starten, voraussichtlich im Bereich der Ostflanke des südlichsten Zipfels des Reykjanes-Rückens. Dieser liegt in der Region um 58° Nord und 32° West und damit etwa 800 Kilometer südlich von Island. Untersucht wird aber auch eine alternative Bohrstelle. Diese befindet sich weiter nördlich am Reykjanes-Rücken, etwa 300 Kilometer südlich Islands (62° Nord / 26° West), und liegt in deutlich flacherem Wasser.*

In einer Wassertiefe von etwa 1900 Metern (1. Option) beziehungsweise etwa 800 Metern (2. Option) finden sich an der Rückenflanke eine Reihe von Sedimentbecken, die sich als Arbeitsgebiet für die Forschenden anbieten. In einem dieser Becken wurde bereits in der Vergangenheit im Rahmen eines internationalen geologischen Forschungsprojektes gebohrt. Aus diesem Grund weiß man bereits, dass die obere Basaltkruste in dieser Meeresregion etwa 1 bis 2 Millionen Jahre alt ist und die notwendige Porosität aufweist. Ihre Gesteinstemperatur liegt unter der kritischen Grenze von 31 Grad Celsius, oberhalb derer flüssiges Kohlendioxid wieder überkritisch wird. Das heißt, die Dichte des Kohlendioxids verändert sich derart, dass man nicht mehr zwischen flüssiger Phase und Gasphase unterscheiden kann. Zudem ist der Druck in der Tiefe hoch genug, um das Kohlendioxid auch wirklich stabil im flüssigen Zustand zu halten.

Außerdem ist bekannt, dass in Sedimentbecken wie diesem das Meerwasser in einem steten Tempo und über Entfernungen von 20 bis 50 Kilometern durch die obere Basaltkruste zirkuliert. So lange das Kohlendioxid (verflüssigt oder angereichert im Meerwasser) ausreichend dicht ist, würde eine solche unterirdische Zirkulation die Einlagerung beziehungsweise Mineralisierung von Kohlendioxid sogar erleichtern, denn sie würde helfen, das injizierte Kohlendioxid weiträumig im Basaltgestein zu verteilen.

Was den Geolog:innen bislang vor allem noch fehlt, sind umfassende Kenntnisse zu den chemischen Voraussetzungen in der Basaltkruste. Wie viele reaktionsfreudige Minerale enthält das Gestein? Wie warm und kohlenstoffreich ist das Porenwasser, welches im Gestein zirkuliert? Und wie schnell würde injiziertes Kohlendioxid im Gestein verteilt werden und anschließend mineralisieren?

*In der Forschungsmission CDRmare bohren Forschende im Sommer 2023 etwa 40 Meter tief in das Basaltgestein an der Ostflanke des Reykjanes-Rückens und installieren in den Bohrlöchern Temperatur-, Druck- und chemische Sensoren. 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). Auf diese Weise wollen sie herausfinden, mit welcher Methode sich die größte Menge Kohlendioxid dauerhaft einlagern lässt und wie schnell das injizierte Kohlendioxid jeweils mineralisiert.*

*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.*



Für Bohrungen in Sediment- und Krustengesteinen in der Tiefsee setzen Geowissenschaftler:innen ein sogenanntes Meeresboden-Bohrgerät ein, welches auf diesem Bild zu Wasser gelassen wird. Auf seinen zwei Rosetten lagert ausreichend Bohrgestänge, um damit bis zu 200 Meter tief in den Meeresboden vorzudringen und Proben zu nehmen oder Observatorien zu setzen.

Foto: MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften

## Wie soll das Kohlendioxid in die obere Ozeankruste injiziert werden?

Bei existierenden Großprojekten zur Kohlendioxid-Speicherung im geologischen Untergrund des Meeres werden bislang zwei Verfahren angewendet, um das abgeschiedene Kohlendioxid zur Injektionsstelle zu transportieren. Entweder leitet eine Pipeline das Gas zur Bohrstelle am Meeresboden oder aber Schiffe legen an einer eigens errichteten Plattform an der Meeresoberfläche an, von welcher aus das Kohlendioxid dann in die Tiefe geleitet wird. Letzteres ist zwangsläufig auf Flachwasserlokationen beschränkt.

*Für das Tiefsee-Forschungsexperiment im Rahmen der Forschungsmission CDRmare kommt keines dieser beiden Verfahren in Frage. Geplant ist stattdessen, das verflüssigte Kohlendioxid in Tanks zu füllen und diese als sogenannte Meeresbodenstation am Ozeanboden abzusetzen. In der Tiefe angekommen, verrichtet ein ferngesteuerter Tauchroboter (remotely operated vehicle, ROV) die weiteren Arbeiten. Er dockt die Meeresbodenstation am oberen Ende eines verrohr-*

*ten Bohrloches an. Anschließend wird das verflüssigte oder aber das mit Meerwasser gemischte Kohlendioxid in vorprogrammierten Zeitintervallen in das Bohrloch gepumpt. Von dort aus dringt das Kohlendioxid dann in die zerklüftete obere Erdkruste und wird durch das zirkulierende Porenwasser im Gestein verteilt.*

*In näherer Umgebung des Injektionsbohrloches werden die Forschenden weitere Bohrungen vornehmen. Diese werden ebenfalls verrohrt und mit eigens entwickelter tiefseetauglicher Messtechnik ausgestattet. Mithilfe dieser Bohrloch-Beobachtungssysteme können die Wissenschaftler:innen über die gesamte Länge der Bohrung alle physikalischen und geochemischen Parameter erfassen, die benötigt werden, um die Verteilung und Mineralisierung des im benachbarten Bohrloch injizierten Kohlendioxids zu verfolgen. Basierend auf den Beobachtungsdaten sollen außerdem grundlegende Zirkulationsprozesse im Untergrund entschlüsselt werden.*

## Wie verfolgen die Forschenden, was mit dem injizierten Kohlendioxid geschieht?

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

Hinzu kommt die 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 aber gibt es bisher nur wenige, vor allem kaum tiefseetaugliche Sensoren – die Grundlage für schnelle, vergleichsweise günstige Messungen.

*In der Forschungsmission CDRmare entwickeln Wissenschaftler:innen und Ingenieur:innen gemeinsam neue tiefseetaugliche Sensoren für die schnelle Echtzeitbestimmung der Temperatur, des pH-Werts sowie des Kohlendioxid- und Koh-*

*lenstoffgehaltes im Porenwasser der oberen Erdkruste, in den darüberliegenden Sedimentschichten 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.*

*Außerdem kommen erstmals verschiedene eigens entwickelte, tiefseetaugliche Fluid-Sampler zum Einsatz. Die in den Bohrlochern verwendeten Sampler beispielsweise nehmen Proben von den Flüssigkeiten in der Basaltkruste. Diese Proben werden später im Labor auf ihre chemischen Eigenschaften hin untersucht und mit dem Tiefseewasser verglichen. So können Veränderungen in der Zusammensetzung des Porenwassers und anderer Fluide in hoher zeitlicher Auflösung dokumentiert und mit der Kohlendioxid-Einleitung in Zusammenhang gebracht werden.*

*Das injizierte Kohlendioxid wird außerdem mit einem isotopischen Marker versehen. Auf diese Weise kann es jederzeit eindeutig identifiziert werden, sodass die Forschenden klar bestimmen können, wie schnell sich das Kohlendioxid im Gestein verteilt hat, in welcher Geschwindigkeit es durch Mineralisierung fest gebunden wurde und ob es gegebenenfalls aus dem Basaltgestein ausgetreten ist.*



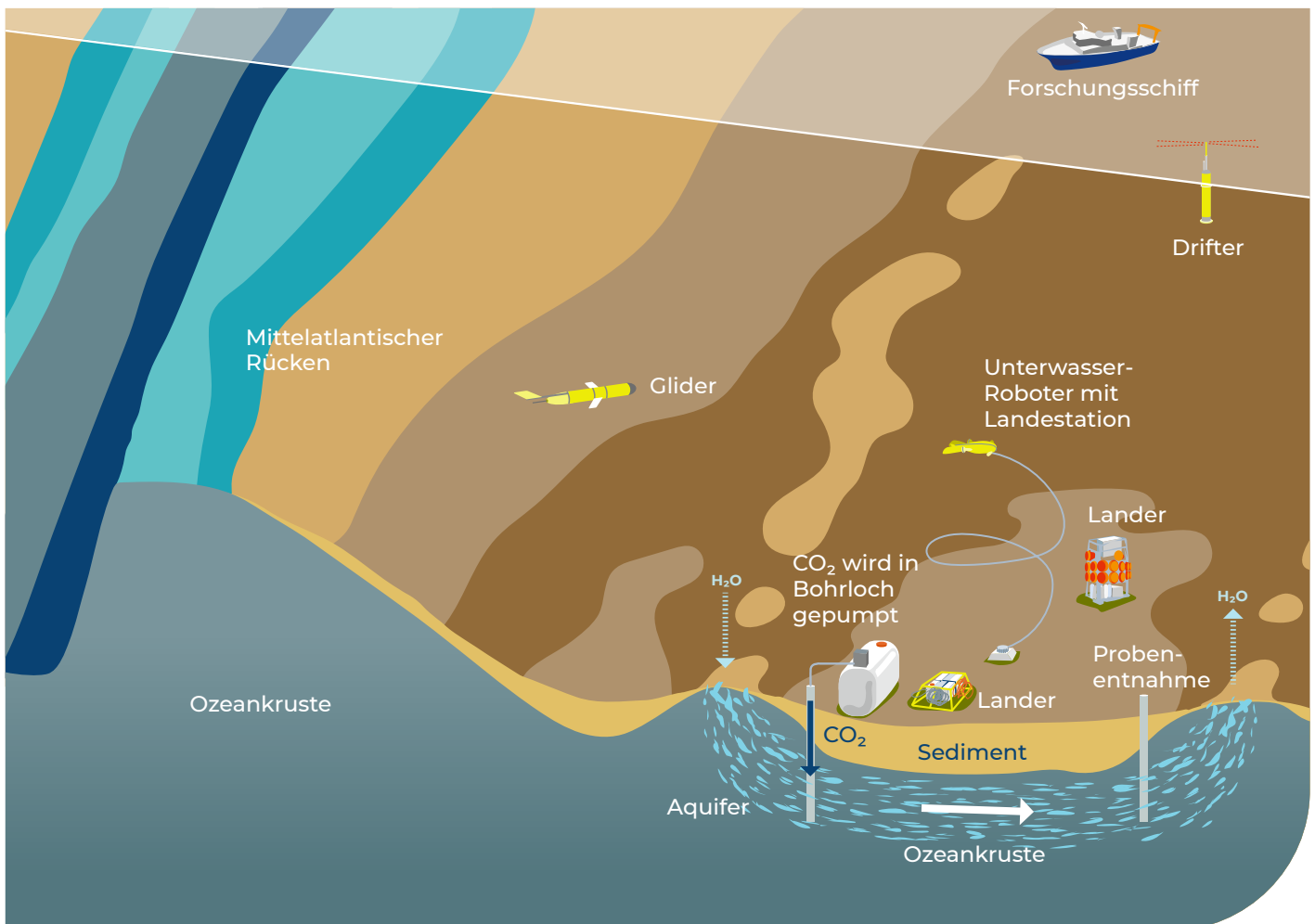
## Wie soll das Experiment überwacht werden?

Ungeachtet der Tatsache, dass die Bedingungen in der Tiefsee ein Entweichen des injizierten Kohlendioxids wahrscheinlich ausschließen, sollen die Bohrlöcher und ihre nähere Umgebung engmaschig überwacht werden. Entsprechende Technik zu entwickeln, stellt eine große Herausforderung dar. Die Geräte und ihre vielen Sensoren müssen nämlich nicht nur der kalten Umgebungstemperatur und dem hohen Druck in der Tiefsee standhalten. Da Schiffseinsätze teuer sind, müssen sie zudem eigenständig und so energiesparend operieren, dass sie über lange Zeiträume hinweg am Meeresboden verbleiben können – ganz ohne Signale oder Wartung vom Schiff aus.

*In der Forschungsmission CDRmare entwickeln Wissenschaftler:innen neue tiefseetaugliche Lander-Systeme, 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.*

*Für den CDRmare-Einsatz werden die Lander mit den neuen tiefseetauglichen Sensoren sowie mit einer Parkbucht für kleine, autonom agierende Unterwasserroboter ausgestattet. Diese selbstfliegenden Roboter tragen ebenfalls die eigens entwickelte Tiefsee-Sensorik und werden kabelgeführt um die Landestation kreisen. Da das Kabel dabei Stück für Stück aus- und wieder eingerollt wird, werden die Roboter in regelmäßigen Abständen spiralförmig um den Lander kreisen und mit ihren Messungen Radien von einigen Zehner Metern abdecken. Das heißt, die von ihnen überwachte Meeresbodenfläche beträgt mehrere hundert Quadratmeter und ist somit deutlich größer als jene Fläche, die ein Lander-System allein überwachen kann.*

*Sollten die neuen Messsysteme ihren Hätetetest in der Tiefsee erfolgreich bestehen, werden sich die Kosten einer Überwachung von Kohlendioxid-Speicherstätten erheblich reduzieren. Außerdem könnten die Systeme dann auch jederzeit in flacheren Meeresregionen eingesetzt werden – so zum Beispiel in der Nordsee, wo künftig abgeschiedenes Kohlendioxid im industriellen Maßstab in Sandsteinformationen eingelagert werden soll.*



Eine Skizze des geplanten Versuchsaufbaus: Messgeräte wie Drifter, Glider und Unterwasserroboter mit Landestation überwachen den Meeresboden und die Wassersäule auf Kohlendioxid-Leckagen.

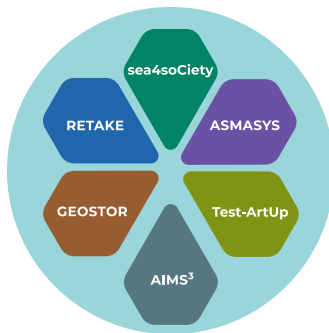
Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

## Reicht ein Tiefsee-Experiment aus, um ausreichend Handlungswissen zu den verschiedenen Optionen einer Kohlendioxid-Speicherung in der oberen Ozeankruste zu generieren?

Forschungsarbeiten in der Tiefsee sind technisch aufwendig und sehr teuer. Aus diesem Grund investieren Geolog:innen viel Zeit und Energie in die Entwicklung von Software und Computermodellen, mit denen sich die Struktur und Beschaffenheit der Erdkruste sowie alle Stoffkreisläufe zwischen Ozean, Sedimentschicht und Erdkruste simulieren lassen. Die Computermodelle mittelozeanischer Rücken sind mittlerweile so gut, dass die Messdaten weniger Projekte oder Forschungsexperimente ausreichen, um Szenarien für viele vergleichbare Einsätze in anderen Wassertiefen zu berechnen. Basierend auf diesen Ergebnissen können die Wissenschaftler:innen anschließend Kosten-Nutzen-Analysen durchführen und entsprechende Handlungsoptionen ableiten. Zu den laufenden Projekten gehören zum Beispiel Carbfix auf Island, das Forschungsvorhaben CO2Basalt auf dem Vöring-Plateau vor der Küste Norwegens sowie ein wissenschaftliches Projekt namens SolidCarbon im Cascadiabecken vor der Küste Kanadas.

*Wissenschaftler:innen der CDRmare-Forschungsmission kollaborieren eng mit den Organisatoren dieser internationalen Projekte und teilen die wissenschaftlichen Daten. Ihr Ziel lautet, alle verfügbaren Datensätze zur Struktur, Beschaffenheit und zu den geochemischen Prozessen in der oberen Ozeankruste am Mittelatlantischen Rücken zusammenzutragen. Anschließend berechnen sie mithilfe von Computermodellen für verschiedene Standorte, wie viel Kohlendioxid sich in den sogenannten Rückenflanken-Aquiferen einlagern ließe, welche Kosten dabei entstünden und mit welchen umwelttechnischen Problemen, Risiken und potentiellen Schäden zu rechnen wäre. Ihre Erkenntnisse und daraus abgeleitete Handlungsoptionen diskutieren sie im nächsten Schritt mit verschiedenen Interessengruppen aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft, um herauszufinden, wie die Menschen über eine Kohlendioxid-Einlagerung in der oberen Ozeankruste denken und ob ein solcher Ansatz unterstützungswürdig und nachhaltig wäre.*

*Alle natur- und gesellschaftswissenschaftlichen Forschungsergebnisse werden am Ende in einem umfassenden Bericht zur Kohlendioxid-Speicherung im Meeresuntergrund zusammengefasst*



Alle hier beschriebenen Forschungsarbeiten werden im CDRmare-Forschungsverbund »AIMS<sup>3</sup> – Alternative Szenarien, innovative Technologien und Monitoringansätze für die Speicherung von Kohlendioxid in ozeanischer Kruste« 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.



aims3.cdrmare.de



twitter.com/cdrmare



linkedin.com/  
company/cdrmare



CDRmare Wissenstransfer  
transfer@cdrmare.de



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

### IMPRESSUM

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel // Wischhofstr. 1–3 // 24148 Kiel  
// **Verantwortlich für den Inhalt:** Andreas Oschlies, Gregor Rehder, Achim Kopf, Ulf Riebesell, Klaus Wallmann, Martin Zimmer // **Redaktion:** Ulrike Bernitt (ubernitt@geomar.de) // **Texte:** Sina Löschke (schneehohl.net) // **Design und Grafiken:** Rita Erven // Juni 2023