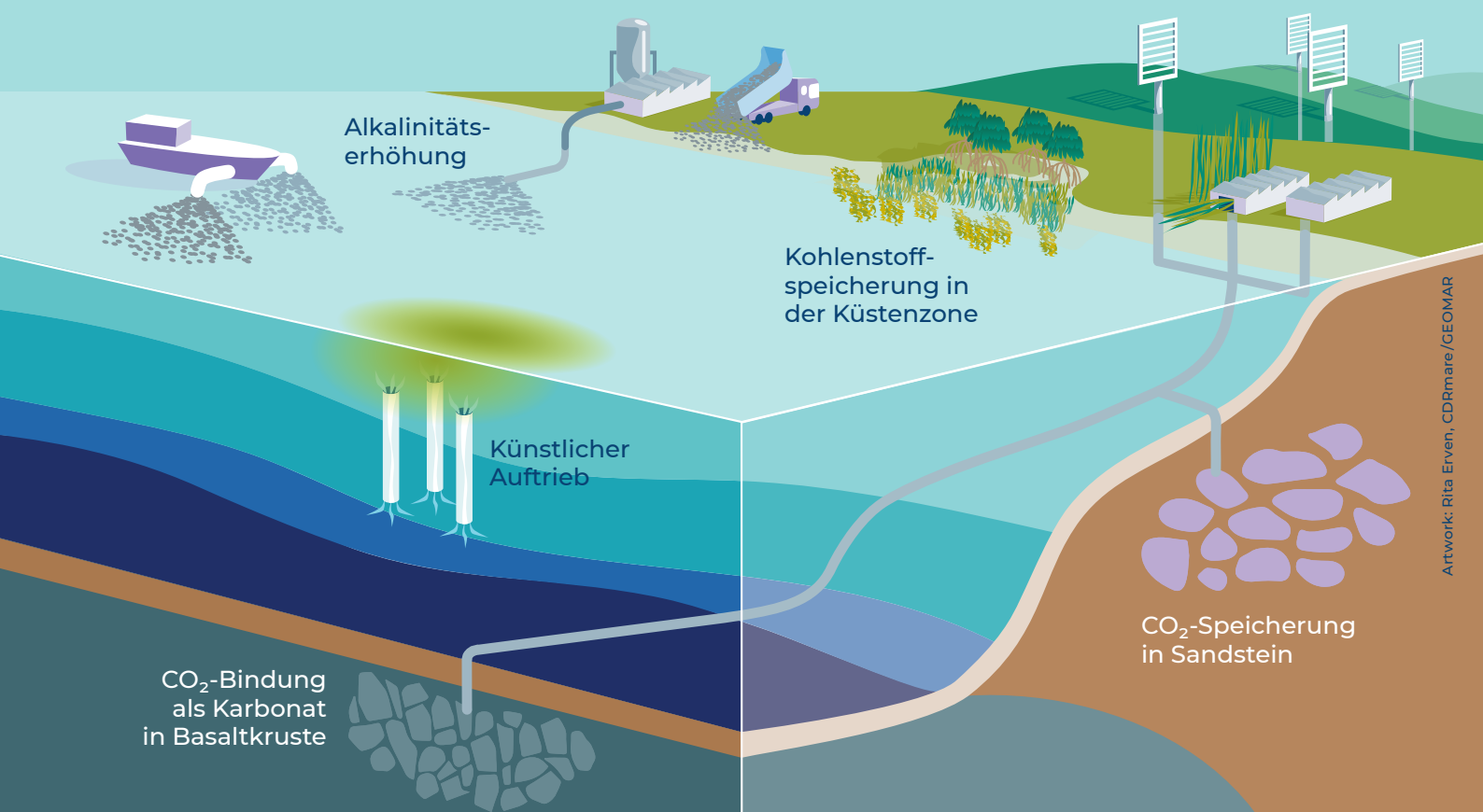


Kohlendioxid-Entnahme

Welche Möglichkeiten bieten uns meeresbasierte Verfahren? Und wie erforschen wir sie?



Artwork: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

WISSEN
KOMPAKT

Kohlendioxid-Entnahme

Welche Möglichkeiten bieten uns meeresbasierte Verfahren? Und wie erforschen wir sie?

WISSEN KOMPAKT

- > Hintergrund 1
Gesellschaftlicher Handlungsdruck
- > Biologische Methoden
Verstärkte Kohlenstoff-Speicherung durch die Ausweitung der Wiesen und Wälder des Meeres
- > Biologische Methoden
Künstlicher Auftrieb: Mehr Power für die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres
- > Chemische Methoden
Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans
- > Geologische Methoden
Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee
- > Geologische Methoden
Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste
- > Ergebnis-Synthese
Ein Bewertungsleitfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden

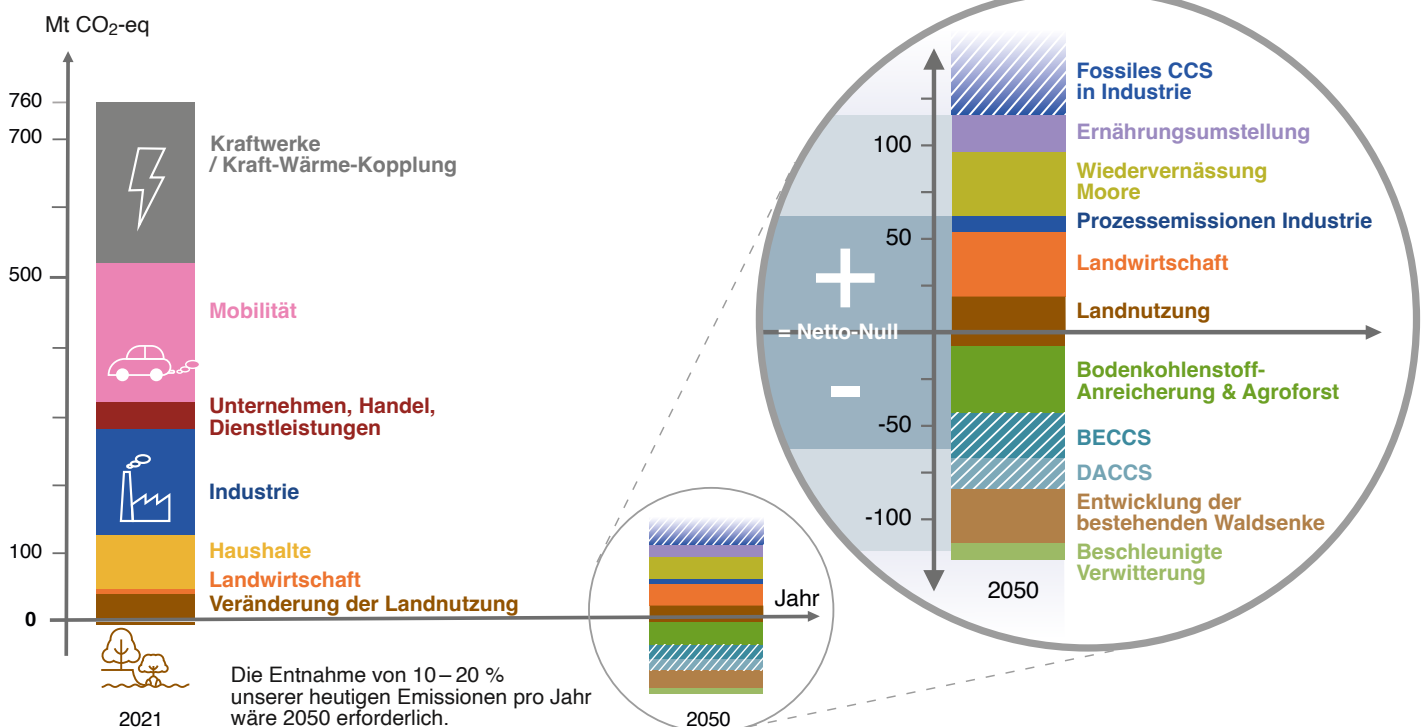
Hintergrund I: Gesellschaftlicher Handlungsdruck

Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre: Dringend benötigt

Selbst bei ambitionierter Klimapolitik wird Deutschland in drei Jahrzehnten voraussichtlich noch immer 10 bis 20 Prozent der aktuellen Treibhausgas-Emissionen freisetzen und die Erderwärmung weiter vorantreiben. Ein Ausweg ist der Ausgleich durch eine gezielte Kohlendioxid-Entnahme und -Speicherung.

Die Herausforderung: Eine Netto-Null für Kohlendioxid-Emissionen

- > In der naturwissenschaftlichen Klimaforschung herrscht **Konsens**: Die Menschheit wird die Erderwärmung und die daraus resultierenden Klimafolgen und Risiken nur dann eindämmen, wenn sie ihre **Kohlendioxid-Emissionen** in die Atmosphäre auf eine **rechnerische Null** reduziert (netto null).
- > 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.
- > Es gibt allerdings noch **keinen gesellschaftlichen Konsens** darüber, wie hoch mögliche Rest-Emissionen sein dürfen und welche Sektoren diese verursachen dürfen. Zurzeit sind Rest-Emissionen beispielsweise in der Zementherstellung, im Flug- und Schwerlasttransport aber auch in der Landwirtschaft und bei der Müllverbrennung schwer vermeidbar.



Gesucht: Strategien für den Ausgleich der Rest-Emissionen

- > Die Rest-Emissionen müssen ausgeglichen werden. Es gibt **verschiedene Lösungsansätze**, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen und so einen Ausgleich herzustellen. Zudem kann die Freisetzung einiger Rest-Emissionen verhindert werden, wenn das Kohlendioxid an der Emissionsquelle aufgefangen und im Anschluss geologisch gespeichert wird. Dies ist wichtig für jene Industriesektoren, die Emissionen fossilen Ursprungs aktuell nicht vermeiden können. Als Kohlendioxid-Entnahme aber dürfen die Unternehmen die Abscheidung von Kohlendioxid aus fossilen Quellen nicht bezeichnen. Hier muss klar zwischen verhinderten Emissionen und tatsächlich aus der Atmosphäre entnommenen Kohlendioxid-Mengen unterschieden werden.
- > Viele Verfahren der Kohlendioxid-Entnahme und -Speicherung sind landbasiert. Da Land bereits jetzt eine knappe Ressource ist, werden **ozeanbasierte Ansätze und Verfahren** verstärkt erforscht.

Ozean: Wie groß ist sein Kohlendioxid-Aufnahmepotenzial?

- > Das Klimasystem der Erde nutzt **physikalische, chemische und biologische Prozesse**, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen und an Land, im Meer oder im geologischen Untergrund einzulagern. Der Weltozean bedient sich dieser Prozesse in einem so umfassenden Maße, dass er in der Erdgeschichte schon sehr große Veränderungen der atmosphärischen Kohlendioxid-Konzentration abgefedert hat. Aufgrund seiner natürlichen CO₂-Aufnahmefähigkeit ist der **Ozean Hauptakteur im globalen Kohlenstoffkreislauf**. Allerdings finden die CO₂-Aufnahmeprozesse im Ozean und Ozeanboden **auf langen Zeitskalen** statt. Durch verschiedene Verfahren könnten diese beschleunigt und damit die Kohlendioxid-Aufnahmerate des Ozeans erhöht werden.

CDRmare: Forschung liefert Antworten

- > In der interdisziplinären **Forschungsmission CDRmare** untersuchen Forschende ein **breites Spektrum mariner Ansätze zur Kohlendioxid-Entnahme und -Speicherung** und erforschen aktuell vielversprechend erscheinende Methoden und Maßnahmen. Dabei betrachten die Wissenschaftler:innen den **Ozean als globales, zusammenhängendes System**: Veränderungen in einem Bereich führen zu Wechselwirkungen mit anderen verknüpften Teilbereichen und Nutzungsformen (z. B. Fischerei und Tourismus).
- > Nur auf Basis eines ganzheitlichen Forschungsansatzes können die **Potenziale, Kosten und Risiken** einer vom Menschen verstärkten Kohlendioxid-Aufnahme durch den Ozean realistisch abgeschätzt und bewertet werden. Wichtig ist zu verstehen, welche Methoden überhaupt anwendbar sind, unter welchen lokalen und globalen Voraussetzungen diese funktionieren und welche Ansätze letztlich ausscheiden. Der Wissenschaft kommt dabei die Aufgabe zu, **öffentlich und transparent** aufzuklären. Welche Lösungsansätze künftig genutzt werden, muss in einer offenen Debatte politisch und gesamtgesellschaftlich ausgehandelt werden.

Die sechs CDRmare Forschungsverbände

- > Die Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) CDRmare setzt sich aus **sechs Verbänden** zusammen, in denen verschiedene Methoden der marinen Kohlendioxid-Entnahme und -Speicherung untersucht und anschließend gemeinsam mit externen Experten bewertet werden. Wichtig zu wissen: Alle Methoden haben ein **unterschiedliches Kohlendioxid-Entnahmepotenzial** und sind im Hinblick auf ihren **technischen Entwicklungsstand** im unterschiedlichen Maße anwendungsbereit.
- > Die sechs Verbände sind:
 - > Kohlendioxidentnahme durch Alkalinitätserhöhung: Potenzial, Nutzen und Risiken (**RETAKE**)
 - > Innovative Ansätze zur Verbesserung des Kohlenstoffspeicherungspotenzials von Vegetationsküsten-ökosystemen (**sea4soCieTy**)
 - > Submarine Kohlendioxid-speicherung in geologischen Formationen der deutschen Nordsee (**GEOSTOR**)
 - > Künstlicher Auftrieb im Feldtest (**Test-ArtUp**)
 - > Alternative Szenarien, innovative Technologien und Monitoringansätze für die Speicherung von Kohlendioxid in ozeanischer Kruste (**AIMS3**)
 - > Bewertungsrahmen für marine Kohlendioxidentnahme und Synthese des aktuellen Wissensstandes (**ASMASYS**)

Alle im Rahmen der Mission durchgeführten Forschungsarbeiten im Meer unterliegen deutschen und internationalen Umweltschutzauflagen.



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: Rita Erven // Juni 2023

Biologische Methoden

Verstärkte Kohlenstoff-Speicherung durch die Ausweitung der Wiesen und Wälder des Meeres

Vegetationsreiche Küstenökosysteme wie Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder wachsen auf weniger als einem Prozent der Ozean- und Küstenfläche, sind aber für einen signifikanten Teil der natürlichen Kohlenstoffeinlagerung im Meeresboden und für viele andere Ökosystemleistungen verantwortlich. Pläne, diese wertvollen Küstenlebensräume auszubauen, um ihre natürliche Kohlendioxid-Aufnahme zu verstärken, klingen vielversprechend. Doch wie realistisch sind sie wirklich und auf welche Weise lassen sich Küstenökosysteme zielführend erweitern? Die Forschungsmission CDRmare liefert Antworten und Lösungsideen.

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

- > In der Klimaforschung herrscht Konsens: Selbst mit ambitionierter Klimapolitik wird Deutschland zur Mitte des 21. Jahrhunderts voraussichtlich noch immer **10 bis 20 Prozent** der aktuellen Treibhausgas-Emissionen freisetzen und die Erderwärmung weiter vorantreiben.
- > Um diese Rest-Emissionen auszugleichen, wird die Menschheit Kohlendioxid im selben Umfang aus der Atmosphäre entnehmen müssen.

Mit den Werkzeugen der Natur: Vegetationsreiche Küstenökosysteme als Kohlenstoffspeicher

- > Gelingen könnte eine solche **verstärkte Kohlendioxid-Entnahme** auch mit Hilfe des Meeres, etwa durch die **Wiederherstellung und großräumige Ausweitung vegetationsreicher Küsten-ökosysteme** im Gezeiten- und Flachwasserbereich (bis 40 Meter Wassertiefe). Zu ihnen zählen Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangrovenwälder und Tang- oder Kelpwälder.
- > Ihre Verbreitungsgebiete machen zusammengenommen weniger als ein Prozent der weltweiten Meeresfläche aus, die Gezeitenzone eingeschlossen. Gemeinsam sind die **Wiesen und Wälder des Meeres** jedoch für einen signifikanten Teil des im Meeresboden eingelagerten Kohlenstoffs verantwortlich und somit **Schlüsselakteure im Kohlenstoffkreislauf der Erde**.
- > Salzmarschen, Mangroven und Seegraswiesen nehmen Kohlendioxid aus der Luft und dem Meerwasser auf, binden den enthaltenen Kohlenstoff und lagern ihn im Untergrund ein. So entstehen im Laufe der Zeit große **Kohlenstofflagerstätten unter den Pflanzenteppichen**, die so lange erhalten bleiben, wie die sie schützende Vegetation gedeiht – im Idealfall mehrere Jahrtausende.

Küstenökosysteme als Kohlenstoffspeicher

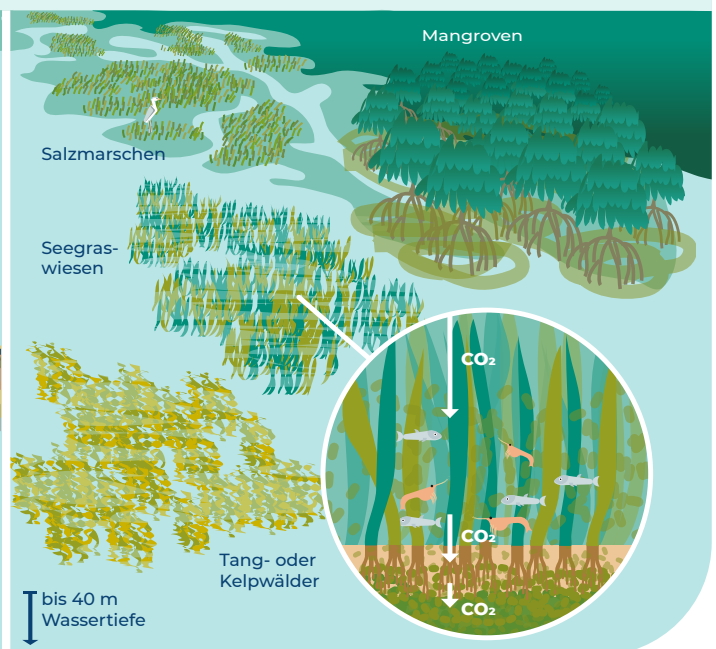
Kosten: **ca. 1 bis 1000 US-Dollar pro Tonne CO₂**

Durch die Wiederherstellung und großräumige Ausweitung vegetationsreicher Küstenökosysteme im Gezeiten- und Flachwasserbereich könnte es gelingen, die Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres zu verstärken. Zu ihnen gehören Salzmarschen, Seegraswiesen, Tang- und Mangrovenwälder.

Skalierbarkeit: Ein **flächendeckender Ausbau vegetationsreicher Küstenökosysteme ist theoretisch möglich.**

Dauer der Speicherung: **von mehreren Jahrzehnten bis zu Jahrtausenden**

Technischer Entwicklungsstand: Rund um den Globus werden Küstenökosysteme wiederhergestellt, allerdings häufig nur auf ihren ursprünglichen Flächen. Eine **massive Erweiterung** ihrer Ausdehnung ist theoretisch möglich, wurde aber **bislang nirgendwo praktisch versucht.**



Das Sterben der Küstenökosysteme

> Vegetationsreiche Küstenökosysteme aber leisten noch viel mehr: Sie produzieren Sauerstoff, reinigen das Wasser, schützen die Küsten vor Erosion, stärken die Biodiversität und Artenvielfalt und sichern Abermillionen Menschen auf der Welt Nahrung und Einkommen.

> Die bittere Realität ist: **Weltweit schrumpft die Fläche vegetationsreicher Küstenökosysteme** infolge von Klimawandel, Küstenentwicklung, Meeresverschmutzung, Überfischung und anderweitiger intensiver Nutzung. In den zurückliegenden 100 Jahren sind bis zu 50 Prozent aller Salzmarschen, etwa ein Drittel aller Seegraswiesen sowie etwa 35 bis 50 Prozent der Mangrovenwälder verloren gegangen. Von den weltweiten Tangwäldern verzeichnen 40 bis 60 Prozent klare Flächenverluste.

> Wo die Pflanzengemeinschaften sterben, zerfallen auch ihre unterirdischen Kohlenstofflagerstätten.

> Die gute Nachricht: **Küstenökosysteme können wiederhergestellt werden**. Erfolgreiche Restaurationsprojekte gibt es in vielen Teilen der Welt.

Strategien zur Steigerung der Kohlendioxid-Entnahme durch Meereswiesen und -wälder

> Um Rest-Emissionen wirksam kompensieren zu können, müssten die hochproduktiven Küstenlebensräume nicht nur geschützt und wiederhergestellt, sondern **über ihre kürzlich verlorenen Flächen hinaus** erweitert werden.

> Voraussetzung: Der Mensch müsste Salzmarschen, Seegraswiesen, Tang- und Mangrovenwälder auch in Gebieten neu anlegen, in denen sie bislang auf natürliche Weise nicht vorgekommen sind und neu zu pflanzende Arten so zusammenstellen, dass sie als Ökosystem eine optimale Kohlenstoff-Aufnahme und -Speicherung erzielen und gleichzeitig die Biodiversität stärken.

> Expert:innen bezeichnen diesen Ansatz als Ökosystem-Design. Mit ihm, so die Annahme, ließen sich: (1) die Kohlendioxid-Entnahme und Kohlenstoff-Speicherung der Küstenökosysteme steigern; (2) die Artenvielfalt der Küsten fördern und (3) die Anpassung von Menschen und Natur an den Klimawandel erleichtern – letzteres vor allem wegen der **vielen Ökosystemleistungen** mariner Küstenökosysteme (Nahrung, Küstenschutz, Lebensunterhalt, etc.).

Viele Fragen, vor allem zu den Auswirkungen des Klimawandels

> Der **Klimawandel** stellt eine **akute Bedrohung** für vegetationsreiche Küstenökosysteme dar. Es stellt sich daher u.a. die Frage, in welchen Regionen der Welt sie künftig überhaupt noch überleben und in der Lage sein werden, durch ihre Kohlendioxid-Aufnahme zur Minderung des Klimawandels beizutragen, und wo Investitionen in ihren Schutz und großflächigen Ausbau zukunftssträftig wären.

> Zudem fehlt noch viel **Detailwissen** zur **Ökologie** der Meereswiesen und -wälder, zu ihren **Kohlenstoffflüssen**, zu grundlegenden **Speicher- und Abbauprozessen** im Küstensediment sowie zur Frage, wie sich ihre Kohlendioxid-Entnahme und Kohlenstoff-Speicherung quantifizieren und langfristig überwachen ließe.

> Fraglich ist auch, ob die Küstenbevölkerung den massiven Ausbau der Ökosysteme unterstützen würde. Potenzielle Streitpunkt wären die Aufgabe intensiv genutzter Land- und Meeresflächen, um diese renaturieren zu können sowie die Ausweitung vegetationsreicher Küstenökosysteme zu Lasten von Sandstränden, Wattflächen und anderer lokaler Ökosysteme.

CDRmare liefert Antworten und Handlungsoptionen

> In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen die **grundlegenden Mechanismen der Kohlenstoffspeicherung** in vegetationsreichen Küstenökosystemen, deren Anfälligkeit für die Folgen des Klimawandels sowie die Bereitschaft der Küstenbevölkerung, einen massiven Ausbau der Meereswiesen und -wälder zu unterstützen.

> Basierend auf dieser Forschung entwickeln die Expert:innen dann **innovative Verfahren und politische Handlungsoptionen** zur Flächenausdehnung der vegetationsreichen Küstenökosysteme, mit denen sich die Kohlendioxid-Aufnahme der Meereswiesen und -wälder auf **umweltverträgliche und gesellschaftlich akzeptierte Weise** steigern ließe – an deutschen Küsten ebenso wie weltweit.

Alle dazugehörigen Forschungsarbeiten werden im CDRmare-Forschungsverbund »sea4soCiety – Innovative Ansätze zur Verbesserung des Kohlenstoffspeicherpotenzials von Vegetationsküstenökosystemen« durchgeführt.



sea4society.
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 Löscke (schneehohl.net) //
Design und Grafik: Rita Erven // Juni 2023

Biologische Methoden

Künstlicher Auftrieb: Mehr Power für die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres

Algen, Zooplankton und Fische gehören zu den Schlüsselakteuren der biologischen Kohlenstoffpumpe, mithilfe derer der Ozean der Atmosphäre auf natürliche Weise Kohlendioxid entnimmt und den enthaltenen Kohlenstoff in großen Wassertiefen einlagert. Damit dieser Mechanismus jedoch optimal funktioniert, braucht es Nährstoffe, die vielerorts fehlen, zumindest im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser. Durch das Heraufpumpen nährstoffreichen Tiefenwassers könnte der Mensch diesen Nährstoffmangel beheben. Ob ein solcher künstlicher Auftrieb aber tatsächlich klimawirksam wäre, welche Risiken er mit sich brächte und ob er technisch und rechtlich im großen Stil umgesetzt werden könnte, ist bislang ungewiss. Die Forschungsmission CDRmare liefert Antworten.

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

- > In der Klimaforschung herrscht Konsens: Selbst mit ambitionierter Klimapolitik wird Deutschland zur Mitte des 21. Jahrhunderts voraussichtlich noch immer **10 bis 20 Prozent** der aktuellen Kohlendioxid-Emissionen freisetzen und die Erderwärmung weiter vorantreiben.
- > Um diese Rest-Emissionen auszugleichen, wird die Menschheit Kohlendioxid **im selben Umfang aus der Atmosphäre entnehmen** müssen.

Mehr Algenwachstum, größerer Biomasse-Transport in die Tiefe

- > Gelingen könnte eine solche **verstärkte Kohlendioxid-Entnahme** auch mit Hilfe des Meeres, etwa **durch eine Steigerung der biologischen Kohlenstoffpumpe** in bislang wenig produktiven Meeresregionen. Darunter versteht man ein verstärktes Algenwachstum im Oberflächenwasser. Dessen kohlenstoffreiche Biomasse würde nach dem Tod der Algen entweder direkt in größere Wassertiefe sinken oder aber durch das Nahrungsnetz des Meeres wandern und so über Umwege in die Tiefe verfrachtet – allerdings nicht vollständig, sondern nur zu einem gewissen Anteil.

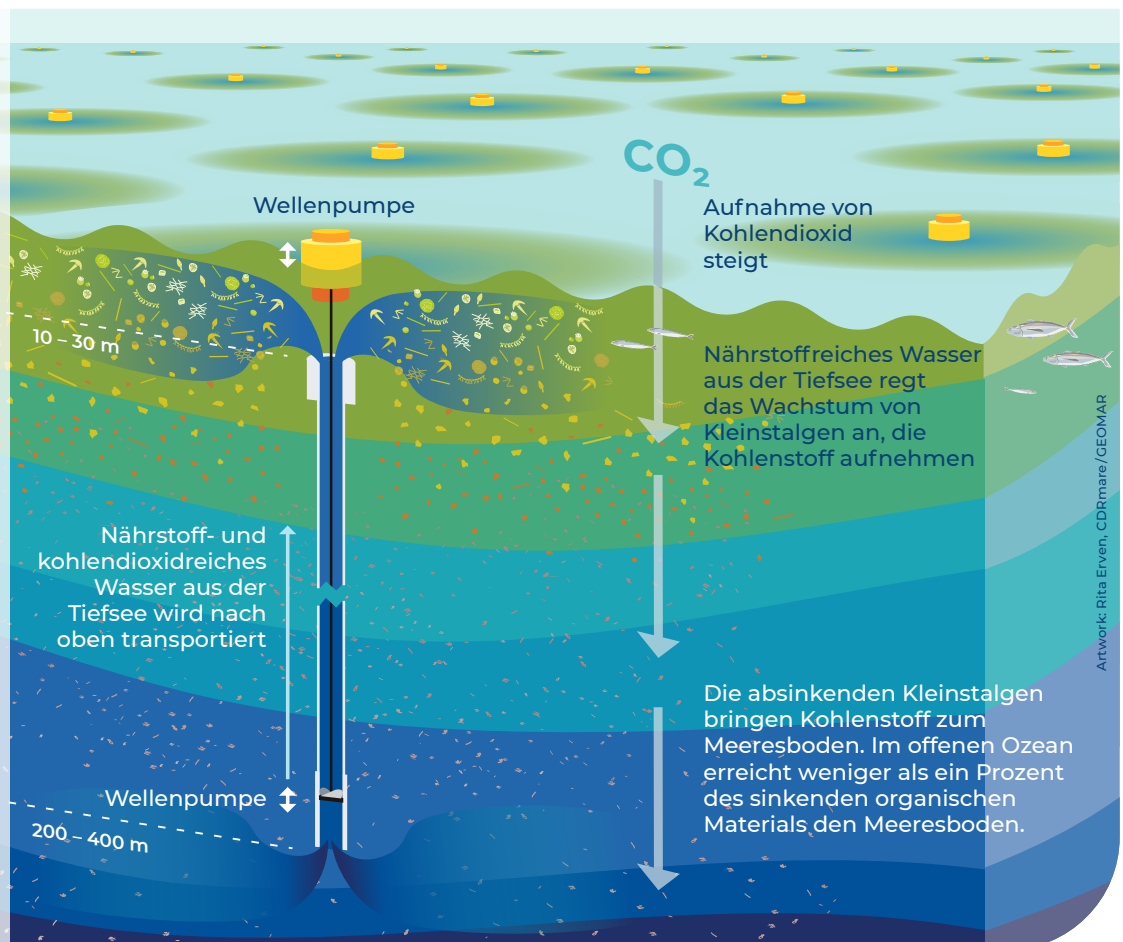
Künstlicher Auftrieb

Kosten: Bislang nicht bezifferbar. Erste Kalkulationen finden im Zuge von CDRmare statt.

Skalierbarkeit: **Eine Kohlendioxid-Einlagerung im größeren Maßstab ist theoretisch möglich;** Auftriebspumpen könnten sowohl **in den Randmeeren als auch auf dem offenen Ozean** eingesetzt werden.

Dauer der Kohlenstoff-Speicherung: **für Jahrzehnte bis Jahrhunderte.**

Technischer Entwicklungsstand: **in den Anfängen.**



- > In großer Wassertiefe wären der in der Biomasse **enthaltene Kohlenstoff und mögliche Abbauprodukte für Jahrzehnte, bestenfalls für Jahrhunderte eingeschlossen** und könnten vorerst nicht mehr in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre entweichen.

Künstlicher Auftrieb: Dünger aus der Tiefe

- > **Nährstoffe sind der limitierende Faktor** der biologischen Kohlenstoffpumpe. Wo sie im Oberflächenwasser fehlen, stockt die Biomasseproduktion und somit die Kohlendioxid-Aufnahme durch Algen. Durch das **Heraufpumpen nährstoffreichen Tiefenwassers** ließen sich wenig produktive Meeresregionen mit ausreichend Nährstoffen versorgen.
- > Dieser Ansatz wird als **künstlicher Auftrieb** bezeichnet, weil er die Funktionsweise der großen natürlichen Auftriebsgebiete vor den Westküsten Perus, Namibias, Kaliforniens und Mauretaniens kopiert. Diese Gebiete gehören zu den produktivsten und fischreichsten Meeresregionen der Welt. Um dieselbe Auftriebswirkung zu erzielen, müssten **jedoch zehntausende Auftriebspumpen** in nährstoffarmen Meeresgebieten betrieben werden.

Probe aufs Exempel: Testlauf einer optimierten Auftriebspumpe im offenen Meer

- > Wenn kaltes, kohlendioxidreiches Tiefenwasser zur Meeresoberfläche aufsteigt, erwärmt es sich, was dazu führen kann, dass **Kohlendioxid aus dem Meer in die Atmosphäre entweicht**. Eine solche Ausgasung würde die Klimawirksamkeit von Verfahren zum künstlichen Auftrieb reduzieren. Die Ergebnisse der CDRmare Forschungsmission aber deuten darauf hin, dass entsprechende Methoden unter bestimmten Umständen ein **höheres Kohlendioxid-Entnahme-Potenzial** besitzen als bislang angenommen wurde. In welchem Maße dieses Potenzial jedoch ausgeschöpft werden kann, ist bislang noch ungewiss.
- > In der Forschungsmission CDRmare führen Wissenschaftler:innen nun erstmals **umfassende, transdisziplinäre Studien zur technischen, ökologischen, biogeochemischen, ökonomischen und rechtlichen Machbarkeit von künstlichem Auftrieb** durch. Hierzu gehört auch der Testlauf einer **neuentwickelten seetüchtigen Wellenpumpe** vor der Küste Gran Canarias.

Umfangreiche Begleitforschung

- > Begleitet werden die Entwicklung und der Testlauf der Auftriebspumpe durch umfangreiche **Simulationen optimierter Strömungsmodelle**, die dazu dienen, die grundlegenden biogeochemischen Prozesse eines Auftriebs nährstoffreichen Tiefenwassers zu verstehen. Gleichzeitig führen Biolog:innen vielseitige Experimente durch, in denen die **Reaktionen von Algen und Zooplankton auf die Nährstoffzufuhr** überprüft und ihre optimalen Wachstums- und Anpassungsbedingungen erforscht werden.
- > Wirtschaftsexpert:innen entwickeln derweil ein integriertes Bewertungsmodell, mit dessen Hilfe sich der **wirtschaftliche und klimapolitische Nutzen künstlichen Auftriebs** berechnen lässt.
- > Rechtswissenschaftler:innen untersuchen die existierenden rechtlichen Rahmenbedingungen eines solchen Einsatzes und wollen herausfinden, welche Änderungen der rechtlichen Übereinkommen und Prinzipien vorgenommen werden müssten, um ein **angemessenes Regelwerk für die Steuerung des künstlichen Auftriebs** zu schaffen.

CDRmare liefert Antworten

- > Basierend auf den vielen Analysen werden die Forschenden **Handlungsoptionen für die Entscheidungsfindung in Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft** zusammentragen. Dieses Wissen soll alle Beteiligten in die Lage versetzen, **faktenbasiert** über Vorteile und Risiken eines möglichen Einsatzes von künstlichem Auftrieb zur Steigerung der Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres zu diskutieren.

Alle dazugehörigen Forschungsarbeiten werden im CDRmare-Forschungsverbund »Test-ArtUp – Künstlicher Ozeanauftrieb im Feldtest« durchgeführt.



test-artup.
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 Grafik: Rita Erven // Juni 2023

Chemische Methoden

Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans

Wie viel Kohlendioxid der Ozean aufnehmen kann, ohne dabei stark zu versauern, hängt von der Alkalinität seines Oberflächenwassers ab. Hinter diesem Begriff verbirgt sich die Menge säurebindender Bestandteile mineralischer Herkunft, die zuvor aus verwittertem Gestein gelöst und in das Meer eingetragen wurden. Die Frage lautet nun: Könnte ein gezielter Eintrag solcher Minerale helfen, die Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans zu steigern, ohne die Chemie und das Leben im Meer aus dem Gleichgewicht zu bringen? In einfachen Modellrechnungen funktioniert dieser Ansatz. Feldversuche aber fehlen bislang ebenso wie realitätsnahe Simulationen und detailliertes Wissen über Folgen und Risiken einer Alkalinitäts-erhöhung. Die Forschungsmission CDRmare untersucht die Potenziale, Machbarkeit und Nebenwirkungen der verschiedenen Verfahren.

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

- > Selbst bei ambitionierter Klimapolitik wird Deutschland in drei Jahrzehnten voraussichtlich noch immer **10 bis 20 Prozent** seiner aktuellen Treibhausgas-Emissionen freisetzen und den Klimawandel weiter vorantreiben. Ein möglicher Ausweg: **Die Rest-Emissionen ausgleichen** – etwa durch eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme und -Speicherung des Ozeans.
- > Zwischen der Meeresoberfläche und der Atmosphäre findet ein ständiger Kohlendioxid-Austausch statt, wodurch etwaige Druckunterschiede zwischen dem im Meerwasser gelösten Kohlendioxid und dem Kohlendioxid der Atmosphäre ausgeglichen werden. Steigt die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre, nimmt auch der Ozean mehr Kohlendioxid auf.
- > In den zurückliegenden Jahrzehnten hat der **Wellozean** etwa 25 Prozent der vom Menschen verursachten Kohlendioxid-Emissionen aus der Atmosphäre aufgenommen und so die **Erderwärmung maßgeblich gebremst**.

Die Gesetze der Meereschemie

- > Löst sich Kohlendioxid im Meerwasser, durchläuft ein Teil des Gases eine **Abfolge chemischer Reaktionen**. Dabei wird es chemisch als Hydrogenkarbonat gebunden, sodass der Ozean neues Kohlendioxid aufnehmen kann. Bei dieser Reaktionskette werden aber auch Protonen freigesetzt, **die den Ozean versauern lassen**. In welchem Umfang dies geschieht, entscheidet die Menge

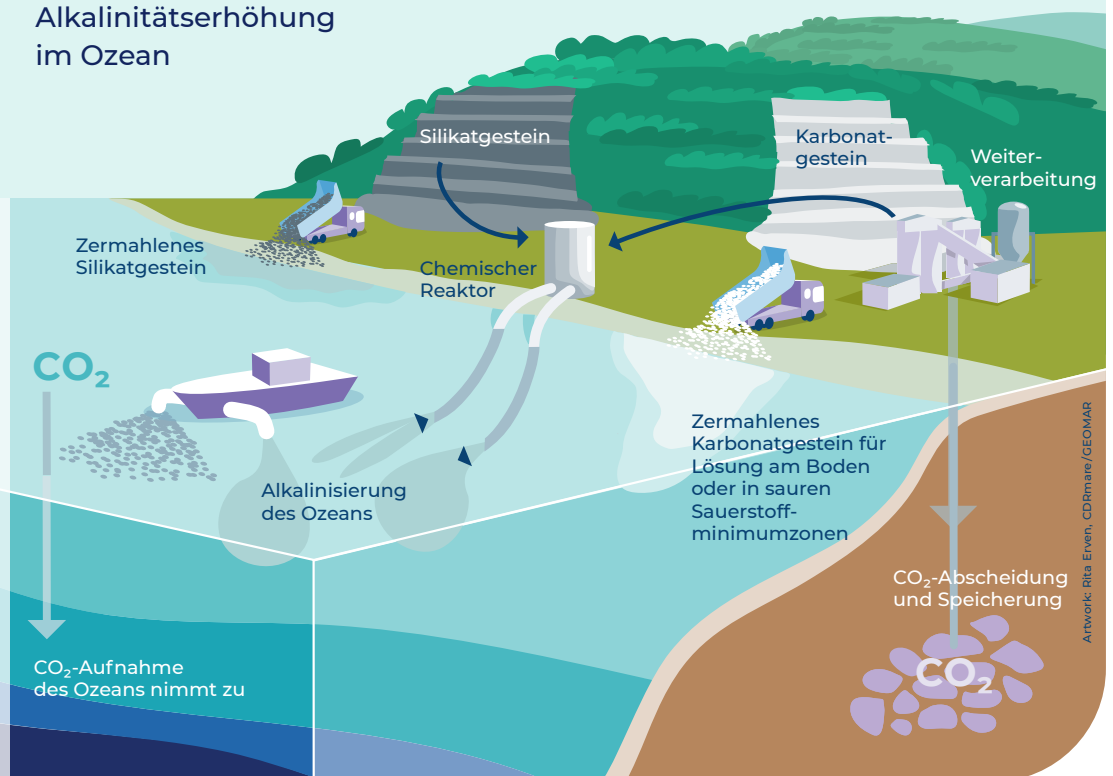
Kosten: Schätzungen reichen von **40 – 260 US-Dollar pro Tonne Kohlendioxid**

Skalierbarkeit: Eine **CO₂-Entnahme im industriellen Maßstab ist theoretisch möglich**.

Dauer der Speicherung: **viele hundert bis hunderttausend Jahre**

Technischer Entwicklungsstand: Für den Ozean wurde die Methode bisher **nur in Computermodellen simuliert und in einzelnen Laborexperimenten getestet**. Umfangreiche **Labor- und Feldtests** sowie **Wissen zu Risiken und Nebenwirkungen für Mensch und Umwelt** fehlen.

Alkalinitäts-erhöhung im Ozean



der im Wasser gelösten säurebindenden Mineralstoffe, die zuvor aus verwittertem Gestein gelöst und ins Meer geschwemmt wurden. Expert:innen sprechen vom Alkalinitätsgrad als Maß für das **Säurebindungsvermögen** des Meerwassers.

- > Die Gesteinsverwitterung an Land und die anschließende Speicherung der säurebindenden Lösungsprodukte im Meer sind vergleichsweise langsam ablaufende natürliche Prozesse. Dennoch entfernen sie jährlich etwa **1 Milliarde Tonnen Kohlendioxid** aus der Atmosphäre. Diese Menge entspricht im langzeitlichen Mittel etwa jener Menge Kohlendioxid, die durch vulkanische Aktivität sowie durch Mineralisierungsprozesse im Erdmantel und im Ozean in die Atmosphäre gelangt.
- > Um die menschengemachten Rest-Emissionen ab dem Jahr 2050 vollständig zu kompensieren, müsste **die natürliche Kohlenstoffaufnahme des Ozeans verfünffacht werden**.

Die Idee: Eine Beschleunigung der natürlichen Verwitterung

- > Modellstudien zufolge wäre eine Steigerung der ozeanischen Kohlenstoffaufnahme durchaus möglich, wenn die Menschheit die natürliche Verwitterung mineralhaltiger Gesteine beschleunigen und den Alkalinitätsgrad des Meerwassers gezielt erhöhen würde.
- > Ein solcher Eingriff in die Meereschemie hätte den Vorteil, dass **der Ozean mehr Kohlendioxid aufnehmen könnte, ohne dabei zu versauern**. Zugleich würde eine Alkalinitätserhöhung in stark versauerten Meeresregionen dazu führen, dass freie Protonen gebunden werden und ihre versauernde Wirkung abnimmt. Dies wiederum würde den **Schutz und die Wiederherstellung** von Korallenriffen, Muschelbänken und anderen wichtigen marinen Lebensräumen erleichtern.

Alkalinitätserhöhung: Ein Verfahren in den Kinderschuhen

- > Derzeit werden **verschiedene Verfahren** entwickelt, mit denen die natürliche Verwitterung mineralhaltigen Gesteins beschleunigt und die Alkalinität des Meerwassers erhöht werden könnte.
- > Das meiste Wissen über die chemischen und biologischen Folgen einer Alkalinitätserhöhung stammt bisher jedoch aus Modellstudien (Computersimulationen). **Aussagekräftige Labor- oder Feldstudien** zu lokalen, regionalen und globalen Auswirkungen eines Mineraleintrages im industriellen Maßstab auf die Umwelt und den Menschen **fehlen bislang weitestgehend**.
- > Es ist auch nicht geklärt, in welchen Meeresregionen entsprechende Verfahren eingesetzt werden müssten, um einen größtmöglichen Nutzen zu erzielen und ob Methoden zur Alkalinitätserhöhung am Ende effektiver und zielführender sind als andere meeres- oder landgestützte Verfahren zur verstärkten Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre.

CDRmare liefert Antworten

- > In der interdisziplinären Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen erstmals umfassend das **Kohlendioxid-Entnahmepotenzial, die Machbarkeit und mögliche ökologische und soziale Nebenwirkungen** der verschiedenen Verfahren zur Alkalinitätserhöhung des Ozeans.
- > Sie kombinieren dabei lokale Labor- und Mesokosmen-Experimente mit Modellstudien für ausgewählte Regionen sowie für den Weltozean. Sie überprüfen die rechtlichen Rahmenbedingungen, berücksichtigen soziale Aspekte und die Vereinbarkeit eines Einsatzes mit den UN-Nachhaltigkeitszielen und analysieren, ob der möglicherweise erzielte Nutzen, den Aufwand, die Kosten und eventuell entstehende Umweltbelastungen rechtfertigen könnte.
- > Außerdem gehen sie der Frage nach, wie dauerhaft eine durch Alkalinitätserhöhung erzielte Kohlendioxid-Entnahme des Ozeans wäre und wie sich diese messen, überwachen und bestimmten Maßnahmen zuschreiben ließe.
- > Ihr Ziel lautet, Politik und Gesellschaft **wissenschaftlich fundierte Information** darüber bereitzustellen, ob und in welcher Form marine Alkalinitätserhöhung ein praktikables Verfahren sein kann, um signifikante Mengen Kohlendioxid auf umweltverträgliche und gesellschaftlich verantwortbare Weise dauerhaft aus der Atmosphäre zu entnehmen.

Alle hier beschriebenen Forschungsarbeiten werden im CDRmare-Forschungsverbund »RETAKE – CO₂-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung: Potenzial, Nutzen und Risiken« durchgeführt.



retake.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 Oeschlies, Gregor Rehder, Achim Kopf, Ulf Riebesell, Klaus Wallmann,
Martin Zimmer // **Redaktion:** Ulrike Bernitt (ubernitt@geomar.de) // **Texte:** Sina Löschke (schneehohl.net) //
Design und Grafik: Rita Erven // Juni 2023

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. Unter der deutschen Nordsee existieren ebenfalls 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, die Kohlendioxid-Speicherung im geologischen Untergrund der deutschen Nordsee unter Einhaltung des Vorsorgeprinzips zu ermöglichen.

Ein Speicher für abgeschiedene Kohlendioxid-Emissionen

- > In der Klimaforschung herrscht Konsens: Selbst mit ambitionierter Klimapolitik wird Deutschland zur Mitte des 21. Jahrhunderts voraussichtlich noch immer **10 bis 20 Prozent** der aktuellen Treibhausgas-Emissionen freisetzen und den Klimawandel weiter vorantreiben.
- > 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 auch von vornherein vermeiden. Dazu wird fossiles Kohlendioxid direkt an der Emissionsquelle abgeschieden und anschließend unterirdisch gespeichert. Verfahren zur **Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung** werden auch als CCS bezeichnet. Die Abkürzung steht für die englische Bezeichnung: carbon capture and storage.
- > Kohlendioxid ist ein langlebiges Gas. Seine Entnahme und Speicherung müssen daher **effektiv und dauerhaft** sein. Einige zentrale Kohlendioxid-Entnahmemethoden wie Direct Air Capture und Bioenergiegewinnung mit Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) sind dabei auf die **Speicherung im tiefen Untergrund** angewiesen.

CO₂-Speicherung in Sandsteinformationen der deutschen Nordsee

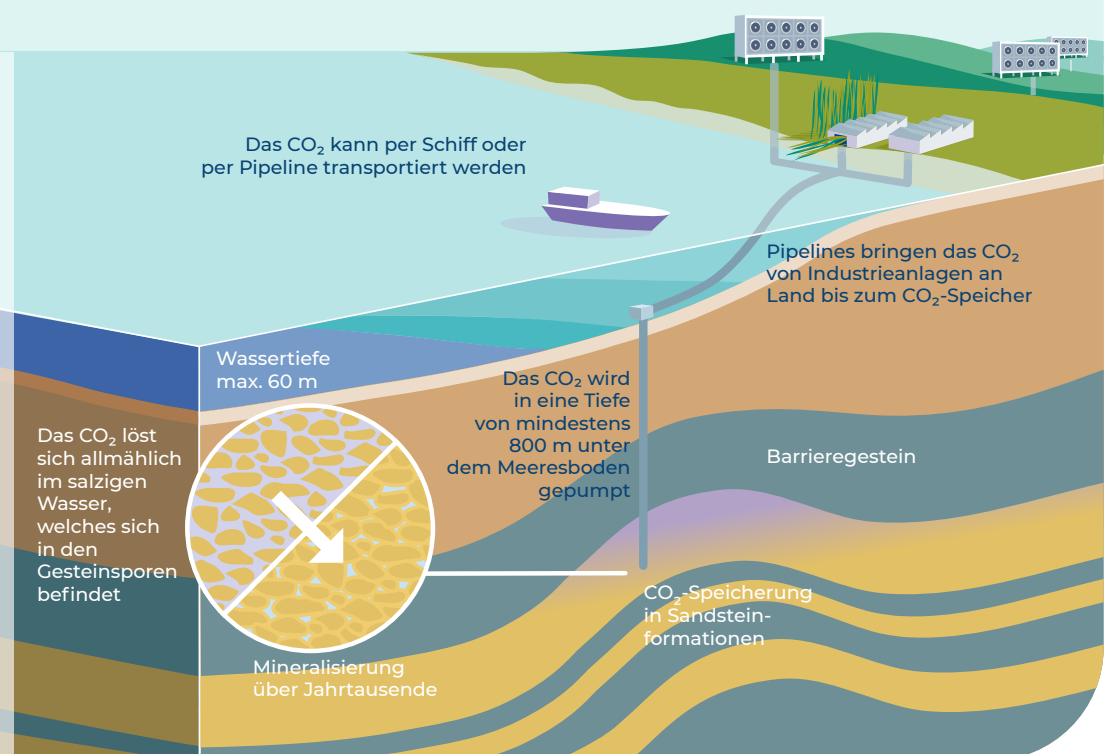
Für die Speicherung im tiefen Meeresuntergrund wird flüssiges Kohlendioxid via Schiff oder durch eine Pipeline in das Meeresgebiet transportiert und durch eine oder mehrere Bohrungen in tiefliegende poröse Sandsteinformationen gepresst. Dort breitet sich das Kohlendioxid in den Poren aus und sammelt 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.

Kosten für Abscheidung, Verflüssigung, Transport, Speicherung, Überwachung: **circa 150 bis 250 Euro pro Tonne Kohlendioxid**

Skalierbarkeit: Eine **CO₂-Speicherung im industriellen Maßstab ist möglich**

Dauer der Speicherung: **dauerhaft möglich, Monitoring erforderlich**

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



Technisch machbar, vielerorts geplant

- > 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.
- > In den Niederlanden, Dänemark, Großbritannien sowie in Norwegen planen verschiedene Firmen derzeit **weitere Großprojekte für die Nordsee**, weil sich die Abscheidung und Einlagerung von Kohlendioxid im Meeresuntergrund aufgrund der steigenden Preise für Kohlendioxid-Emissionszertifikate mittlerweile auch wirtschaftlich lohnen kann.

Geologischer Untergrund der Nordsee bietet viel CO₂-Speicherpotenzial

- > Die Nordsee verfügt über mächtige Sandsteinformationen in ihrem tiefen Untergrund und bietet damit gute **geologische Voraussetzungen** für eine Kohlendioxid-Speicherung. Ihre geringe Wassertiefe erleichtert zudem die Installation der notwendigen technischen Anlagen.
- > Schätzungen zufolge ließen sich im tiefen Untergrund der gesamten Nordsee etwa **150 Milliarden Tonnen Kohlendioxid** einlagern. Auf potenzielle Speichergesteine im Untergrund deutscher Gewässer entfielen dabei 3,6 bis 10,4 Milliarden Tonnen. Zum Vergleich: Berechnungen zufolge wird Deutschland künftig Rest-Emissionen in Höhe von 0,06 bis 0,13 Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr produzieren.

Umweltrisiken beachten und minimieren

- > Die **Risiken** des Verfahrens für Mensch und Umwelt sind weitgehend bekannt. Zu ihnen zählen:
 - > das ungewollte **Entweichen des eingelagerten Kohlendioxids** aus dem Speichergestein (Leckagen) und die daraus folgende Versauerung bodennaher Wassermassen;
 - > die **Belastung der Meeresumwelt** durch sehr salziges Formationswasser sowie durch **Schwermetalle und andere für die Umwelt schädliche Stoffe**, die im Formationswasser enthalten sein könnten, welches im Zuge einer Kohlendioxid-Injektion aus dem Speichergestein verdrängt wird;
 - > **seismische Erschütterungen** in der Tiefe, welche die Funktionalität und Standfestigkeit am Meeresboden verankerter Infrastrukturen gefährden könnten sowie
 - > die **Lärmbelastung** für Meeresorganismen im Zuge der Suche nach geeigneten Speicherstrukturen, beim Bau der Anlagen sowie bei der langfristigen Überwachung der Kohlendioxid-Speicher.

Überwachungs- und Vorsorgekonzepte wurden zwar für CCS-Projekte in Nachbarländern entwickelt, diese aber müssen nun an die Bedingungen in der deutschen Nordsee angepasst und gegebenenfalls ergänzt werden. Zudem werden **Strategien zum Umgang mit möglichen Konflikten** mit anderen Nutzungsformen der Nordsee (z. B. Offshore-Windkraftanlagen) benötigt.

Die deutsche Rechtslage zur Kohlendioxid-Speicherung im Meeresuntergrund ist klärungsbedürftig

- > Internationale Abkommen erlauben Küstenstaaten die Kohlendioxid-Speicherung im geologischen Untergrund der unter ihrer Hoheitsgewalt stehenden Meeresgebiete. In Deutschland erschwert jedoch eine zum **Teil klärungsbedürftige Rechtslage** Vorhaben zur Kohlendioxid-Speicherung. Um entsprechende Projekte durchführen zu können, müsste unter anderem das **Kohlendioxid-Speicherungsgesetz angepasst** werden. Außerdem empfehlen Expert:innen, die deutsche Meeresraumplanung auf den tiefen Meeresuntergrund auszudehnen.

CDRmare liefert Antworten, Schutz- und Handlungskonzepte

- > Im Rahmen der Forschungsmission CDRmare sollen **Lösungen und Handlungsoptionen** für offene geologische, technische und rechtliche Fragestellungen einer Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee gefunden und **Überwachungs- und Vorsorgekonzepte für bekannte Risiken** entwickelt werden. Außerdem schätzen die Forschenden die anfallenden **Kosten** ab. Auf diese Weise schaffen sie die wissenschaftlichen Voraussetzungen für ein umfassendes Demonstrationsprojekt.

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

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 Jahrtausende 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 Klimaforschung herrscht Konsens: Selbst mit ambitionierter Klimapolitik wird Deutschland zur Mitte des 21. Jahrhunderts voraussichtlich noch immer **10 bis 20 Prozent** der aktuellen Treibhausgas-Emissionen freisetzen und den Klimawandel vorantreiben. Es gibt allerdings noch keinen gesellschaftlichen Konsens darüber, wie hoch mögliche **Rest-Emissionen** sein dürfen und welche Sektoren diese verursachen dürfen. Zurzeit sind Rest-Emissionen beispielsweise in der Zementherstellung, im Flug- und Schwerlasttransport aber auch in der Landwirtschaft und bei der Müllverbrennung nicht vermeidbar.
- > Um diese Rest-Emissionen auszugleichen, wird die Menschheit Kohlendioxid entweder direkt an seinen Quellen auffangen oder aber im selben Umfang aus der Atmosphäre entnehmen müssen. Anschließend muss das Gas sicher 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.
- > Kohlendioxid ist ein langlebiges Gas. Seine Entnahme und Speicherung müssen daher **effektiv und dauerhaft** sein. Einige zentrale Kohlendioxid-Entnahmemethoden wie Direct Air Capture

Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer-Kruste

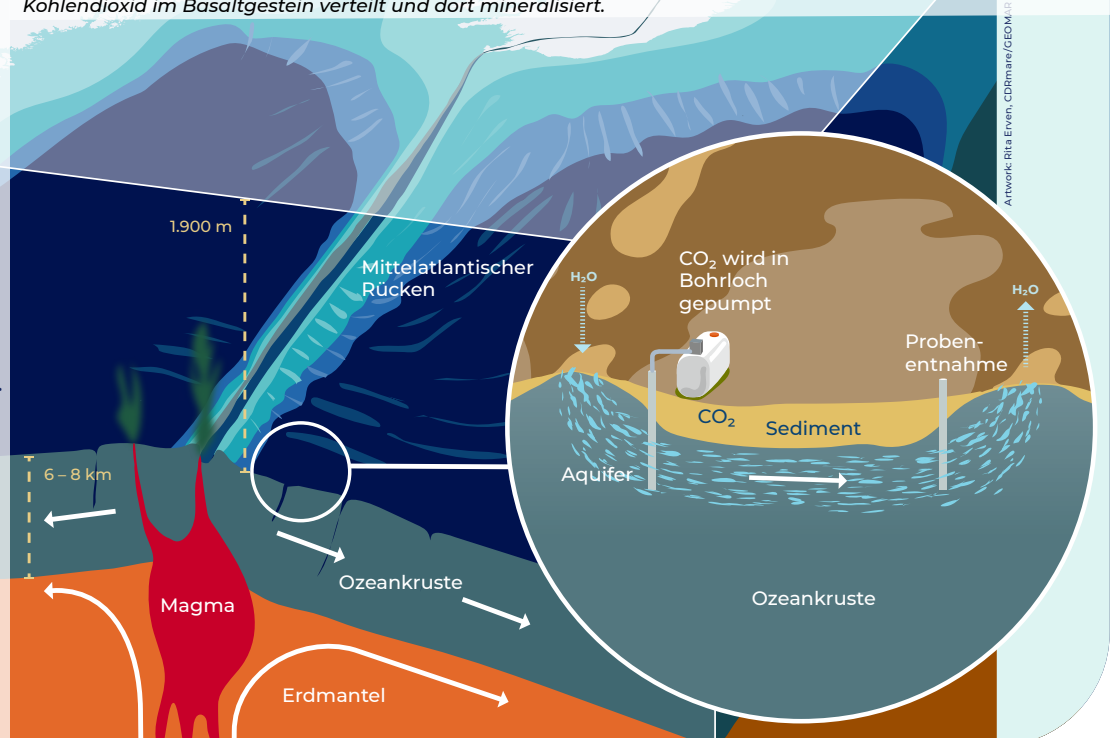
Kosten: auf Island etwa 25 bis 45 Euro pro Tonne CO₂, aber für **größere Meerestiefen bislang unklar.**

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.**

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.



Artwork: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

und Bioenergiegewinnung mit Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) sind auf die **Speicherung im tiefen Untergrund** angewiesen.

Porös und reaktionsfreudig: Die obere Ozeankruste als Kohlendioxid-Speicher

- > Als Speicher für abgeschiedenes Kohlendioxid bietet sich die **obere, 400 Meter mächtige Basaltschicht der ozeanischen Kruste** an. Dieses Basaltgestein ist **hochporös und sehr reaktionsfreudig**. Das heißt, es bietet zum einen viel Raum. Zum anderen enthält es viele Minerale, die mit dem im Meerwasser gelösten Kohlendioxid reagieren und es durch die Bildung neuer Minerale (Gestein) **fest binden – und zwar für Jahrtausende**.

Erfolgsprojekt auf Island: Kohlendioxid mineralisiert zu 98 Prozent

- > Auf Island wird seit acht Jahren abgeschiedenes und in Süßwasser gelöstes Kohlendioxid in die obere Ozeankruste injiziert. Die Vulkaninsel liegt genau auf dem Mittelatlantischen Rücken, sodass die Ozeankruste hier bis über die Meeresoberfläche reicht und 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 98 Prozent des injizierten Kohlendioxids**.

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

- > Orte, an denen die Ozeankruste wie auf Island über den Meeresspiegel hinausragt, gibt es nur wenige und meist liegen sie fernab industrieller Zentren, wo viele Kohlendioxid-Emissionen entstehen. Deshalb untersuchen Forschende 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 Meerwasser und Leckagen aus dem Untergrund damit unwahrscheinlicher**.
- > In der Forschungsmission CDRmare führen Geolog:innen erstmals ein wissenschaftliches **Kohlendioxid-Einleitungsexperiment in der nordatlantischen Tiefsee** durch. Mit ihm wollen sie zum einen das Spektrum denkbarer Kohlendioxid-Speicheroptionen entlang mittelozeanischer Rücken abstecken. Zum anderen gilt es, bestehende Wissenslücken zur Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste zu schließen und herauszufinden, ob eine Kohlendioxid-Einlagerung in der Tiefsee im Vergleich zur geologischen Speicherung an Land die nachhaltigere, effektivere und langfristig kostengünstigere Option wäre.
- > Außerdem entwickeln und testen die Wissenschaftler:innen **neue tiefseetaugliche Sensorik** sowie modular einsetzbare **Unterwasser-Roboter**. Sie sind die Voraussetzung für die großflächige Untersuchung des Tiefseebodens rund um die Injektionsstelle auf mögliche Leckagen und könnten langfristig auch für **die Überwachung anderer Verfahren zur Kohlendioxid-Speicherung im Meeresuntergrund** eingesetzt werden.
- > Das Forschungsexperiment in der Tiefsee soll im Sommer 2025 in internationalen Gewässern des Nordatlantiks stattfinden, 300 bis 800 Kilometer südlich Islands, **im Bereich der Ostflanke des Reykjanes-Rückens**.
- > Die im Rahmen der CDRmare-Mission geplanten wissenschaftlichen Bohrungen und das dazugehörige Einleitungsexperiment dienen einzig und allein Forschungszwecken.

CDRmare liefert Antworten

- > Basierend auf den Ergebnissen des Tiefsee-Experimentes und anschließender Computer-Modellierungen werden die Forschenden Kosten-Nutzen-Analysen durchführen und erstmals **Handlungsoptionen für das gesamte Spektrum der Möglichkeiten** entlang mittelozeanischer Rücken ableiten – angefangen bei einer möglichen Kohlendioxid-Injektion in Basaltgestein an Land bis hin zu Speicherprojekten in mittlerer und großer Wassertiefe.
- > Dieses Handlungswissen soll Entscheidungstragende aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft in die Lage versetzen, **faktenbasiert** über die verschiedenen Optionen einer Kohlendioxid-Speicherung im Meeresuntergrund zu diskutieren.

Alle hier beschriebenen Forschungsarbeiten werden im CDRmare-Forschungsverbund »AIMS3 – Alternative Szenarien, innovative Technologien und Monitoringansätze für die Speicherung von Kohlendioxid in ozeanischer Kruste« durchgeführt.



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 Grafik: Rita Erven // Juni 2023

Ergebnis-Synthese

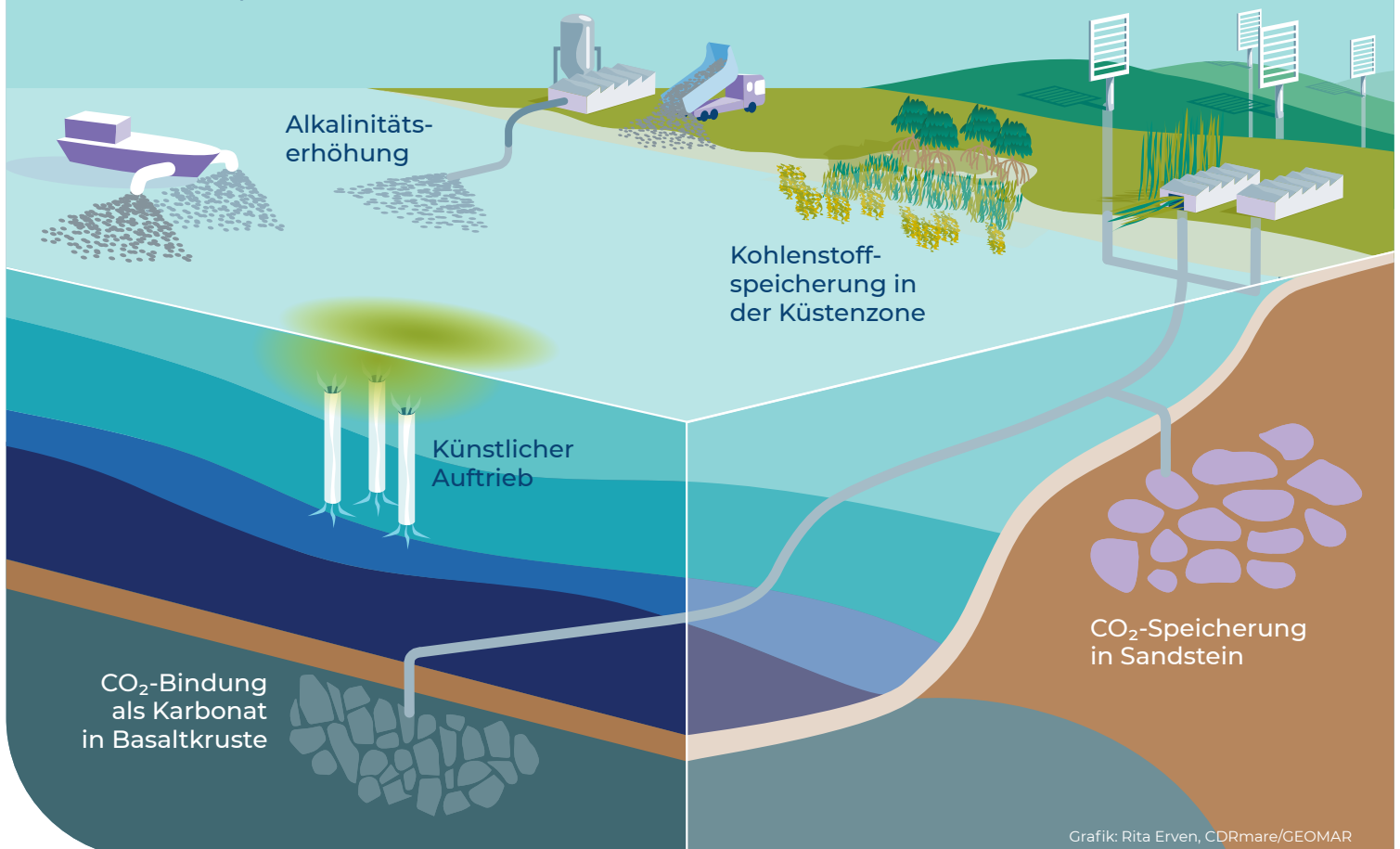
Ein Bewertungsleitfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden

Zu marinen Kohlendioxid-Entnahme-Methoden wird derzeit mehr geforscht als je zuvor. Das Fachwissen über die einzelnen Ansätze wächst stetig. Gleichzeitig setzt die Politik auf Kohlendioxid-Entnahme-Methoden, um nationale Klimaziele zu erreichen. Was fehlt, ist ein Instrument, mit dem die Forschungsergebnisse zusammengeführt und Methoden bewertet werden können – auf transparente und für jedermann nachvollziehbare Weise. In der Forschungsmission CDRmare entwickelt ein interdisziplinäres Team von Wissenschaftler:innen einen Bewertungsleitfaden, der dies ermöglichen soll. Er fragt nicht nur, ob eine Methode technisch, rechtlich oder politisch umsetzbar ist, sondern auch, ob ihr Einsatz gemessen an ethisch-moralischen Grundsätzen unserer Gesellschaft als »wünschenswert« bezeichnet werden kann – ein elementar wichtiger Beitrag für künftige Debatten.

**Das große Klimaziel:
Netto-Null**

- > In der Klimaforschung herrscht Konsens: Selbst mit ambitionierter Klimapolitik wird die Menschheit zur Mitte des 21. Jahrhunderts voraussichtlich noch immer **Restmengen von Kohlendioxid und anderer Treibhausgase** freisetzen, welche zur weiteren Erderwärmung beitragen werden.
- > Um diese Rest-Emissionen und somit deren Klimawirksamkeit auszugleichen, müsste die Menschheit Kohlendioxid **im selben Umfang aus der Atmosphäre entnehmen**.
- > Viele bekannte Methoden zur **Kohlendioxid-Entnahme** (Carbon Dioxide Removal, CDR) sind landbasiert. Da Land jedoch eine knappe Ressource ist, werden nun **ozeanbasierte Methoden** verstärkt erforscht.

Ozeanbasierte Methoden der Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre



Schwierige Entscheidungen für Gesellschaft und Politik

- > Menschliche Eingriffe in das System Ozean zur **Erhöhung der Kohlendioxid-Aufnahme** verändern u. a. die Meereschemie oder Ökosysteme und damit die Lebensbedingungen für viele Meeresorganismen.
- > Der **Ozean** ist außerdem ein von der Menschheit **intensiv und vielfältig genutzter Raum** – und unsere Ansprüche an die Leistungen der Meere steigen weiter. Sie sollen einer wachsenden Weltbevölkerung langfristig jene Nahrung, Energie und Rohstoffe (auch für die Energiewende) liefern, die an Land nicht mehr in einem ausreichenden Maße produziert werden können.
- > **Jede Nutzung und Eingriff** in das empfindliche System Ozean **müssen deshalb sorgsam überdacht werden** und es muss sichergestellt werden, dass den Meeren und ihren Ökosystemen nicht geschadet wird.
- > Sollte die erforderliche **Kohlendioxid-Entnahme zum Ausgleich der Rest-Emissionen** verstärkt durch ozeanbasierte Methoden erfolgen, würde dies **großräumige Eingriffe über lange Zeiträume** hinweg erfordern. Dazu müssten internationale Industriezweige und die dazugehörigen Verwaltungs- und Regulierungsstrukturen entstehen, deren Zweck eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme und -Speicherung der Meere wäre.
- > Diese komplexe Ausgangssituation stellt die Gesellschaft und ihre Entscheidungsträger:innen vor eine enorme **Herausforderung**. Es gilt, den Klimawandel wirksam zu begrenzen und gleichzeitig eine nachhaltige Entwicklung und damit eine lebenswerte Zukunft für alle Menschen auf der Erde zu sichern.

Klare Antworten werden gebraucht

- > Um diese Herausforderung zu meistern, brauchen politische Akteur:innen **verständliche und transparente Informationen** darüber, ob Methoden der marinen Kohlendioxid-Entnahme tatsächlich im erhofften Maße funktionieren, ob sie politisch, rechtlich, sozial und finanziell umsetzbar wären, welche Vorteile und Risiken sie für Mensch und Umwelt mit sich bringen und ob ihr Einsatz und alle damit verbundenen Auswirkungen langfristig tatsächlich erstrebenswert sind.
- > Antworten auf diese Fragen können Entscheidungsfindungsprozesse unterstützen, bevor marine CDR-Methoden möglicherweise im großen Maßstab umgesetzt werden.

Ein Bewertungsleitfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden

- > In der Forschungsmission CDRmare entwickeln Wissenschaftler:innen aus den Natur-, Sozial-, Geistes-, Rechts- und Wirtschaftswissenschaften einen **dringend erforderlichen Bewertungsleitfaden** für marine CDR-Methoden.
- > Er fragt nicht nur danach, **welche Methoden funktionieren** und sich tatsächlich technisch umsetzen lassen, sondern untersucht zudem, **ob die erzielten Effekte wünschenswert sind** und wir mit marinen CDR-Methoden zum Erreichen des Netto-Null-Zieles beitragen können, **ohne international anerkannte Ziele und Normen in anderen Bereichen zu gefährden** – so zum Beispiel die UN-Ziele für eine nachhaltige Entwicklung.
- > Der neue Bewertungsleitfaden wird die vielen Dimensionen des Themas Kohlendioxid-Aufnahme und -Speicherung im Meer abdecken und soll Entscheidungsträger:innen aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft in die Lage versetzen, ein faktenbasiertes und nachvollziehbares Urteil zu einzelnen Methoden oder künftigen Projekten zu fällen.
- > Außerdem soll der Leitfaden **mit Ansätzen zur Bewertung landbasierter Kohlendioxid-Entnahme-Methoden** synchronisiert werden, sodass er einen Vergleich ozeanbasierter Kohlendioxid-Entnahme-Methoden mit landbasierten Verfahren ermöglicht.

Die Entwicklung des hier beschriebenen Bewertungsleitfadens erfolgt im CDRmare-Forschungsverbund »ASMASYS – Bewertungsrahmen für marine Kohlendioxidentnahme und Synthese des aktuellen Wissensstandes«.



asmasy.
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 Grafik: Rita Erven // April 2023