



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM)
»Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung«

Gezielte Kohlendioxid-Entnahme

Welche Möglichkeiten meeresbasierte Verfahren bieten
und wie diese erforscht werden

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

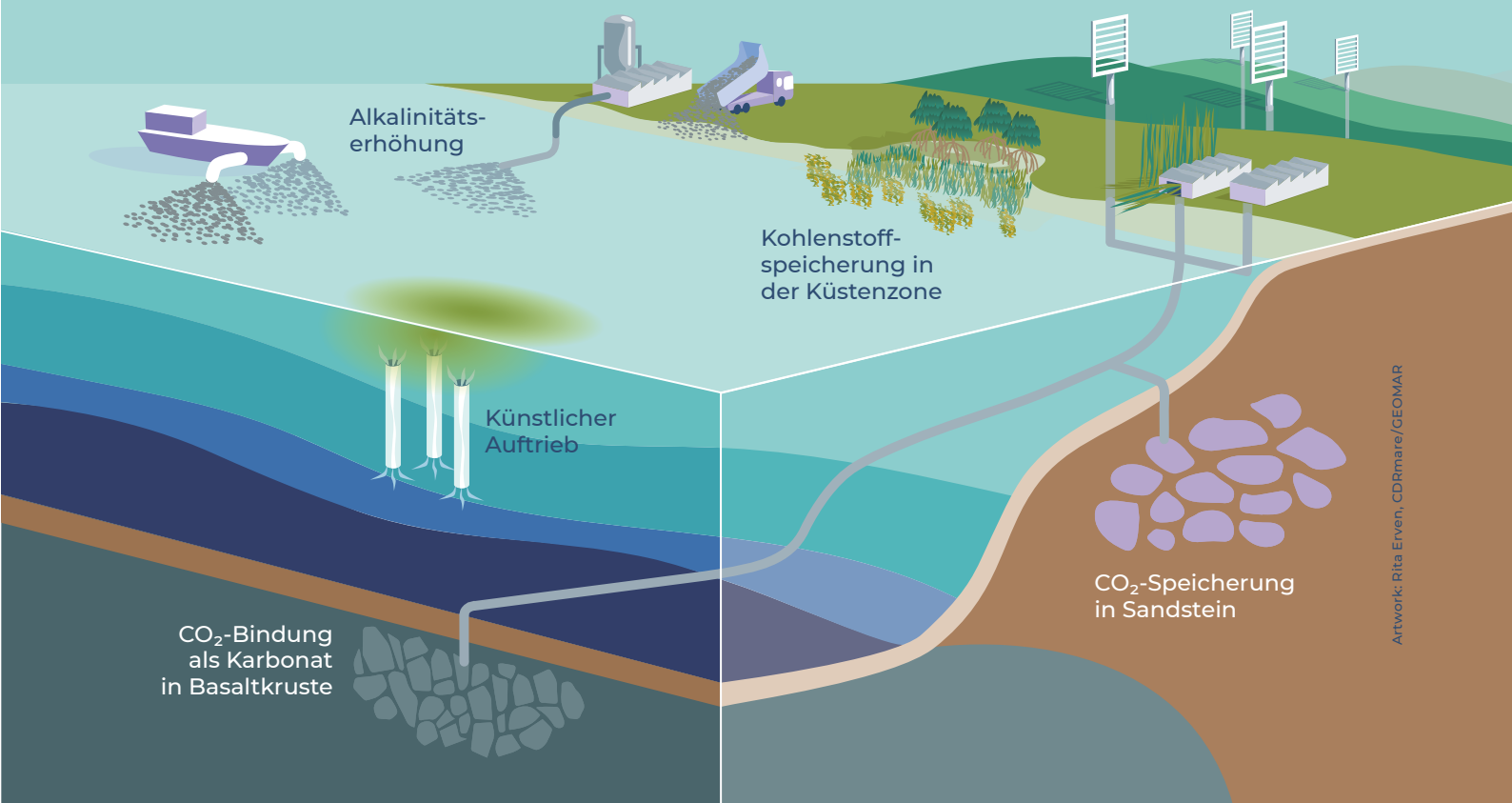
Coverfoto: Antoine Similon, unsplash.com

Juli 2023

Texte und Infographiken: CC BY 4.0

Klimaneutral gedruckt auf Recycling Papier aus 100 % Altpapier, FSC® zertifiziert und ausgezeichnet mit dem EU Ecolabel und dem Blauen Umweltengel

Cite as: CDRmare (2023): Gezielte Kohlendioxid-Entnahme // Welche Möglichkeiten meeresbasierte Verfahren bieten und wie diese erforscht werden, CDRmare Research Mission, pp. 1-64, DOI 10.3289/CDRmare.27



Gezielte Kohlendioxid-Entnahme Welche Möglichkeiten meeresbasierte Verfahren bieten und wie diese erforscht werden

Grußworte	4
Vorwort	6
Hintergrund I: Gesellschaftlicher Handlungsdruck	
Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre: Dringend benötigt	9
Hintergrund II: Der natürliche Kohlenstoffkreislauf der Erde	
Kohlenstoffspeicher Ozean: So nimmt das Meer Kohlendioxid auf	11
Biologische Methoden	
Verstärkte Kohlenstoffspeicherung durch die Ausweitung der Wiesen und Wälder des Meeres	19
Künstlicher Auftrieb: Mehr Power für die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres	27
Chemische Methoden	
Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans	35
Geologische Methoden	
Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee	43
Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste	51
Ergebnis-Synthese	
Ein Bewertungsleitfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden	59



Deutsche Allianz Meeresforschung

Das Meer ist für uns Menschen überlebenswichtig: Es reguliert unser Klima, versorgt uns mit Nahrung und Energie, ist Quelle für Erholung und Inspiration. Doch der menschengemachte Klimawandel, Verschmutzung und Übernutzung gefährden dieses System und seine Funktionen. Indem wir schnell und nachhaltig handeln, können wir unsere Lebensgrundlage und die kommender Generationen erhalten. Die Wissenschaft liefert hierfür wichtige Informationen.

Ziel der 2019 vom Bund und den norddeutschen Ländern gegründeten Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) ist, den nachhaltigen Umgang mit Küsten, Meeren und dem Ozean zu stärken. Auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse bietet sie Informationen für fundierte Entscheidungen in Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft. Die erste DAM-Forschungsmission CDRmare, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und den norddeutschen Ländern, liefert Erkenntnisse zur Rolle des Ozeans bei der Aufnahme und langfristigen Speicherung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre – ein entscheidender Baustein, um Klimaneutralität in den kommenden Dekaden zu erreichen.

Joachim Harms, Michael Schulz, Katja Matthes und Ulrich Bathmann

Vorstand der Deutschen Allianz Meeresforschung, DAM



Grußwort

Liebe Leserinnen und Leser,

der Weg zur Klimaneutralität ist eingeschlagen. Der Umstieg von Kohle, Öl und Gas auf erneuerbare Energien und auch zahlreiche Maßnahmen für Bau, Verkehr und Kreislaufwirtschaft zahlen auf dieses Konto ein. Aber das Reduzieren von CO₂-Emissionen stößt an Grenzen, schließlich sollen Industrie, Landwirtschaft und unser produktives Leben insgesamt nicht zum Erliegen kommen. Wir brauchen deswegen zusätzliche Methoden, um die Rest-Emissionen auszugleichen und »Net Zero« zur Realität zu machen.

Genau dort setzt die Forschungsförderung unseres Hauses an. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt die rasche Entwicklung von technologieoffenen Ansätzen, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen, zu speichern oder wiederzuverwerten. Mit mehr als 50 Millionen Euro finanzieren wir innovative CDR-Methoden in zwei großen Linien: neben CDRmare, das in diesem Heft vorgestellt wird, auch die landbasierte Forschungsmission CDRterra.

Der Ozean ist unser Verbündeter. Er nimmt viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und bindet das Treibhausgas auf lange Zeit – derzeit etwa ein Viertel der CO₂-Emissionen. Wie lässt sich diese natürliche Speicherfähigkeit erhöhen? Das ist bei CDRmare

die Kernfrage der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, der viele weitere Fragen folgen, vor allem: Wie verändern diese neuen Technologien die Meeresumwelt? Wie lassen sie sich verträglich anwenden und zugleich finanzieren? Was ist in den nächsten Jahren realistisch und was nicht?

Mein großer Dank gilt allen Forschenden, die gerade mit Hochdruck an diesen komplexen Zusammenhängen arbeiten. Ihre Erkenntnisse bilden das Fundament, auf dem wir entscheiden, ob und wie genau marine CDR-Methoden im großen Maßstab umgesetzt werden können. Wir wissen alle, die wissenschaftlichen Fortschritte dulden keinen Aufschub. Deswegen setze ich mich dafür ein, zügig den rechtlichen Rahmen zu schaffen bzw. anzupassen, zum Beispiel für die Erforschung der unterirdischen Speicherung von CO₂. Insbesondere das Kohlendioxid-speicherungsgesetz und das Hohe-See-Einbringungsgesetz stehen auf unserer To-Do-Liste.

Diese Broschüre ist Werkstatteinblick und Dokumentation zugleich. Denjenigen, die sich hier erstmals intensiver mit CDRmare befassen, wünsche ich eine aufschlussreiche Lektüre, und allen, die das Programm vorantreiben, weiterhin viel Tatkraft und größtmöglichen Erfolg. Diese Mission, so viel ist sicher, dient der Zukunft der Menschheit.

Bettina Stark-Watzinger

Mitglied des Deutschen Bundestages
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Vorwort



Foto: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

Keine Alternative zu einer treibhausgasneutralen Zukunft

Spätestens seit der Veröffentlichung des 6. Sachstandsberichts des Weltklimarats ist es bittere Gewissheit: Die Menschheit wird die globale Erwärmung bis zum Jahr 2100 nicht mehr allein durch die Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen auf unter zwei 2 Celsius begrenzen können. Wenn wir das Pariser Klimaziel erreichen wollen, müssen wir ab sofort alle irgendwie vermeidbaren Treibhausgas-Emissionen einstellen und zusätzlich Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnehmen.

Das Gebot der Emissionsvermeidung bezieht sich vor allem auf das Treibhausgas Kohlendioxid, welches sich in der Atmosphäre anreichert und dort wegen seiner langen Lebensdauer für Jahrhunderte wirkt. Kohlendioxid entsteht nach wie vor als Abfallprodukt bei den meisten unserer Aktivitäten. Gemeinschaftlich entsorgen wir mittlerweile rund 40 Milliarden Tonnen pro Jahr in die Atmosphäre – zum Leidwesen aller: des Klimas, der Natur sowie aktueller und auch zukünftiger Generationen Mensch.

Dieses Abfallprodukt erst gar nicht entstehen zu lassen, muss oberste Priorität in jeder unserer Entscheidungen haben. Mit welchen Lösungen uns ein solcher Wandel in den kommenden 20 Jahren gelingen kann, beschreibt unter anderem der Bericht des Weltklimarates. Es fehlen allein die politische und gesellschaftliche Entschlossenheit, entsprechende Veränderungen auch gemeinschaftlich umzusetzen.

Um es ganz klar zu sagen: Es gibt keine Alternative zu einer treibhausgasneutralen Zukunft. Die globale Erwärmung kann nur durch eine solche auch als »Netto-Null« bezeichnete Treibhausgasneutralität gestoppt werden. Bis dahin steigen mit jedem Zehntelgrad Erwärmung die Klimarisiken und -schäden für uns und die Natur. Wollen wir und kommende Generationen eine Zukunft auf einer Erde haben, wie wir sie bislang kennen, müssen wir jetzt entschlossen die Weichen dafür stellen und Treibhausgasemissionen in allen Bereichen vermeiden.

Gezielte Kohlendioxid-Entnahme: Eine längst überfällige Debatte

Allerdings wissen wir auch, dass es uns kaum gelingen wird, alle menschengemachten Treibhausgasemissionen bis Mitte des Jahrhunderts zu vermeiden. Aktuell werden schwer vermeidbare Treibhausgasemissionen in der Zement- und Düngerproduktion, aber auch im Flug- und Schwerlasttransport sowie in der Landwirtschaft und Müllverbrennung gesehen. Schwer vermeidbare Emissionen gibt es ebenfalls für Methan und Lachgas, vor allem im landwirtschaftlichen Sektor. Alle diese Emissionen sind strenggenommen nicht unvermeidbar, ihre Vermeidung würde aber gegebenenfalls extreme ökonomische und soziale Kosten verursachen. Es gibt bisher keinen gesellschaftlichen Konsens darüber, wie hoch die schwer vermeidbaren Emissionen sein dürfen und wie sie auf verschiedene Sektoren verteilt werden sollen. Um die globale Erwärmung jedoch zu stoppen, bleibt uns keine andere Wahl, als diese sogenannten Rest-Emissionen durch eine gezielte Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre auszugleichen.

Eine solche Entnahme wird zwar in den Berichten des Weltklimarats und auch in den Klimastrategien vieler Länder erwähnt, eine grundlegende gesellschaftliche Debatte darüber, wie sie verantwortungsvoll erfolgen soll, gibt es bisher aber nicht. Klar ist, dass sowohl global als auch national eine Kohlendioxid-Entnahme in einem erheblichen Umfang erforderlich sein wird, wenn ein Ausgleich gelingen soll. Optimistischen Schätzungen zufolge werden allein die künftigen Rest-Emissionen Deutschlands 10 bis 20 Prozent der heutigen Emissionen betragen. Das heißt, wir sprechen global von mehreren Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr. Angesichts dieser Mengen wird offensichtlich, dass die erforderliche Kohlendioxid-Entnahme nur gelingen kann, wenn eine Vielfalt von Optionen genutzt wird. Viele der diskutierten Verfahren sind dabei ozeanbasiert.

Um Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme faktenbasiert und umfassend bewerten zu können, benötigen Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft Wissen, welches bislang in vielerlei Hinsicht noch fehlt. Fraglich ist zum Beispiel, wie viel Kohlendioxid sich

mit den diskutierten Ansätzen tatsächlich aus der Atmosphäre entnehmen ließe, welche Risiken und Nebenwirkungen es dabei gäbe und welche Methoden auf eine sozial- und umweltverträgliche Weise umsetzbar wären.

Aufgaben der Forschung: Wissen generieren und teilen – für faktenbasierte und informierte Debatten und Entscheidungen

An diesen Wissenslücken setzt unsere Forschungsmission CDRmare an: Rund 200 Forschende aus 22 Partnerinstitutionen untersuchen darin disziplinenübergreifend, ob und in welchem Umfang der Ozean eine wesentliche Rolle bei der Entnahme und Speicherung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre spielen kann. Wir betrachten die Wechselbeziehungen mit – und die Auswirkungen auf – die Meeresumwelt, das Erdsystem und die Gesellschaft, und wir entwickeln Ansätze für die Überwachung, Zuschreibung und Bilanzierung der marinen Kohlenstoffspeicherung in einer sich verändernden Umwelt. Unsere Forschungsergebnisse und die daraus abgeleiteten Handlungsoptionen sollen dazu beitragen, dass in Deutschland auf informierte und faktenbasierte Weise über einen möglichen Einsatz mariner Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme entschieden werden kann.

Ein enger Austausch zwischen Wissenschaft und Gesellschaft ist zentral, um die relevanten Fragen zur Kohlendioxid-Entnahme zu stellen und zu bearbeiten, und schließlich auch die gesellschaftlichen Entscheidungen gut informiert zu treffen. Wenn Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme tatsächlich helfen sollen, unsere Klimaziele zu erreichen, dann müssen wir als Gesellschaft ihre Umsetzung und Regulierung frühzeitig vorbereiten. Angesichts der sehr knappen verbleibenden Zeit zum Erreichen der Klimaziele müssen die dafür notwendigen Debatten jetzt geführt werden. Diese Broschüre fasst die Forschung von CDRmare zusammen und soll über mögliche Maßnahmen der marinen Kohlendioxid-Entnahme informieren. Damit wollen wir auch Denkanstöße liefern für die so dringend benötigte Diskussionen über die Handlungsoptionen zum Erreichen der Klimaziele. Wir können nicht nichts tun.

Prof. Dr. Andreas Oschlies

Prof. Dr. Gregor Rehder

Sprecher Forschungsmission CDRmare

HINWEIS

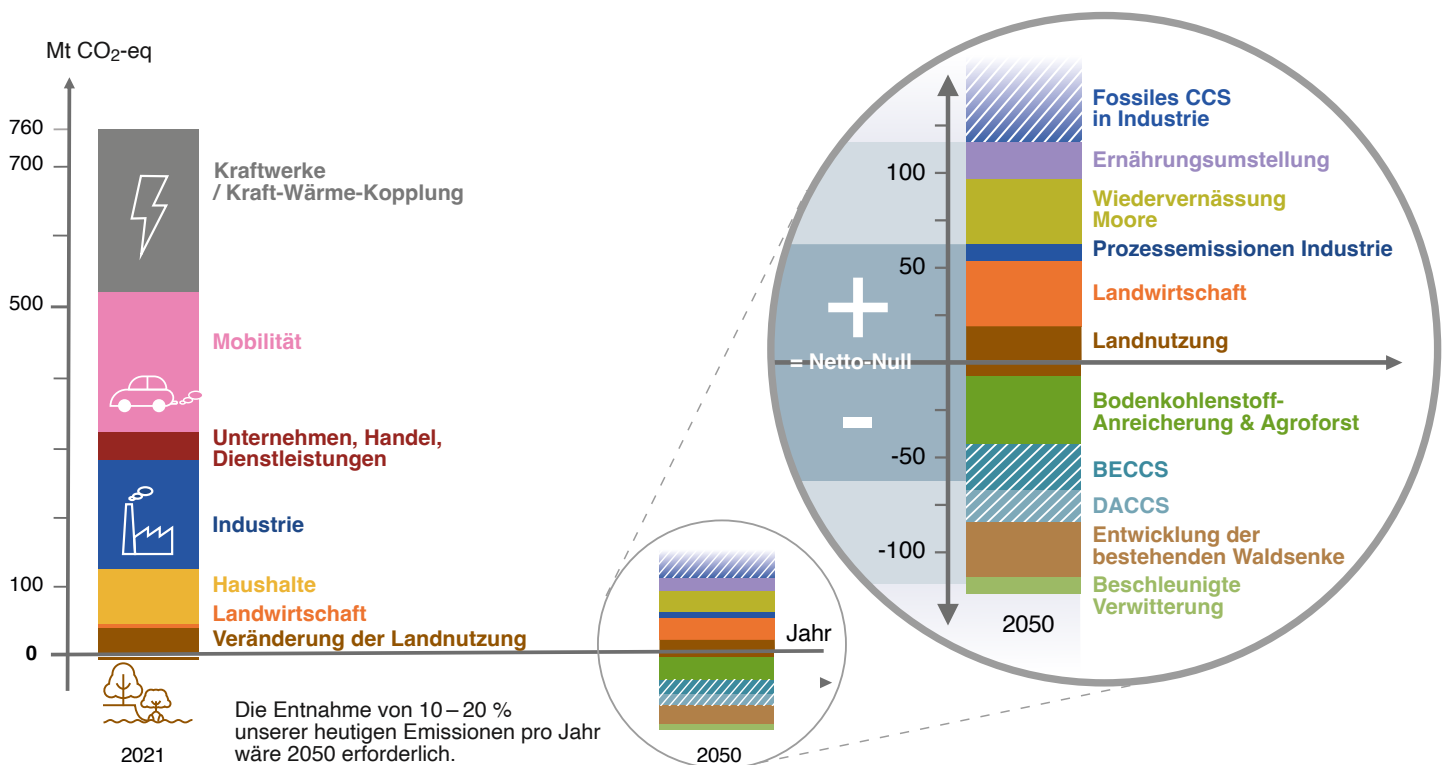
In Politik, Wissenschaft und Gesellschaft wird aktuell darüber diskutiert, welche Treibhausgasemissionen gemeint sind, wenn von Rest-Emissionen gesprochen wird, und welche Emissionen als »schwer vermeidbar« bezeichnet werden. Da diese Debatte noch nicht abgeschlossen ist, unterscheiden wir in dieser Publikation nicht zwischen Rest-Emissionen und schwer vermeidbaren Treibhausgasemissionen, sondern verwenden beide Bezeichnungen synonym.

Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre: Dringend benötigt

Selbst bei ambitionierter Klimapolitik wird die Menschheit 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.



Diese Grafik vergleicht die Emissionen der Bundesrepublik Deutschland aus dem Jahr 2021 mit einem Netto-Null-Emissionsziel für das Jahr 2050. Voraussetzung dafür sind die Vermeidung großer Emissionsmengen, eine drastische Reduktion der Emissionen in Sektoren, die einen Ausstoß von Treibhausgasen nicht vollständig vermeiden können sowie die Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre mithilfe ökosystembasierter und technologischer Ansätze.

Nadine Mengis, Rita Erven nach: Anne Merfort, Miodrag Stevanović, Jessica Streffer (2023): Energiewende auf Netto-Null: Passen Angebot und Nachfrage nach CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen? Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.

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 (Methoden zur Entnahme von Methan oder Lachgas existieren bislang nicht). 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 Kohlendioxid-Aufnahmefähigkeit ist der Ozean Haupt-

akteur im globalen Kohlenstoffkreislauf. Allerdings finden die Kohlendioxid-Aufnahmeprozesse im Ozean und Ozeanboden auf langen Zeitskalen statt. Durch verschiedene Verfahren könnten diese beschleunigt und damit die Kohlendioxid-Aufnahmerate des Ozeans erhöht werden. Da der Atmosphäre dabei Kohlendioxid entnommen werden würde, bezeichnen Fachleute diese Verfahren auch als CO₂-Entnahme-Verfahren oder abgekürzt als CDR (engl: Carbon Dioxide Removal)

CDRmare: Forschung liefert Antworten

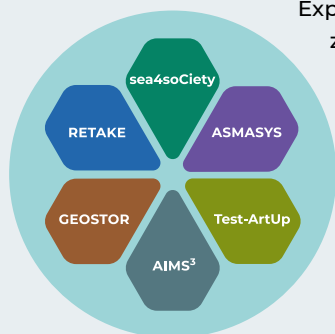
In der interdisziplinären Forschungsmission CDRmare untersuchen Forschende ein breites Spektrum mariner Ansätze zur Kohlendioxid-Entnahme und -Speicherung und erforschen aktuell vielversprechend erscheinende Methoden und Maßnahmen. Dabei betrachten die Wissenschaftler:innen den Ozean als globales, zusammenhängendes 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 Forschungsverbünde

Die Forschungsmission 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:

- > Innovative Ansätze zur Verbesserung des Kohlenstoffspeicherungspotenzials von Vegetationsküstenökosystemen ([sea4soCiety](#))
- > Künstlicher Ozeanauftrieb im Feldtest ([Test-ArtUp](#))
- > CO₂-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung: Potenzial, Nutzen und Risiken ([RETAKE](#))
- > Submarine Kohlendioxid-Speicherung in Geologischen Formationen der Deutschen Nordsee ([GEOSTOR](#))
- > Alternative Szenarien, innovative Technologien und Monitoringansätze für die Speicherung von Kohlendioxid in ozeanischer Kruste ([AIMS³](#))
- > Bewertungsrahmen für marine CO₂ und Synthese des aktuellen Wissensstandes ([ASMAYSYS](#))

Hintergrund II: Der natürliche Kohlenstoffkreislauf der Erde

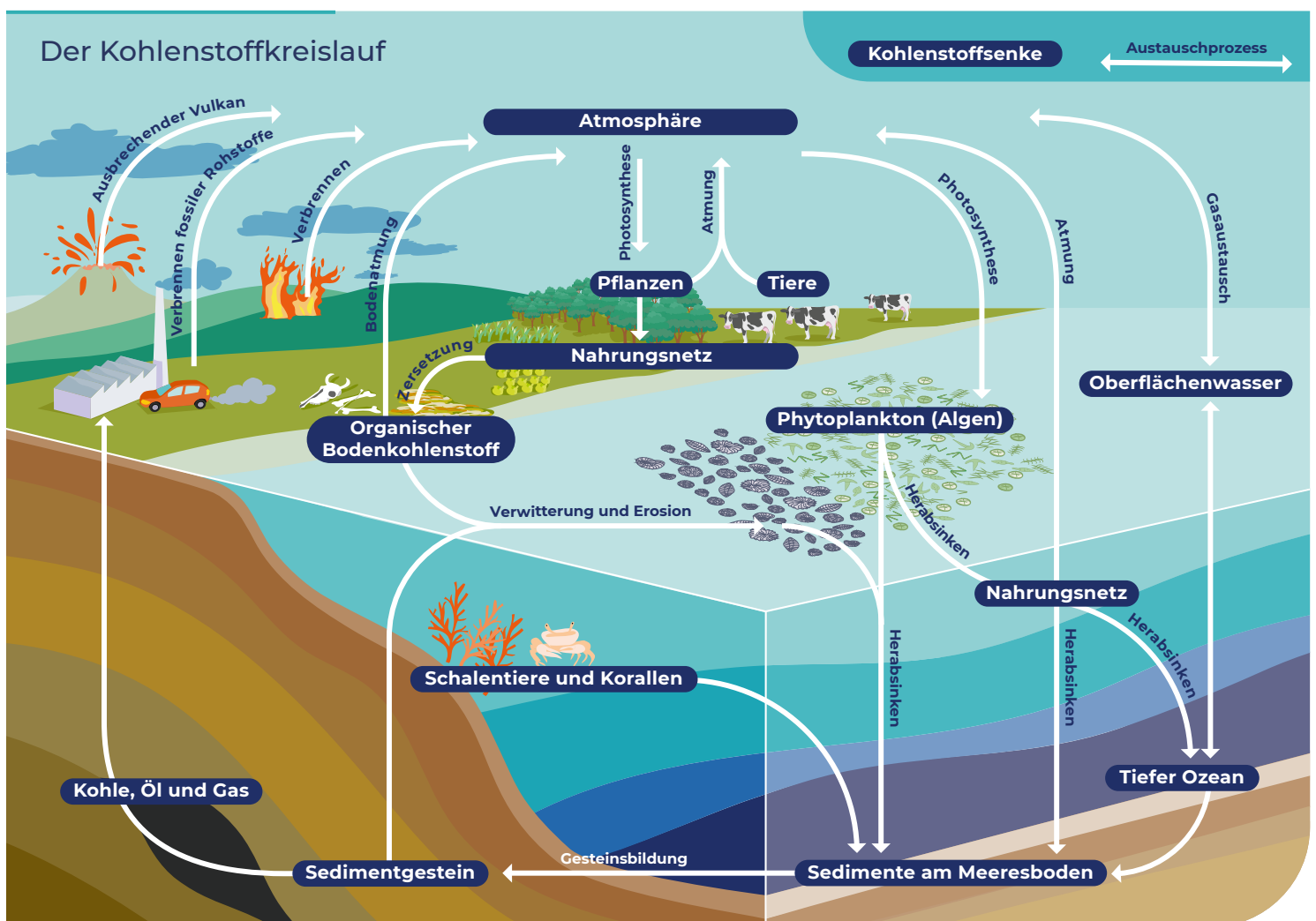
Kohlenstoffspeicher Ozean: So nimmt das Meer Kohlendioxid auf

Der Weltozean hat in den zurückliegenden Jahrzehnten rund 25 Prozent der vom Menschen verursachten Kohlendioxid-Emissionen aufgenommen und den Klimawandel somit maßgeblich gebremst. Diesen natürlichen Klimaservice des Meeres könnte die Menschheit ankurbeln, indem sie die Kohlendioxid-Aufnahmeprozesse des Meeres auf vielfältige Weise verstärkt.

Kohlenstoff: Ein lebenswichtiges Element

Kohlenstoff ist ein Baustein des Lebens auf unserem Planeten. Aus kohlenstoffhaltigen Verbindungen besteht alles lebende Gewebe und damit Pflanzen, Tiere und auch der Mensch. Kohlen-

stoff steckt zudem in Holz und Kohle, in Marmor und Kalkstein sowie in erdölbasierten Kunst- und Kraftstoffen. Diese Formenvielfalt ist auf die Bindungsfreudigkeit der Kohlenstoffatome



Diese Übersicht zeigt die verschiedenen Stationen und Prozesse des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs der Erde. Alle blau markierten Abschnitte kennzeichnen sogenannte Kohlenstoffspeicher oder -speicher, in denen Kohlenstoff oder eine seiner vielen Verbindungen eingelagert wird. Als weiße Pfeile sind alle Austauschprozesse dargestellt, bei denen Kohlenstoff oder eine seiner vielen Verbindungen gebunden, verlagert, ausgetauscht oder aber freigesetzt wird.

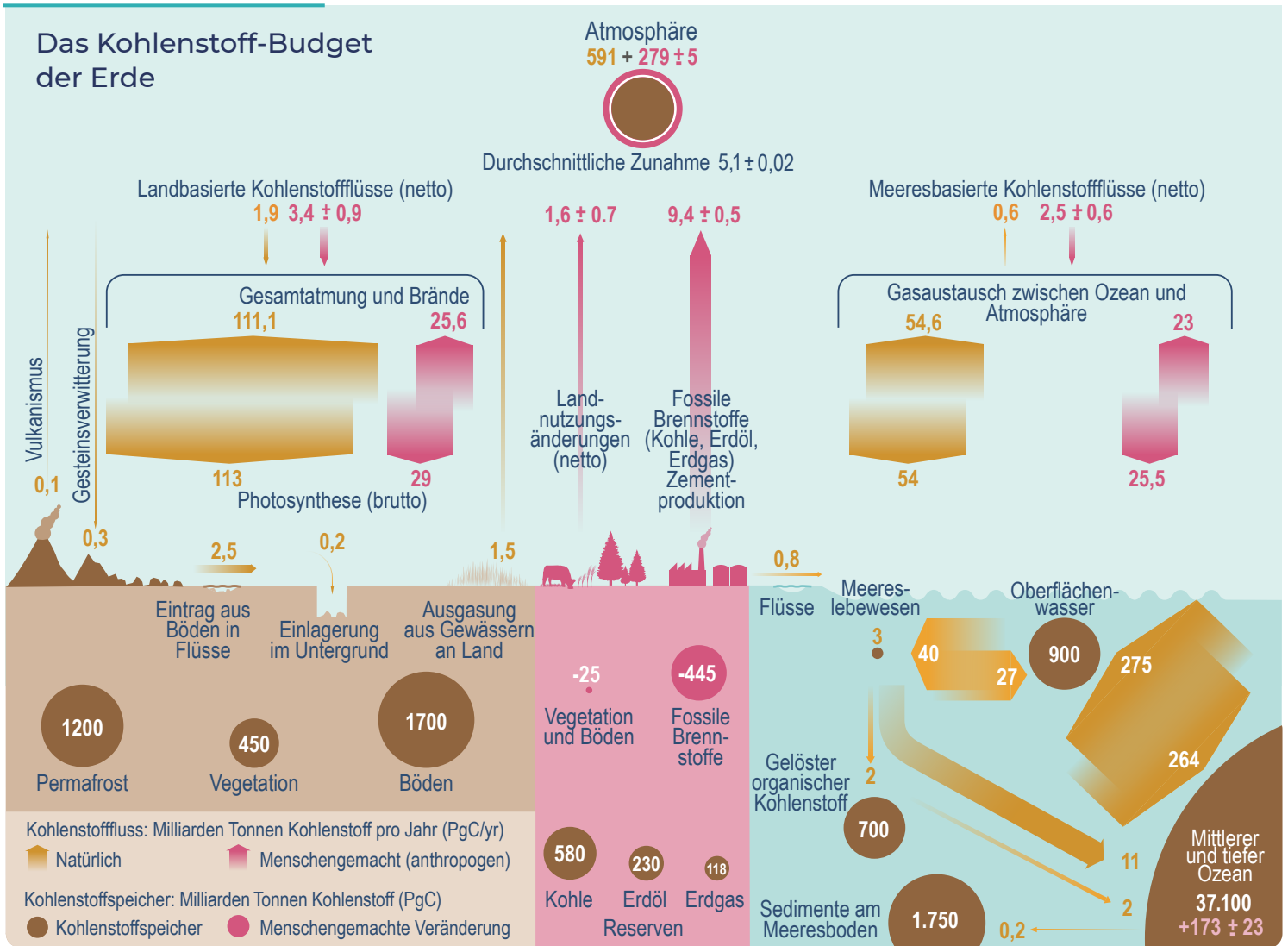
Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

zurückzuführen. Fachleute kennen mittlerweile weit mehr als eine Million verschiedene Kohlenstoffverbindungen und mit jedem Jahr kommen neue hinzu, sodass ihre Erforschung eine eigene Fachrichtung in der Chemie bildet.

Aufgrund seiner chemischen Eigenschaften und weiten Verbreitung wird Kohlenstoff zu jedem Zeitpunkt überall auf der Welt auf natürliche Weise aufgenommen oder freigesetzt, chemisch gebunden oder aber umgewandelt. Das bedeutet, Kohlenstoff ist ständig in Bewegung und wandert im Laufe der Zeit durch alle Komponenten des Erdsystems. Für jeden Schritt dieser Reise benötigt der Kohlenstoff unterschiedlich viel Zeit. Mal werden er

oder seine Verbindungen innerhalb weniger Minuten freigesetzt (Atmung, Verbrennung) oder aufgenommen (Photosynthese, Lösung im Meerwasser); mal wird er für Jahrtausende oder Jahr-millionen an einem Ort eingelagert (Permafrost; Entstehung fossiler Rohstoffe).

Die für das Klima entscheidende Kohlendioxid-Konzentration in der Erdatmosphäre wird durch verschiedene biogeochemische Prozesse an Land sowie im Meer gesteuert. Im Zuge derer wird das Treibhausgas entweder aus der Atmosphäre entnommen und eingelagert (Kohlenstoffsenken) oder aber in diese entlassen (Kohlenstoffquellen).



Grafik: nach einer Vorlage aus IPCC WGI AR6, Kapitel 5

Die globale Kohlenstoffbilanz in Zahlen:

Die orangefarbenen Pfeile stellen die jährlichen Kohlenstoffflüsse in Milliarden Tonnen Kohlenstoff dar, die mit dem natürlichen Kohlenstoffkreislauf verbunden sind und für die Zeit vor der Industrialisierung um 1750 gelten. Die rosafarbenen Pfeile mit den dazugehörigen Zahlen stellen die durchschnittlichen jährlichen von Menschen verursachten Kohlenstoffflüsse für die Zeit von 2010 bis 2019 dar. Braune Kreise mit weißen Zahlen repräsentieren die Größe der vorindustriellen Kohlenstoffspeicher in Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Die rosafarbenen Zahlen in oder an den Kreisen stehen für die vom Menschen verursachte Änderung dieser Speicher seit der Industrialisierung.

Kohlenstoffspeicher Ozean

Der Ozean enthält etwa 40.000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, wobei der größte Teil im Meerwasser gelöst ist. Mit diesem Kohlenstoff-Reservoir übertrifft der Ozean den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre um mehr als das 50-Fache. Beide Systeme stehen in einem steten Kohlenstoffaustausch. Pro Jahr wandern viele Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Form des Treibhausgases Kohlendioxid zwischen Ozean und Atmosphäre hin und her.

Weil die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre aufgrund der vom Menschen verursachten Emissionen steigt, absorbiert auch der Ozean mehr Kohlendioxid. Das heißt, im Gegensatz zur vorindustriellen Zeit nimmt er nun mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf, als er an anderer Stelle abgibt. Ein Ungleichgewicht ist entstanden. Als Folge hieraus hat der Weltozean in den zurückliegenden Jahrzehnten etwa 25 Prozent der vom Menschen verursachten Kohlendioxid-Emissionen aus der Atmosphäre aufgenommen und so die Erderwärmung maßgeblich gebremst.

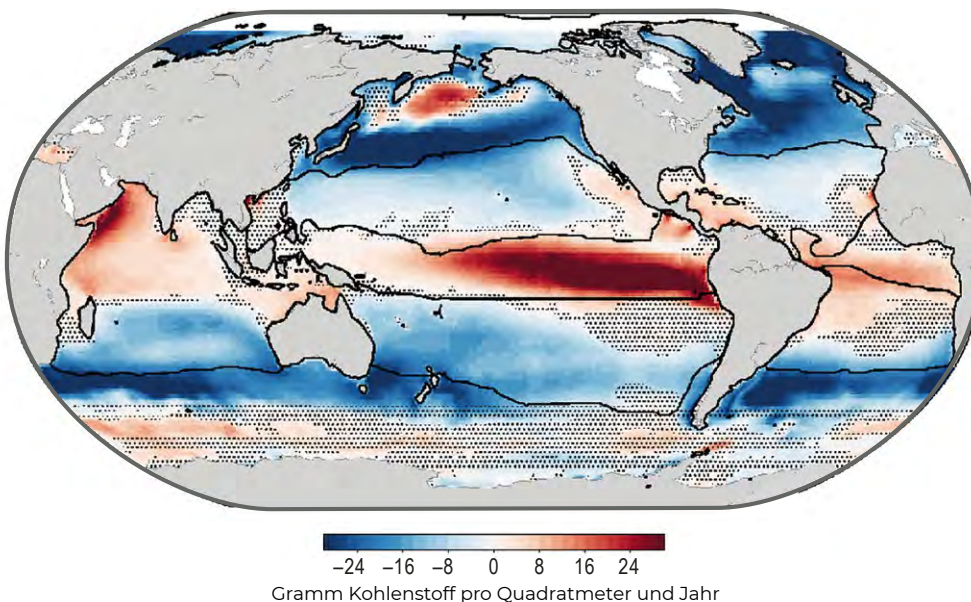
Kohlendioxid-Aufnahme an der Meeresoberfläche

Die Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans erfolgt an der Meeresoberfläche, wo sich das Kohlendioxid aus der Luft im Meerwasser löst. Ob und wie viel atmosphärisches Kohlendioxid im Wasser gelöst wird, hängt in erster Linie vom Unterschied im sogenannten Kohlendioxid-Partialdruck zwischen Meerwasser und Atmosphäre ab. Vereinfacht gesagt, handelt es sich dabei um den Druck, den das im Oberflächenwasser gelöste und das in der Atmosphäre befindliche Kohlendioxid jeweils erzeugen. Der natürliche Gasaustausch zwischen Meerwasser und Atmosphäre zielt immer auf einen Ausgleich dieser Drücke ab. Das heißt, Oberflächenwasser mit einem geringeren Kohlendioxid-Partialdruck als die darüber liegende Atmosphäre nimmt so lange Kohlendioxid aus der Luft auf, bis der Druckunterschied ausgeglichen ist. Der Druckausgleich erfolgt umgekehrt auch vom Wasser in die Atmosphäre.

Wichtig für die Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans sind zudem die Wassertemperatur sowie der Salzgehalt, Wind, Wellen und Meeresströmungen. Die Temperatur und der Salzgehalt des Oberflächenwassers beeinflussen, wie viel Gas sich im Wasser lösen kann – je wärmer und salziger das Wasser ist oder wird, desto weniger Kohlendioxid kann es aufnehmen oder speichern und desto eher gibt es auch Kohlendioxid an die Atmosphäre ab. Dieses physikalische Gesetz erklärt unter anderem, warum der Weltozean im warmen, äquatorialen Teil des Pazifiks Kohlendioxid an die Atmosphäre abgibt, während er im kühlen Nordatlantik große Mengen Kohlendioxid aufnimmt.

Wind und Wellen wiederum durchmischen das Oberflächenwasser und garantieren somit einen Kohlendioxid-Konzentrationsausgleich innerhalb der obersten Wasserschicht. Die Meeresströmungen halten die Wassermassen in Bewegung und sorgen dafür, dass zum Beispiel in sogenannten Auftriebszonen immer wieder neues Tiefenwasser an die Meeresoberfläche gelangt und mit der Atmosphäre in den Gasaustausch treten kann.

Netto Kohlendioxid-Fluss zwischen Atmosphäre und Meer im Zeitraum von 1994 bis 2007



Nicht überall auf der Welt nimmt der Ozean gleich viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf. Diese Karte zeigt, dass die Kohlendioxid-Aufnahme vor allem im kalten Südozean sowie im Nordatlantik und Nordpazifik erfolgt (blaue Färbung). In den warmen tropischen Meeresgebieten hingegen gibt der Ozean deutlich mehr Kohlendioxid an die Atmosphäre ab als er aufnimmt (rote Färbung). In den gepunktet dargestellten Gebieten ist die Lage nicht eindeutig.

Grafik: IPCC WGI AR6, Kapitel 5

Eine chemische Gleichgewichtsreaktion

Steigt die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre, führt das zumeist innerhalb weniger Monate zu einem Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration im Oberflächenwasser.

Sowie sich Kohlendioxid im Meerwasser löst, kommt es zu einer chemischen Veränderung des Oberflächenwassers, denn anders als viele andere Gase wie z.B. Sauerstoff, löst sich Kohlendioxid nicht einfach nur im Meer. Eine Teilmenge des Gases reagiert mit den Wassermolekülen und bildet Kohlensäure. Deren Moleküle wiederum spalten sich bis auf ganz wenige Ausnahmen sofort auf: in Hydrogenkarbonat und ein Wasserstoffkation, welches auch als Proton bezeichnet wird. Spaltet das entstandene Hydrogenkarbonat ein weiteres Proton ab, entsteht Karbonat.

Das Oberflächenwasser enthält dann Kohlenstoff in drei unterschiedlichen gelösten Formen:

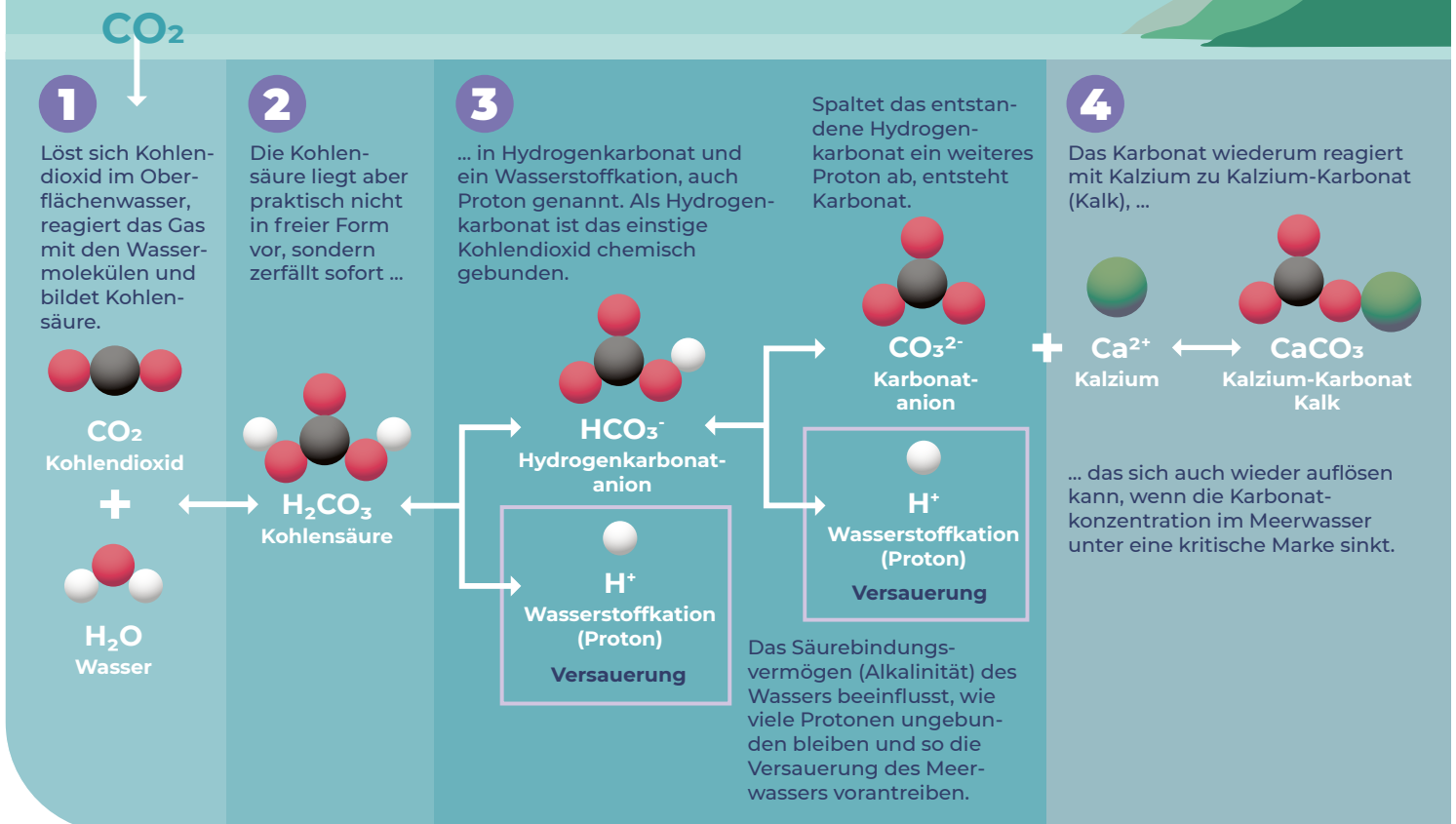
- > als Kohlendioxid (CO_2), welches auch wieder in die Atmosphäre entweichen kann. Es macht nur rund ein Prozent des im Ozean gespeicherten Kohlenstoffs aus, bestimmt aber den Kohlendioxid-Partialdruck des Meerwassers;
- > als Hydrogenkarbonat, welches etwa 90 Prozent des im Ozean gespeicherten Kohlenstoffs ausmacht;

> als Karbonat, zu dem man wissen muss, dass es nicht nur im Zuge der Kohlensäure-Kettenreaktion entsteht, sondern auch durch Gesteins- und Mineralverwitterung an Land freigesetzt wird (doch dazu später mehr).

Alle drei Parameter stehen in einem ausbalancierten Konzentrationsgleichgewicht zueinander, was bedeutet, dass Veränderungen eines Parameters sofort zu Ausgleichreaktionen bei den zwei anderen führen.

Ein wichtiges Beispiel: Wenn Wasser und gelöstes Kohlendioxid zu Kohlensäure reagieren, entsteht daraus Hydrogenkarbonat. Dabei sinkt der Anteil des gelösten Kohlendioxids im Meerwasser und somit dessen Kohlendioxid-Partialdruck. Als Reaktion darauf nimmt der Ozean wieder neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf, um den Partialdruck zwischen Meer und Atmosphäre auszugleichen. Die chemische Reaktionskette beginnt von vorn. Dieser Prozess kann sich jedoch nicht endlos wiederholen. Durch die Kohlendioxid-Aufnahme verschiebt sich nämlich das Konzentrationsgleichgewicht zwischen gelöstem Kohlendioxid, Kohlensäure, Hydrogenkarbonat und Karbonat derart, dass die Kohlendioxid-Aufnahme des Oberflächenwassers langfristig zum Erliegen kommt, wenn nicht andere neue Prozesse das Gleichgewicht wieder stören oder verschieben.

Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres – eine chemische Gleichgewichtsreaktion



Ozeanversauerung: Eine Frage der freien Protonen

Die bei der Kohlensäure-Aufspaltung freigesetzten Protonen treiben den Säuregehalt des Wassers in die Höhe. Nimmt der Ozean viel zusätzliches Kohlendioxid auf, läuft das Meer deshalb Gefahr zu versauern, was zur Folge hat, dass sich die Lebensbedingungen für viele Meeresorganismen verschlechtern. Wie viele Protonen jedoch tatsächlich bei der Kohlensäure-Aufspaltung freigesetzt werden, hängt vom Säurebindungsvermögen des Meerwassers ab. Dieses wird durch mineralische Bestandteile (abermals Karbonate) im Wasser bestimmt, die ihren Ursprung vor allem an Land haben. Dort wurden sie über Jahrmillionen aus verwittertem Gestein gelöst und anschließend durch Regenwasser, Bäche und Flüsse in das Meer geschwemmt.

Ist der Anteil dieser eingetragenen Minerale hoch, besitzt das Meerwasser ein hohes Säurebindungsvermögen. Expert:innen sprechen von einer hohen Alkalinität des Wassers. In diesem Fall wird eine Vielzahl der Protonen gar nicht erst freigesetzt, sondern bei der Kohlensäure-Aufspaltung sofort durch die eingetragenen Minerale gebunden. Auch bei dieser Reaktion entsteht Hydrogenkarbonat, während Karbonat abgebaut und die Versauerung des Wassers abgepuffert wird. Enthält das Wasser jedoch nur wenige Karbonate, ist das Säurebindungsvermögen begrenzt. Die Zahl der freien Protonen steigt und das Meer versauert zunehmend.

Über einen Zeitraum von Jahrmillionen betrachtet, gleicht der Kohlenstoffkreislauf der Erde den Kohlendioxidgehalt des Meeres über den Eintrag verwitterter Minerale immer wieder aus. Steigt zum Beispiel die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre und im Meer, führt die Erwärmung beider Systeme langfristig dazu, dass mehr Gestein verwittert – sowohl an Land als auch am Meeresboden. Daraus folgt, dass größere Mineralmengen in das Meer eingetragen werden, diese den Säuregehalt des Wassers reduzieren und der Ozean wieder neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt, um das angesprochene Konzentrationsgleichgewicht wiederherzustellen. Gleichzeitig sinkt die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre und die Erwärmung verlangsamt sich.

Die Idee von einer beschleunigten Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres

Dieser Prozess verläuft normalerweise über sehr lange Zeiträume. Angesichts der dramatischen Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels aber erforschen Wissenschaftler:innen nun, ob er sich beschleunigen ließe, beispielsweise durch den gezielten Eintrag vieler Tonnen mineralhaltigen Gesteinsmehls (verstärkte Alkalinisierung). Die Absicht dahinter ist, die Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres verstärken zu können. Gelänge ein solcher Eingriff, könnten dadurch nicht vermeidbare Kohlendioxid-Rest-Emissionen des Menschen ausgeglichen werden.

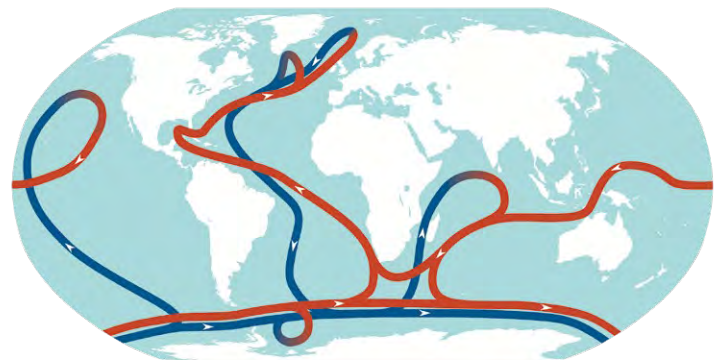
Die drei Kohlenstoffpumpen des Meeres

Sowie die chemische Gleichgewichtsreaktion im Oberflächenwasser beendet ist und Kohlenstoff in seinen drei gelösten Formen Kohlendioxid, Hydrogenkarbonat und Karbonat vorliegt, tritt er seine Reise durch den Kohlenstoffkreislauf des Meeres an. Diese Reise kann auf drei unterschiedlichen Wegen erfolgen, die allesamt als Kohlenstoffpumpen bezeichnet werden, sich aber in ihren grundlegenden Mechanismen deutlich unterscheiden. Expert:innen sprechen daher von einer ›physikalischen‹ Kohlenstoffpumpe sowie von zwei biologischen Kohlenstoffpumpen des Ozeans – einer ›organischen‹ und einer ›anorganischen‹ Pumpe.

Die physikalische Kohlenstoffpumpe

Die physikalische Kohlenstoffpumpe wird von den Meeresströmungen und deren Unterschieden in Temperatur und Salzgehalt angetrieben und verteilt den gelösten Kohlenstoff (Kohlendioxid, Hydrogenkarbonat, Karbonat) durch das Absinken oder aber Aufsteigen von Wassermassen im Ozean. Sie ist hauptverantwortlich für den Transport menschengemachter Kohlendioxid-Emissionen in den tiefen Ozean.

Um absinken zu können, müssen Wassermassen abkühlen, damit sie dichter und schwerer werden. Diesen Prozess beobachtet man vor allem in den Polarregionen, wo bei niedrigen Temperaturen die Löslichkeit von Kohlendioxid im Wasser besonders hoch und das Oberflächenwasser entsprechend kohlenstoffreich ist. Je kälter und salzhaltiger das Wasser ist, desto tiefer sinkt es und nimmt den gelösten Kohlenstoff mit in die Tiefe. Von dort aus wandern die Wassermassen anschließend auf dem globalen Förderband der Meereszirkulation um den ganzen Erdball.



Die weltweiten ozeanischen Strömungen von warmem Oberflächenwasser (rot) und kaltem Tiefenwasser (blau) bilden das globale Förderband der thermohalinen Meereszirkulation.

Grafik: Robert Simmon, NASA, CC BY-SA 3.0

Bis dieses kohlenstoffreiche Tiefenwasser wieder an die Meeresoberfläche zurückkehrt und erneut in den Gasaustausch mit der Atmosphäre eintreten kann, vergehen Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Eines Tages aber steigen die Wassermassen wieder auf – meist in einem der sogenannten küstennahen Auftriebsgebiete entlang der Westküsten Afrikas, Süd- und Nordamerikas oder aber entlang des Äquators, hier vor allem im Pazifischen Ozean. An der Meeresoberfläche angekommen, erwärmt sich das Wasser und gibt einen Teil seines gelösten Kohlendioxids wieder als Gas an die Atmosphäre ab.

Während die lange Wanderung des kohlenstoffreichen Wassers durch den tiefen Ozean aus Emissionssicht sehr erstrebenswert ist, bringt sie doch einen entscheidenden Nachteil mit sich: Sollten die Wassermassen an der Meeresoberfläche versauern – eine Entwicklung, die derzeit weltweit zu beobachten ist – so führt ihre lange Zirkulation in großer Tiefe dazu, dass diese Versauerung auf menschlichen Zeitskalen betrachtet, unumkehrbar ist.

Die Sonderrollen der Küsten, Schelfe, Meereswiesen und -wälder

An den Küsten und auf den kontinentalen Schelfen (0 – 200 Meter Wassertiefe) wird ein großer Teil der Planktonbiomasse nicht in der Wassersäule abgebaut, sondern sinkt bis zum Meeresboden ab. Dort wird die Biomasse zum Teil im Sediment eingebettet. Die Schelfsedimente sind dabei viel größere Kohlenstoffspeicher als die Tiefseesedimente. Mehr als 90 Prozent der permanenten Kohlenstoff-Einbettung findet in Schelfsedimenten statt. Aus der Biomasse in diesen Sedimenten entstehen dann auf geologischen Zeitskalen Erdöl und Erdgas. Ein großer Teil der menschlichen Treibhausgas-Emissionen entsteht also dadurch, dass wir den dort vor langer Zeit als Öl und Gas gebundenen Kohlenstoff fördern, verbrennen und als Kohlendioxid in die Atmosphäre freisetzen.

Eine weitere Sonderrolle im Kohlenstoffkreislauf des Meeres spielen vegetationsreiche Küstenökosysteme wie Salzmarschen, Seegraswiesen und Mangrovenwälder. Sie wachsen auf weniger als ein Prozent der Meeresfläche, sind aber für einen signifikanten Teil der natürlichen Kohlenstoffeinlagerung im Meeresboden verantwortlich und somit Schlüsselakteure im Kohlenstoffkreislauf der Erde.

Ihre Pflanzengemeinschaften gedeihen im Gezeiten- und Flachwasserbereich und nehmen Kohlendioxid sowohl aus dem Oberflächenwasser als auch aus der Luft auf. Anschließend lagern sie den durch Photosynthese gebundenen Kohlenstoff überwiegend im Untergrund ein – zum einem in ihrem dichten Wurzelwerk, zum anderen über abgestorbenes Pflanzenmaterial (Laub, Totholz etc.) direkt im Küstensediment.

Da die Meereswiesen und -wälder gleichzeitig viele Schwebstoffe aus dem Wasser filtern und diese Partikel zwischen ihren Halmen und Wurzeln ablagern, wachsen die Pflanzengemeinschaften stetig in die Höhe. Durch den Partikelregen wird zudem viel angeschwemmtes Tier- und Pflanzenmaterial im Meeresboden eingeschlossen. Beide Prozesse führen dazu, dass die Salzmarschen, Mangroven und Seegraswiesen große Kohlenstoffmengen unter sich anhäufen. Diese Lagerstätten sind mitunter mehr als zehn Meter dick und wachsen, solange die Ökosysteme gesund sind. Im Idealfall bleiben sie über viele Jahrhunderte, mitunter sogar Jahrtausende erhalten.



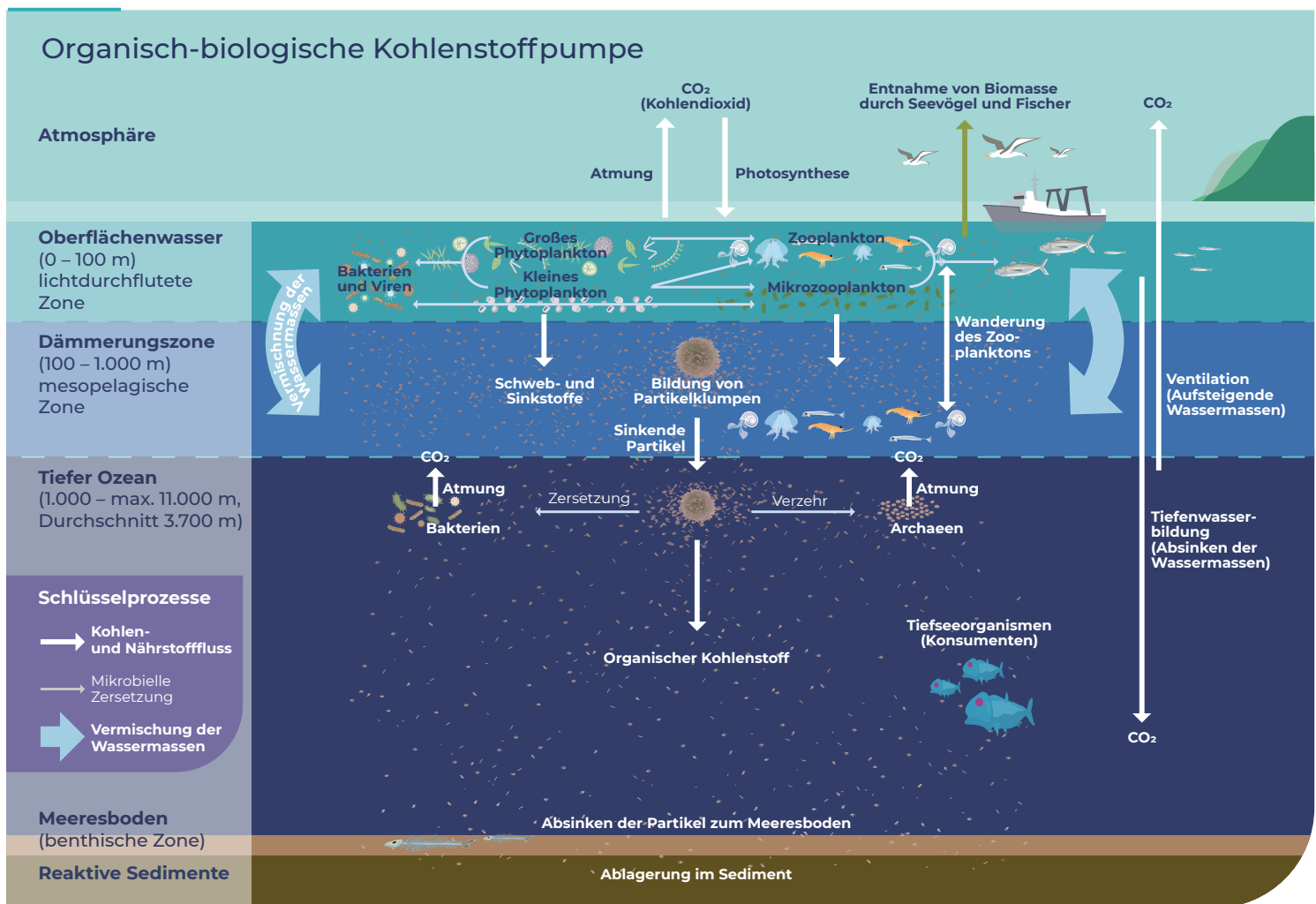
Die organisch-biologische Kohlenstoffpumpe

Die organisch-biologische Kohlenstoffpumpe wird durch die Lebensgemeinschaften im Oberflächenwasser des Ozeans angetrieben. Dort betreiben einzellige Algen (Phytoplankton), Makroalgen und Seegräser Photosynthese. Das heißt, sie nutzen die Energie der Sonne, um Biomasse aufzubauen. Dafür benötigen sie als Baustoff Kohlendioxid, welches sie zum Großteil in gelöster Form (überwiegend als Kohlendioxid) dem Oberflächenwasser entnehmen. Den darin enthaltenen Kohlenstoff bauen sie in ihre Biomasse ein.

Werden die Algen oder Seegräser gefressen, nehmen die Konsumenten den darin enthaltenen Kohlenstoff automatisch mit auf. Einen Teil veratmen sie: Das heißt, der Kohlenstoff wird in Form von Kohlendioxid wieder an das Meer abgegeben. Die Restmenge wird zum Beispiel in Form von Muskelmasse oder Körperfett eingelagert und ein Teil als Kotballen ausgeschieden. Den Naturgesetzen des Meeres folgend, wandert der Kohlenstoff so

unter Umständen durch das gesamte Nahrungsnetz des Ozeans: von den Kleinkrebsen, über verschiedene Fischarten bis hin zu Meeressäugern wie Walen und Robben – und bei jedem Schritt wird Kohlenstoff veratmet, in Biomasse umgewandelt oder in Form von Kot abgegeben.

Die Pflanzen und Algen aber können auch direkt absterben. In diesem Fall sinken sie gemeinsam mit den Kotballen und den sterblichen Überresten ihrer Konsumenten in die Tiefe. Auf dem Weg Richtung Meeresboden stürzen sich Bakterien und andere Mikroorganismen auf die abgestorbene Biomasse und zersetzen einen großen Teil noch bevor das Material große Wassertiefen oder den Meeresboden erreicht hat. Dabei wird der gespeicherte Kohlenstoff abermals in Form von Kohlendioxid an das Meerwasser abgegeben. Die verbleibenden Überreste rieseln als sogenannter »Meeresschnee« in die Tiefsee.



Als organisch-biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres werden jene Prozesse bezeichnet, bei denen Algen und Pflanzen Kohlendioxid aus dem lichtdurchfluteten Oberflächenwasser aufnehmen und in Biomasse umwandeln. Diese Biomasse tritt im Anschluss eine Reise Richtung Meeresboden an. Entscheidend für die globale Emissionsbilanz und den weiteren Verlauf des Klimawandels ist dabei, wie viel der Biomasse in Wasserschichten unterhalb der von Wind und Wellen durchmischten Deckschicht sinkt. Im Zwischen- und Tiefenwasser sind nämlich sowohl das organische Material als auch der in ihm enthaltene Kohlenstoff für Jahrzehnte bis Jahrhunderte eingeschlossen – ganz ungeachtet dessen, ob die Biomasse gefressen und veratmet wird oder weiter Richtung Meeresboden sinkt.

Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR nach einer Vorlage des Office of Biological and Environmental Research of the U.S. Department of Energy Office of Science.

Am tiefen Meeresboden angekommen, werden die kohlenstoffhaltigen Partikel, ob Einzeller, Kotpartikel oder Walkadaver, nahezu vollständig von den Tiefseebewohnern verzehrt. Übrig bleibt eine Restmenge von deutlich weniger als einem Prozent des ursprünglich von den Algen aufgenommenen Kohlenstoffs. Stammt der Kohlenstoff aus anderen Quellen (Holz, Walknochen etc.) kann der Anteil höher sein. Die Restmengen werden im Sediment eingelagert und der enthaltene Kohlenstoff dem natürlichen Kreislauf auf diese Weise für sehr lange Zeit entzogen.

Die Einlagerung im Sediment ist eine entscheidende Größe, wenn man den Kohlenstoffkreislauf über geologische Zeiträume betrachtet, das heißt über Jahrtausende. Für die aktuelle Entwicklung des Klimawandels ist jedoch schon entscheidend, wie viel des von Algen und Pflanzen gebundenen Kohlenstoffs in

Wasserschichten unterhalb der sogenannten durchmischten Deckschicht sinkt. Als solche wird jene Wasserschicht an der Meeresoberfläche bezeichnet, deren Wassermassen regelmäßig von Wind und Wellen durchmischt werden.

Haben kohlenstoffhaltige Partikel die Deckschicht erst einmal verlassen, vergehen Jahrzehnte oder Jahrhunderte, bis sie oder ihre veratmeten Restprodukte wieder an die Meeresoberfläche zurückkehren und erneut als Kohlendioxid in die Atmosphäre entweichen können. Die Wissenschaft bezeichnet daher allen Kohlenstoff als sequestriert (aufgenommen und gespeichert), den die biologisch-organische Kohlenstoffpumpe in Tiefen verfrachtet, die nicht mehr von Wind und Wellen durchmischt werden.

Die anorganisch-biologische Kohlenstoffpumpe

Neben der Photosynthese gibt es einen zweiten Prozess, mit dem Meeresorganismen im Wasser gelösten Kohlenstoff biologisch binden und am Ende in die Tiefe transportieren – gemeint ist der Aufbau kalkhaltiger Schalen oder Skelette.

Kalkbildende Organismen wie Kalkalgen, Muscheln, Korallen, Flügelschnecken oder aber auch Kammerlinge entnehmen dem Meerwasser dazu das in gelöster Form vorliegende Hydrogenkarbonat, wandeln es in Kalziumkarbonat um und verwenden dieses als Baustoff für die genannten Strukturen. Sterben die Organismen ab, sinken die Kalkgehäuse auf den Meeresboden und werden dort im Sediment eingelagert.

Auf diese Weise wird der enthaltene Kohlenstoff dem natürlichen Kreislauf für Jahrtausende entzogen. Allerdings ist die

anorganisch-biologische Kohlenstoffpumpe wenig hilfreich, wenn es darum geht, die Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans zu verstärken. In der Summe fällt ihre Kohlendioxid-Bilanz in Bezug auf die Atmosphäre nämlich negativ aus. Die Erklärung dafür ist, dass bei der Kalkbildung dem Wasser Hydrogenkarbonat entnommen wird. Als ein Produkt der entsprechenden chemischen Reaktion entsteht im Wasser gelöstes Kohlendioxid. Dieses wiederum erhöht den Kohlendioxid-Partialdruck des Meeres und fördert auf diese Weise die Ausgasung von Kohlendioxid in die Atmosphäre. Löst sich Kalk dagegen auf – was unter bestimmten chemischen Bedingungen im Meer durchaus geschieht – wird Kohlensäure verbraucht und das Meerwasser neigt dazu, mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen.

Forschungsmission CDRmare: Wie lässt sich die Kohlenstoffaufnahme des Ozeans verstärken?

Selbst bei ambitionierter Klimapolitik und maximalen Anstrengungen, die menschengemachten Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren, wird Deutschland optimistischen Prognosen zufolge in drei Jahrzehnten voraussichtlich noch immer 10 bis 20 Prozent der aktuellen Emissionen freisetzen und die Erderwärmung weiter vorantreiben. Ein möglicher Ausweg: Ein Ausgleich dieser schwer vermeidbaren Rest-Emissionen durch eine gezielte Kohlendioxid-Entnahme und -Speicherung.

In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen, ob und in welchem Umfang der Ozean und seine Küstenökosysteme eine wesentliche Rolle bei der Entnahme

und Speicherung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre spielen können. Die Forschenden überprüfen dabei nicht nur die technische Machbarkeit verschiedener Ansätze und Verfahren, sondern untersuchen auch die Wechselbeziehungen mit und die Auswirkungen auf die Meeresumwelt, das Erdsystem sowie auf den Menschen und die Gesellschaft.

Gleichzeitig entwickeln sie Methoden, mit denen sich die marine Kohlenstoffspeicherung überwachen, bilanzieren und auf bestimmte Maßnahmen zurückführen lässt – all das vor dem Hintergrund einer Meeresumwelt, die sich aufgrund des menschengemachten Klimawandels schon heute grundlegend verändert.

Verstärkte Kohlenstoffspeicherung 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.

Mit den Werkzeugen der Natur: Vegetationsreiche Küstenökosysteme als Kohlenstoffspeicher

Bei der Suche nach Wegen, die Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans zu verstärken, fällt der Blick zunächst auf unsere Küstenlebensräume – wichtige Schlüsselakteure im Kohlenstoffkreislauf des Meeres. Hierzu gehören vor allem vegetationsreiche Ökosysteme im Gezeiten- und Flachwasserbereich (bis 40 Meter Wassertiefe) wie Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und

Tang- oder Kelpwälder. Ihre Verbreitungsgebiete machen zusammen genommen weniger als ein Prozent der weltweiten Meeresfläche aus, die Gezeitenzone mit eingeschlossen. Gemeinsam sind die Wiesen und Wälder des Meeres jedoch für einen signifikanten Teil des im Meeresboden eingelagerten Kohlenstoffs verantwortlich.



Mangroven-Wald (*Rhizophora*) an der Küste der kolumbianischen Halbinsel Barú.

Foto: Carolina Hortúa Romero

Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder gelten als hochproduktive Ökosysteme und Kohlenstoffsinken. Im Zuge ihrer Photosynthese nehmen sie Kohlendioxid aus der Atmosphäre und aus dem Meerwasser auf und binden den darin enthaltenen Kohlenstoff.

Da die Pflanzengemeinschaften in Mangrovenwäldern, Seegraswiesen und Salzmarschen allesamt Wurzeln bilden und auf sandigem oder schlammigem Untergrund wachsen, sind sie in der Lage, einen Großteil des gebundenen Kohlenstoffs im Untergrund einzulagern – zum einen als lebende Biomasse im eigenen Wurzelwerk; zum anderen in Form eigener abgestorbener Pflanzenteile, die zu Boden sinken und im Küstensediment eingeschlossen werden. Hinzu kommt, dass die Meereswiesen und -wälder viele Schwebstoffe aus dem Wasser filtern und die Partikel sowie abgestorbenes Tier- und Pflanzenmaterial zwischen ihren Halmen und Wurzeln ablagern. Durch diesen steten Partikelregen wachsen die Pflanzengemeinschaften langsam in die Höhe.

Es wird jedoch nicht nur lokales Pflanzenmaterial eingelagert, sondern auch Pflanzenreste, die von Land eingetragen oder aus anderen Meeresgebieten angeschwemmt wurden. Sobald das organische Material im Untergrund eingeschlossen ist, wird es konserviert, denn das Küstensediment ist sauerstoffarm und salz-

haltig. Mikroben fehlt somit der Sauerstoff, um das organische Material zeitnah zu zersetzen.

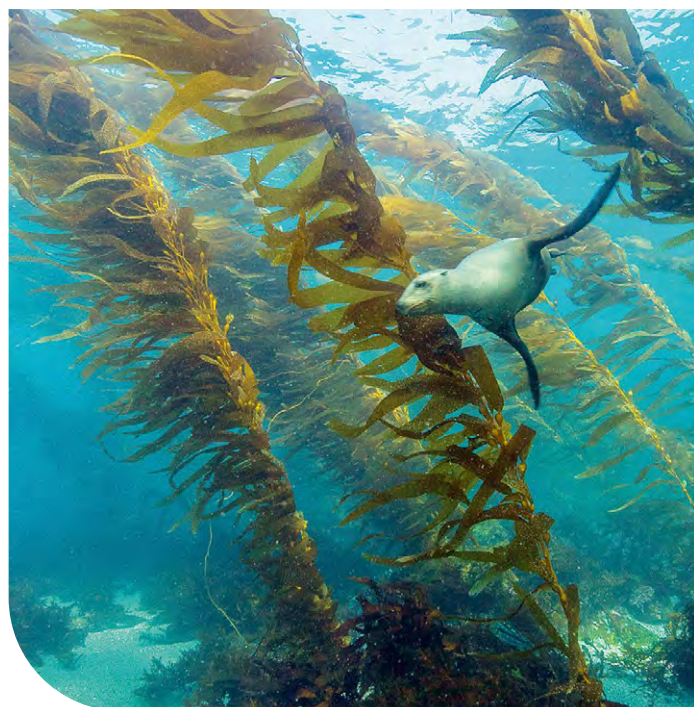
Sowohl die Kohlenstoffeinlagerung im Wurzelwerk als auch das luftdichte Einschließen von Tier- und Pflanzenresten führen dazu, dass die Salzmarschen, Mangrovenwälder und Seegraswiesen mit der Zeit immer mehr organisches Material unter sich anhäufen. Diese Kohlenstofflagerstätten sind unter Umständen mehr als 10 Meter dick und wachsen, solange die Ökosysteme gedeihen. Im Idealfall bleiben sie über viele Jahrhunderte, mitunter sogar Jahrtausende erhalten. Salzmarschen, Mangrovenwälder und Seegraswiesen sind zudem um ein Vielfaches effizienter in der Kohlenstoffaufnahme und -speicherung als Wälder an Land. Im Vergleich zu tropischen Regenwäldern beispielsweise speichern sie pro Fläche und je nach Standort mitunter die fünf- bis 30-Fache Menge Kohlenstoff.

Tangwälder, also Wälder aus Braunalgen, können hingegen den von ihnen gebundenen Kohlenstoff nicht direkt im Untergrund einlagern, denn Braunalgen besitzen keine Wurzeln und wachsen auf felsigem Untergrund. Stattdessen wird loses oder abgestorbenes Algenmaterial von den Meeresströmungen verfrachtet. Es wird an die Küsten gespült oder aber sinkt in die Tiefe, wo ein Teil dann im Meeresboden-Sediment eingelagert wird.

Kohlenstoffsenke, Küstenschutz, Kinderstube: Die vielen Leistungen der Küstenökosysteme

Expert:innen bezeichnen den durch Seegraswiesen, Salzmarschen, Mangroven- und Tangwälder gebundenen Kohlenstoff auch als blauen Kohlenstoff (englisch: blue carbon). Von gesunden vegetationsreichen Küstenökosystemen aber profitiert der Mensch nicht nur allein, weil sie der Atmosphäre Kohlendioxid entnehmen. Als sogenannte Ökosystem-Ingenieure bilden die Küstenökosysteme einen dreidimensional strukturierten Lebensraum, in dem zahlreiche andere

Tier- und Pflanzenarten des Meeres und Küstenraumes ausreichend Schutz und Nahrung finden. Berichten zufolge bieten zum Beispiel 4000 Quadratmeter Seegraswiese Rückzugsorte und Nahrung für etwa 40.000 Fische und rund 50 Millionen wirbellose Tiere wie Hummer, Muscheln und Garnelen. In ihrem Halmendickicht wächst zudem der Nachwuchs beliebter Speisefische heran, darunter Arten wie der Pazifische Hering und der Atlantische Kabeljau.



Doch damit nicht genug: Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder produzieren Sauerstoff. Sie filtern Krankheitserreger, Schweb-, Schmutz- und Schadstoffe aus dem Wasser, bremsen Meeresströmungen, Wellen und Sturmfluten aus und schützen die Küsten so vor Erosion und durch die Anhäufung von Sediment vor einem steigenden Meeresspiegel. Gleichzeitig liefern sie verlässlich Nahrung (Fisch, Muscheln, Krebse), tragen zur Erholung und Gesundheit der Menschen bei und ziehen vielerorts Touristen an, wodurch zusätzliche Arbeitsplätze und Einnahmequellen für die Küstenbevölkerung entstehen. Gesunde vegetationsreiche Küstenökosysteme helfen den Küstenbewohnern somit, sich bestmöglich an den Klimawandel anzupassen.

Investitionen in die Wiederherstellung und die Erweiterung bestehender Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder haben demzufolge einen Mehrfachnutzen. Sie tragen dazu bei, die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre zu reduzieren (Minderung des Klimawandels), stärken bei richtiger Herangehensweise die Biodiversität und helfen, die Klimarisiken (Klimaanpassung) zu minimieren.

Ein Seelöwe im Tangwald Foto: Brett Seymour, National Park Service

Das Sterben der Küstenökosysteme

Trotz und auch wegen ihrer wichtigen Ökosystemleistungen schrumpft die Fläche vegetationsreicher Küstenökosysteme weltweit. Verantwortlich ist abermals der Mensch. Infolge von Klimawandel, Küstenentwicklung und -verbau, Land- und Aquakulturwirtschaft, Meeresverschmutzung, Überfischung und

anderweitiger intensiver Nutzung sind in den zurückliegenden 100 Jahren 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.



MANGROVENWÄLDER

Geschätzte Fläche weltweit **147 359 km²**
Das entspricht etwa 47,5 Prozent der Fläche Deutschlands.

Lebensraum **Gezeitenbereich**

Jährlich eingelagerte Kohlenstoffmenge pro Hektar **560 kg – 11 t**

Restaurationspotenzial **groß**

Hauptgefahren und Stressfaktoren **Abholzung, Meeresverschmutzung, Küstenverbauung, Extremwetter, Meeresspiegelanstieg**

CDRmare-Feldforschung in **Kolumbien & Malaysia**

VERLUSTRATE
35 bis 50 % der Ursprungsfläche



SALZMARSCHEN

Geschätzte Fläche weltweit **60 000 km²**
Das entspricht etwa 16,8 Prozent der Fläche Deutschlands.

Lebensraum **Gezeitenbereich**

Jährlich eingelagerte Kohlenstoffmenge pro Hektar **28 kg – 17 t**

Restaurationspotenzial **groß**

Hauptgefahren und Stressfaktoren **veränderte Landnutzung (Landwirtschaft, Bebauung), Meeresspiegelanstieg, eingeschleppte Arten, Verschmutzung**

CDRmare-Feldforschung in der **deutschen Nord- & Ostsee, Kolumbien & Malaysia**

VERLUSTRATE
25 bis 50 % der Ursprungsfläche
Industrieländer: bis zu 60 % seit den 1980ern



TANGWÄLDER

Geschätzte Fläche weltweit **1,47 Mio. km²**
Das entspricht mehr als der 4-fachen Fläche Deutschlands.

Lebensraum **Flachwasserbereich von Felsküsten**

Jährlich eingelagerte Kohlenstoffmenge pro Hektar **keine Angabe / Etwa 11 % der jährlichen Biomasseproduktion werden in tiefen Wasserschichten oder aber am Meeresboden eingelagert**

Restaurationspotenzial **gering, wenn zu viele Weidegänger (Seeigel etc.) vor Ort sind; bisherige Restaurationsprojekte sind kleinskalig**

Hauptgefahren und Stressfaktoren **Meereserwärmung, marine Hitzewellen, Überfischung, Meeresverschmutzung, Überweidung durch Seeigel und Fische, Entnahme der Braunalgen durch den Menschen, extreme Stürme**

CDRmare-Feldforschung in der **deutschen Nordsee (Tange) & Mexikanischen Karibik (Sargassum)**

VERLUSTRATE
40 bis 60 % der Tangwälder verzeichnen Verluste



SEEGRASWIESEN

Geschätzte Fläche weltweit **rund 317 000 km²**
Das entspricht etwa 89 Prozent der Fläche Deutschlands.

Lebensraum **Flachwasserbereich sandiger, geschützter Meeresbuchten**

Jährlich eingelagerte Kohlenstoffmenge pro Hektar **25 kg – 1 t**

Restaurationspotenzial **mittel**

Hauptgefahren und Stressfaktoren **Meeresspiegelanstieg, Küstenbebauung, steigende Luft- und Wassertemperaturen, Überdüngung, Grundnetzfisherei, Überfischung, Bootsverkehr, insbesondere Ankerungen, extreme Stürme**

CDRmare-Feldforschung in der **deutschen Nord- & Ostsee, Kolumbien & Malaysia**

VERLUSTRATE
Rund 29 % der Ursprungsfläche im Zeitraum 1879 – 2006

Schützen, wiederherstellen, erweitern: Strategien zur Steigerung der Kohlendioxid-Entnahme durch die Wälder und Wiesen des Meeres

Es gibt allerdings auch gute Nachrichten: Geschädigte oder verloren gegangene Küstenökosysteme lassen sich zum Teil wiederherstellen, wie Restaurationsprojekte aus vielen Teilen der Welt belegen. Ihr Beitrag zu einer verstärkten Kohlendioxid-Entnahme des Meeres könnte jedoch noch gesteigert werden, wenn die hochproduktiven Küstenlebensräume nicht nur geschützt und wiederhergestellt, sondern über ihre kürzlich verlorenen Flächen hinaus aufgeforstet oder aber erweitert werden. Dazu müsste der

Mensch Mangrovenwälder, Seegraswiesen, Tangwälder und Salzmarschen auch in Gebieten neu anlegen, in denen sie bislang auf natürliche Weise nicht vorkommen und auch in der Vergangenheit möglicherweise nie vorgekommen sind. Außerdem müssten Pflanzenarten ausgewählt und zusammengestellt werden, die als Artengemeinschaft die gewünschten Ökosystemleistungen am effizientesten erfüllen würden.

Küstenökosysteme als Kohlenstoffspeicher

Kosten:

Unsere Schätzungen reichen von **1 bis 60 US-Dollar pro Tonne CO₂ für Mangrovenwälder** und **100 bis 1000 US-Dollar pro Tonne CO₂ für Salz- und Seegraswiesen**.

Skalierbarkeit:

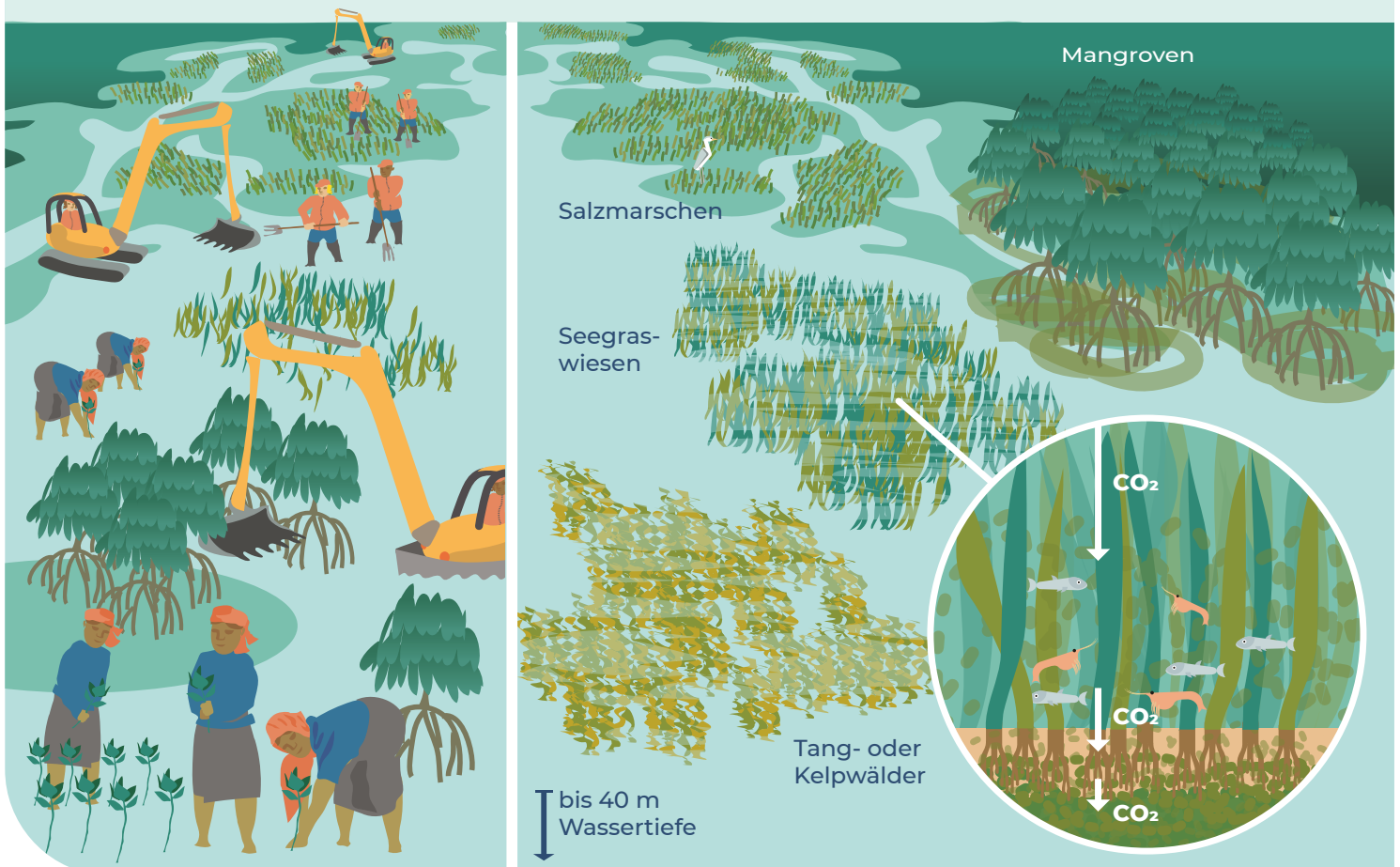
Ein **flächendeckender Ausbau vegetationsreicher Küstenökosysteme ist theoretisch möglich**. Wie viele Flächen zur Verfügung stünden, ist Gegenstand der CDRmare-Forschung. Wichtig: Küstenbevölkerung und Gesellschaft müssen einer Erweiterung zustimmen.



Dauer der Kohlenstoff-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**.



Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

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.

Expert:innen bezeichnen diesen Ansatz als Ökosystem-Design. Mit ihm, so die Annahme, ließen sich drei Ziele gleichzeitig erreichen:

- > Die Kohlendioxid-Aufnahme vegetationsreicher Küstenökosysteme könnte gesteigert und ein Teil der Rest-Emissionen so ausgeglichen werden.
- > Die Artenvielfalt in den Küstengewässern könnte bei richtiger Herangehensweise gesteigert werden. Einschränkend muss jedoch gesagt werden, dass eine Ausweitung vegetationsreicher Küstenökosysteme zu Lasten anderer lokaler Ökosysteme

ginge, so zum Beispiel zu Lasten von Sandstränden und Wattflächen.

- > Mensch und Natur hätten aufgrund der vielen zusätzlichen Ökosystemleistungen der Küstenökosysteme (Nahrung, Küstenschutz, etc.) deutlich bessere Möglichkeiten, sich an den Klimawandel anzupassen und seinen Gefahren zu trotzen.

Tatsächlich aber wirft der Ansatz, vegetationsreiche Küstenökosysteme großflächig zu erweitern, noch immer viele Fragen auf, die im Rahmen der Forschungsmission CDRmare beantwortet werden sollen.

Wie viel Kohlendioxid entnehmen vegetationsreiche Küstenökosysteme der Atmosphäre tatsächlich?

Derzeit entnehmen die vegetationsreichen Küstenökosysteme der Atmosphäre schätzungsweise 0,129 bis 1,61 Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr. In Kohlenstoff umgerechnet ergibt das 35 bis 440 Millionen Tonnen. Die Spannbreite dieser Schätzung ist unter anderem deshalb so groß, weil viele Prozesse und Wechselwirkungen innerhalb der sehr komplexen Pflanzengemeinschaften und ihrer Ökosysteme noch gar nicht richtig verstanden sind. Eine offene Forschungsfrage lautet zum Beispiel, wie viel Kohlendioxid Mangroven- und Tangwälder, Salzmarschen und Seegraswiesen in verschiedenen Regionen der Erde aufnehmen und in Form organischen Kohlenstoffs einlagern und welchen Anteil sie im Verlauf ihres Lebenszyklus wieder freisetzen.

Kohlendioxid beispielsweise emittieren die Meereswiesen und -wälder im Zuge ihrer pflanzlichen Atmung oder wenn Seekühe, Seeigel und die vielen anderen Meeresbewohner das Pflanzenmaterial fressen und im Zuge ihres Stoffwechsels in Energie und Kohlendioxid umwandeln. Zersetzen dagegen Mikroben das im Küstensediment eingelagerte organische Material, entstehen unter bestimmten Voraussetzungen Methan und Lachgas. Welche Mengen dieser beiden klimaschädlichen Gase unter welchen

Bedingungen aus Küstenökosystemen freigesetzt werden, ist noch nicht gut verstanden. Fest steht jedoch: Wo Methan und Lachgas aus dem Küstensediment entweichen, schrumpfen die unterirdischen Kohlenstofflagerstätten der Küstenökosysteme und damit ihr angestrebter Klimaeffekt. Daher gilt: Um beurteilen zu können, ob der massive Ausbau von Küstenökosystemen ein möglicher Weg wäre, die Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres zu verstärken, müssen deren Treibhausgas-Aufnahme und -Abgabe sowie die Kohlenstoffeinlagerung im Meeresboden genau verstanden und bilanziert werden.

In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen in vier ausgesuchten Küstenregionen der Erde die Kohlenstoffbilanzen und Treibhausgasemissionen lokaler Küstenökosysteme. Salzmarschen und Seegraswiesen werden an der deutschen Ost- und Nordseeküste sowie in der Karibik (Kolumbien) und an der malaysischen Pazifikküste erforscht. Die Feldforschung an Mangroven führt die Wissenschaftler:innen nach Kolumbien und Malaysia. Studien zu Großalgen finden auf Helgoland (Schwerpunkt Tangwälder) sowie im mexikanischen Teil der Karibik (Schwerpunkt Sargassum) statt.

Für wie lange speichern vegetationsreiche Küstenökosysteme den Kohlenstoff?

Die Dauer der Kohlenstoffspeicherung in vegetationsreichen Küstenökosystemen hängt vom Speicherort ab. Kohlenstoff, den die Pflanzen als Teil ihrer oberirdischen Biomasse in Blättern, Halmen, Zweigen oder Ästen einlagern, ist der Atmosphäre für Wochen bis Jahrzehnte entzogen. Im Gegensatz dazu können die unterirdischen, oftmals luftdicht abgeschlossenen Kohlenstofflager viele Jahrhunderte oder gar Jahrtausende überstehen, wenn die sie schützende Vegetation erhalten bleibt. In der spanischen Portlligat-Bucht beispielsweise wachsen Seegraswiesen, deren Kohlenstoffspeicher über 6000 Jahre alt sind.

Noch aber wissen Forschende nicht genau, welche Faktoren die Lebensdauer der unterirdischen Kohlenstofflagerstätten bestimmen und welche Abbauprozesse unter welchen Bedingungen im Sediment stattfinden. Konkrete Aussagen zur aktuellen und künftigen Kohlenstoffspeicherung in vegetationsreichen Küstenökosystemen sind demzufolge noch nicht möglich.

Im Rahmen der Forschungsmission CDRmare nehmen die Forschenden in allen untersuchten Mangrovenwäldern, Salz-

marschen und Seegraswiesen Sedimentproben, um herauszufinden, über welchen Zeitraum die entsprechenden Kohlenstoffmengen eingelagert wurden. Die Küstensedimente werden zudem umfangreichen chemischen Analysen unterzogen, um zu ergründen, welche biologischen und chemischen Abbauprozesse im Sediment ablaufen, welche Komponenten des eingelagerten Kohlenstoffs herausgewaschen werden und welche Anteile die klimarelevanten langfristigen Kohlenstofflagerstätten bilden.

Das Kohlendioxid-Entnahmepotenzial verschiedener Großalgenarten wird in zwei Teilprojekten erforscht: Vor der Küste der mexikanischen Karibik-Halbinsel Yucatán werden Wissenschaftler:innen unter anderem die Biomasseproduktion, den Kohlenstoffgehalt und das Speicherpotenzial schwimmender Sargassum-Algen untersuchen. Vor Helgoland konzentrieren sich die Untersuchungen auf die dort wachsenden Tangwälder. In allen Fällen muss untersucht werden, wie viel Kohlenstoff die Ökosysteme zusätzlich speichern könnten, wenn ihre Fläche erweitert würde.

Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf die Küstenökosysteme und werden die Meereswiesen und -wälder auch unter wärmeren Bedingungen in der Lage sein, große Mengen Kohlendioxid aufzunehmen und einzulagern?

Der Klimawandel stellt eine große Bedrohung für die Küstenökosysteme dar. Infolge der steigenden Luft- und Wassertemperaturen verlagern Pflanzen und Tiere ihren Lebensraum polwärts; Hitzestress erhöht ihre Anfälligkeit für Krankheiten. Infolge steigender Meeresspiegel werden einstige Gezeitenbereiche dauerhaft überflutet und gehen als Habitat verloren; Ozeanversauerung und Sauerstoffarmut erschweren das Überleben unter Wasser zusätzlich. Enormen Schaden richten zudem Extremereignisse wie schwere Stürme und Meereshitzewellen an. Wind und Wellen entwurzeln Mangroven, reißen Seegräser aus dem Meeresboden und spülen mitunter Salzmarschen und Großalgenwälder davon. Meereshitzewellen setzen vor allem Tangwäldern und Seegraswiesen zu und haben nach Aussage des Weltklimarates in den zurückliegenden Jahren in verschiedenen Regionen zum großflächigen Absterben der lokalen Pflanzengemeinschaften geführt.

Wetterextreme und ihre Auswirkungen vor Ort lassen sich nur schwer vorhersagen. Außerdem werden die Folgen des Klimawandels durch weitere, vom Menschen verursachte Stressfaktoren oder Störungen verstärkt. Dazu gehören die Grundnetz-fischerei, Meeresverschmutzung, Küstenbebauung sowie das Errichten von Staudämmen entlang großer Flüsse. Staustufen verhindern den Eintrag von Sedimenten, welche vor allem Mangroven für ihre Flächenausdehnung sowie für ihr vertikales Höhenwachstum (Anpassungen an den Meeresspiegelanstieg) benötigen. Alle genannten Stressfaktoren reduzieren die Fähigkeit der Küstenökosysteme, Klimafolgen zu kompensieren und sich an den Wandel anzupassen.

Es stellt sich daher die Frage, in welchen Regionen der Welt vegetationsreiche Küstenökosysteme 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 sind. Außerdem muss diskutiert werden, ob eine großflächige Erweiterung der Meereswiesen und -wälder angesichts der zunehmenden Klimaextreme wirklich eine geeignete Methode wäre, die Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres zu

verstärken – und wenn ja, durch welche innovativen Verfahren sowohl angestammte als auch wiederhergestellte und neu angelegte Pflanzengemeinschaften vor den Auswirkungen des Klimawandels geschützt werden könnten. Denkbar wäre zum Beispiel, wärmeresistente Braunalgen und Seegräser zu züchten. Ob ein solcher Ansatz gelingen würde und ökologisch sinnvoll wäre, ist angesichts der Komplexität mariner Ökosysteme jedoch noch ungewiss.

In der Forschungsmission CDRmare führen Wissenschaftler:innen umfangreiche Klimawandel-Experimente an der deutschen Nordseeküste sowie in den Tropen durch. Entlang der deutschen Nordseeküste kommen dafür unter anderem große temperaturkontrollierte Meerwasser-Becken (Mesokosmen) zum Einsatz sowie spezielle Folienkuppeln, mit denen sich ausgewählte Versuchsflächen im Gezeitenbereich bis in den Untergrund erwärmen lassen. Auf diese Weise können die Wissenschaftler:innen die kurzfristigen Auswirkungen steigender Temperaturen auf die Primärproduktion, die Kohlenstoffeinlagerung und die Treibhausgas-Emissionen einheimischer Salzmarschen und Seegraswiesen untersuchen. Von besonderem Interesse sind dabei Schwellenwerte verschiedener Umweltparameter, deren Überschreiten zu einem langfristigen Absterben der Pflanzengemeinschaften und zu einem Abbau ihrer Kohlenstoffspeicher führen würde. Anhand ihrer Ergebnisse werden die Wissenschaftler:innen Aussagen zur klimatischen Widerstandsfähigkeit der weltweiten Meereswiesen treffen.

Ihre Messdaten fließen zudem in Computermodelle ein, mit denen ein großflächiger Ausbau der Küstenökosysteme simuliert wird. Dabei untersuchen die Forschenden, wie stabil und anpassungsfähig die Lebensgemeinschaften und ihre Kohlenstoffspeicher unter verschiedenen Klimabedingungen wären. Außerdem prüfen sie, in welchem Umfang die Artenvielfalt und der Zusatznutzen der Meereswiesen und -wälder zunehmen würde, wenn sie auf einer deutlich größeren Fläche wachsen würden als heutzutage. Analysiert wird auch, welche negativen Folgen eine Flächenerweiterung haben könnte.



Eine Grüne Meeresschildkröte erkundet eine Seegraswiese vor der Küste Teneriffas.

Foto: Liam McGuire, Ocean Image Bank

Mit welchen Methoden lassen sich große Küstenökosysteme flächendeckend erfassen und überwachen, um auch ihre zusätzliche Kohlendioxid-Entnahme zu quantifizieren?

Wer vegetationsreiche Küstenökosysteme großflächig erweitern und ihre Kohlendioxid-Aufnahme und -Speicherung quantifizieren möchte, muss große Küstenbereiche bestens kennen und über lange Zeiträume hinweg überwachen. Bisher aber sind viele Mangroven- und Tangwälder, Seegraswiesen und Salzmarschen noch nicht einmal umfassend kartiert. Fortschritte sollen nun mit bildgebenden Fernerkundungsmethoden gelingen. Dazu zählen Satellitenaufnahmen ebenso wie schiffs-, flugzeug- und drohnen-gestützte Messverfahren. Mancherorts wurden diese Techniken schon für die Erkundung von Küstenbereichen eingesetzt. Inwiefern sie aber geeignet sind, Daten für eine genaue Quantifizierung der Kohlendioxid-Entnahme zu liefern und geeignete Flächen für die Erweiterung der Küstenökosysteme zu finden, ist bislang wenig erforscht.

In der Forschungsmission CDRmare entwickeln, testen und implementieren Wissenschaftler:innen verschiedene Fernerkundungsmethoden zur Überwachung der Vegetation im Gezeiten- und Flachwasserbereich. Dabei kombinieren sie auch Fernerkundungsverfahren. So ist unter anderem geplant, Satellitenbild-Auswertungen mit Unterwasser-Sonartechniken zu koppeln. Mithilfe dieser Innovationen soll es zum einen gelingen, die oberirdische Biomasse der Küstenökosysteme in der Nordsee, der Ostsee sowie an der Küste Kolumbiens und Malaysias zu quantifizieren und vor Ort gemessene Kohlenstoffvorräte – etwa der Kohlenstoffspeicher unter wenigen Quadratmetern Mangrovenwald – auf die gesamte regionale und globale Fläche dieser Küstenökosysteme hochzurechnen. Zum anderen werden hochauflösende Fernerkundungsdatensätze für die Suche nach bislang unbewachsenen Küstenabschnitten gebraucht, in denen Mangroven, Tangwälder, Salzmarschen oder aber Seegraswiesen neu angelegt werden könnten.

Wäre eine großflächige Erweiterung vegetationsreicher Küstenökosysteme tatsächlich eine wirksame Maßnahme um Rest-Emissionen auszugleichen und den Klimawandel aufzuhalten?

Um diese Frage zu beantworten, benötigen Forschende sogenannte Erdsystemmodelle, in denen sich sowohl der globale Kohlenstoffkreislauf als auch die Rolle der Küstenökosysteme, ihre klimabedingten Veränderungen und ihre mögliche Ausdehnung simulieren lassen. Bislang aber fehlen den Erdsystemmodellen Komponenten zur Darstellung der Meereswiesen und -wälder.

In der Forschungsmission CDRmare werden Wissenschaftler:innen erstmals vegetationsreiche Küstenökosysteme in ein modernes Erdsystemmodell integrieren und deren Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf der Erde simulieren. Dazu fließen viele sowohl bereits veröffentlichte Datensätze zur globalen Ausdehnung und Kohlenstoffbilanz der Meereswiesen und -wälder in das Modell mit ein als auch jene Forschungsergebnisse, die in CDRmare selbst erhoben wurden. Ein solches erweitertes Erdsystemmodell versetzt die Forschenden in

die Lage zu ergründen, wie viel zusätzliches Kohlendioxid der Atmosphäre durch eine Erweiterung der Küstenökosysteme entnommen werden könnte, in welchem Maße dies den Klimawandel beeinflussen würde, und wie die Pflanzengemeinschaften selbst auf die zu erwartenden Umweltveränderungen reagieren werden.

Basierend auf der in CDRmare durchgeführten Grundlagenforschung wollen die Expert:innen innovative Verfahren zur Flächenausdehnung der vegetationsreichen Küstenökosysteme sowie politische Handlungsempfehlungen entwickeln, mit denen sich die Kohlendioxid-Aufnahme der Meereswiesen und -wälder auf umweltverträgliche und gesellschaftlich akzeptierte Weise steigern ließe – an deutschen Küsten ebenso wie weltweit



Salzmarschen, Hamburger Hallig.
Foto: Ella Logemann, Uni Hamburg

Wie denkt die Küstenbevölkerung über großflächige Veränderungen vor ihrer Haustür?

Maßnahmen zum Natur- und Klimaschutz lassen sich nur erfolgreich umsetzen, wenn die Interessen der lokalen Bevölkerung von Anfang an mit berücksichtigt werden, diese in alle Entscheidungsprozesse mit eingebunden ist, mit eigenem Wissen und Expertise beitragen kann und im besonderen Maße von den Schutzmaßnahmen profitiert. Ein gut durchdachter Ausbau vegetationsreicher Küstenökosysteme könnte einerseits eine zunehmende Artenvielfalt sowie widerstandsfähigere Lebensgemeinschaften mit sich bringen. Die Fischbestände könnten wachsen, die Wasserqualität zunehmen, die Attraktivität der Region für Touristen steigen. Mangroven- und Tangwälder, Salzmarschen und Seegraswiesen würden zudem einen natürlichen, sich selbst reparierenden Küstenschutz bieten, der eine Anpassung an steigende Meeresspiegel erleichtern würde.

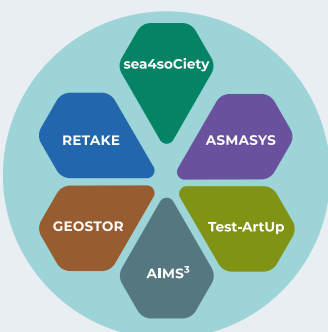
Eine Erweiterung der Meereswiesen und -wälder brächte andererseits aber auch Einschnitte für das Leben der Küstenbevölkerung mit sich, gerade weil der Mensch Küstengebiete intensiv nutzt und nur wenig freie Flächen zur Verfügung stehen. Denkbar wäre an deutschen Küsten zum Beispiel, dass Deiche zurückgebaut und dahinterliegende Weideflächen aufgegeben werden müssten, um Platz für Salzmarschen zu schaffen. Meeresbuchten, in denen Seegraswiesen neu angepflanzt werden, müssten für die Grundnetzfischerei und vielleicht für den Bootsverkehr gesperrt werden. Für neue Tangwälder entlang der Nordseeküste müssten viele Tonnen Felsgestein in das Meer verbracht werden, denn Braunalgen wachsen nur auf steinigem Untergrund.

Im Vorfeld großflächiger Küstenumgestaltungen müsste demzufolge viel Aufklärungsarbeit geleistet werden. Diese Aufgabe aber setzt voraus, dass Entscheidungstragende genau verstehen, welche Wertvorstellungen und Bedürfnisse die lokale Bevölkerung hat und in welchem Maße sie bereit wäre, sich am Ausbau der Küstenökosysteme zu beteiligen und diesen zu unterstützen.

In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen in ausgewählten Küstenregionen Deutschlands, Kolumbiens und Malaysias die Einstellung der lokalen Bevölkerung zum Klimawandel und zu möglichen Maßnahmen zur Kohlendioxid-Entnahme. Ihr Ziel ist es, die unterschiedlichen Küstenkulturen zu verstehen, sich ein Bild von den Vorstellungen der Menschen zum nachhaltigen Leben am Meer zu machen, lokales Wissen und Innovationskraft zu aktivieren und frühzeitig herauszufinden, welche Themen oder Maßnahmen sozialen Widerstand auslösen könnten oder aber die Zustimmung der lokalen Bevölkerung finden. Auf Grundlage ihrer Erkenntnisse werden im Anschluss regionalspezifische Handlungsempfehlungen entwickelt, die sicherstellen, dass im Falle eines großflächigen Ausbaus lokaler Küstenökosysteme Mensch, Natur und Klima gleichermaßen bedacht werden und möglichst viele Beteiligte von den zu findenden Kompromissen für geplante Maßnahmen profitieren. Diese Aufgabe wird keine leichte und stellt eine besondere Herausforderung für die Forschenden dar.



Ein Teppich aus Sargassum-Braunalgen treibt vor der Ostküste der mexikanischen Halbinsel Yucatán.
Foto: Nicola Schwehm, AWI



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



sea4society.cdrmare.de

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.

Lösungsansatz: Ein Erfolgskonzept des Weltozeans kopieren

Unvermeidbare Treibhausgasemissionen der Menschheit durch eine verstärkte Kohlendioxid-Entnahme des Ozeans auszugleichen, wird eine schwierige Aufgabe. Ein denkbarer Lösungsansatz lautet, die natürliche organisch-biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres anzukurbeln. Theoretisch wäre ein solcher Schritt möglich, indem man in nährstoffarmen Meeresregionen nährstoffreiches Wasser aus 200 bis 1000 Metern Wassertiefe

an die Meeresoberfläche pumpt. Der Idee zufolge würde das Tiefenwasser in der lichtdurchfluteten oberflächennahen Schicht wie Dünger wirken: Algen würden vermehrt wachsen, mehr Photosynthese betreiben und im Zuge dessen mehr Kohlendioxid aus dem Wasser aufnehmen und den enthaltenen Kohlenstoff in ihre Biomasse einbauen.



Ein spanisches Forschungsschiff setzt im November 2022 die Wellenpumpe der CDRmare-Forschungsmission für Testzwecke aus.

Foto: Diego Gutierrez

Ein verstärktes Algenwachstum wiederum würde mehr Futter für Krill, Ruderfußkrebse, Quallen, Flügelschnecken und andere frei treibende Organismen (Zooplankton) und Fische bedeuten und zu einem zunehmenden Transport kohlenstoffhaltigen Materials wie Partikel, Kotballen und Kadaver in größere Wassertiefe führen. Der in dem herabsinkenden Material enthaltene Kohlenstoff wäre auf diese Weise für Jahrzehnte, mitunter sogar für Jahrhunderte in den Tiefen des Meeres weggeschlossen. Das heißt, er könnte vorerst nicht mehr in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre entweichen.

Künstlicher Auftrieb nennt sich dieser Lösungsansatz. Er kopiert das Funktionsprinzip der großen natürlichen Auftriebsgebiete

vor den Westküsten Perus, Namibias, Kaliforniens und Mauretaniens (subtropisches Afrika und Amerika). Vom Wind angetrieben, steigt dort kaltes, nährstoffreiches Tiefenwasser zur Meeresoberfläche auf, lässt das Leben im Oberflächenwasser aufblühen und ist letztendlich der Grund, warum die Auftriebsgebiete zu den produktivsten und fischreichsten Meeresregionen der Welt gehören. Für einen künstlichen Auftrieb in bislang wenig produktiven Meeresregionen bräuchte es allerdings zehntausende Pumpen mit einem Gesamtfördervolumen von einer Million Kubikmeter Wasser pro Sekunde, wenn ihre Wirkung jener der natürlichen Auftriebsgebiete gleichen soll.

Künstlicher Auftrieb

Kosten:

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



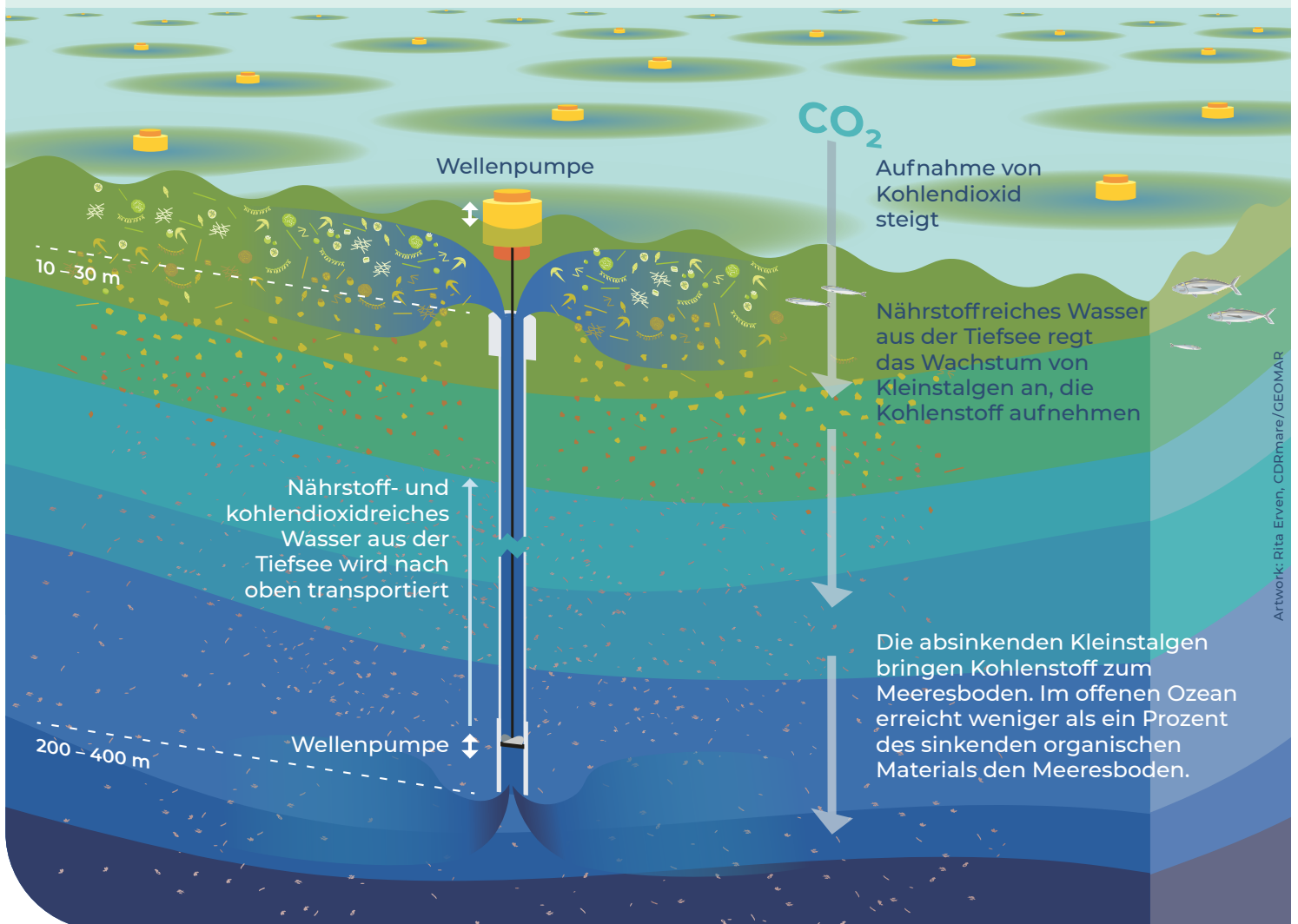
Dauer der Kohlenstoff-Speicherung:
für Jahrzehnte bis Jahrhunderte.



Skalierbarkeit:

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

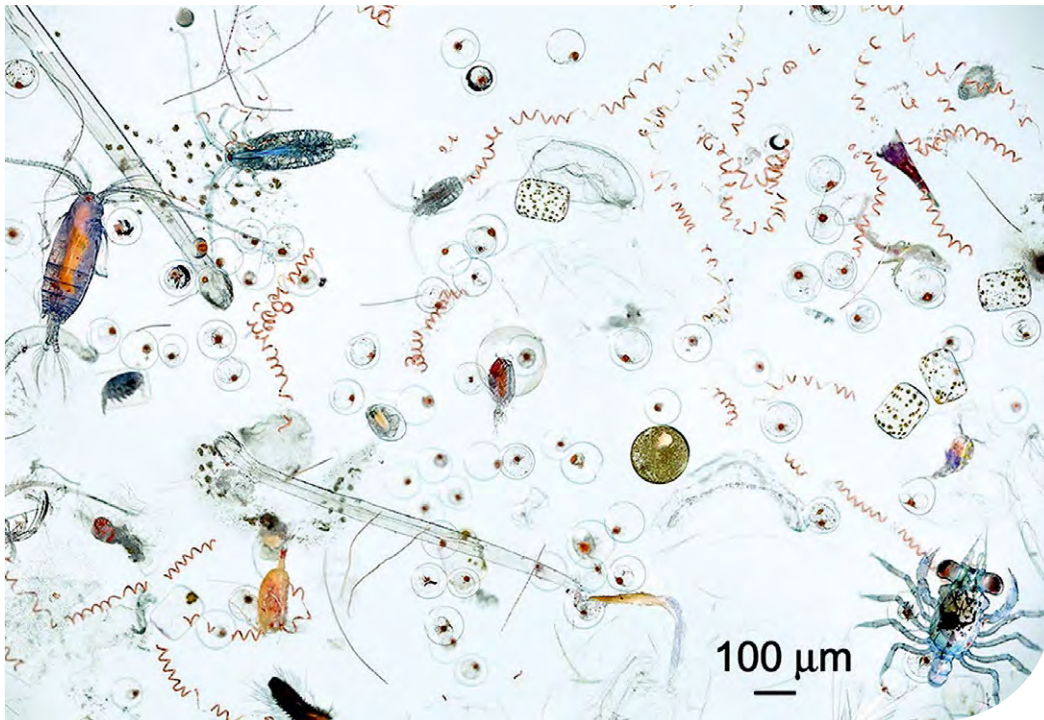
Technischer Entwicklungsstand:
in den Anfängen.



Die gewünschte Verwandlung des Ökosystems

Das größte Wirkungspotenzial hätte künstlicher Auftrieb in nährstoffarmen und demzufolge weniger produktiven Meeresregionen wie den subtropischen Wirbeln. Diese erstrecken sich über 50 Prozent der Erdoberfläche. Die Lebensgemeinschaften in ihrem Oberflächenwasser sind bislang perfekt an die Nährstoffarmut angepasst. So wachsen hier anstelle vieler großer Kieselalgen eher kleinere Algenarten, die nach ihrem Absterben weniger schnell absinken und dabei auch weniger Biomasse (gebundener Kohlenstoff) in die Tiefe entführen. Vergleichsweise klein fällt auch das Zooplankton aus: Zum einen benötigt es keine großen Mundwerkzeuge, um harte Kieselalgen zu knacken. Zum anderen brauchen kleinere Organismen weniger Futter und Energie zum Überleben. Beides ist schließlich Mangelware im nährstoffarmen Oberflächenwasser der subtropischen Wirbel.

Ändert sich die verfügbare Nährstoffmenge durch künstlichen Auftrieb dauerhaft, würde sich die Lebensgemeinschaft des Oberflächenwassers daran anpassen. Zunächst würden vermehrt Kieselalgen wachsen, im zweiten Schritt würde sich größeres Zooplankton ansiedeln, welches in der Lage wäre, die harten Siliziumschalen der Kieselalgen aufzubrechen. Großes, nahrhaftes Zooplankton wiederum würde Fische anlocken, weshalb künstlicher Auftrieb langfristig zu einem Anstieg der Fischbestände in der jeweiligen Meeresregion führen würde. Der Nutzen des künstlichen Auftriebs für die Produktion der Nahrungsnetze wird in der Wissenschaft nicht angezweifelt. Wie gut die erhofften Anpassungsprozesse jedoch in der Praxis funktionieren würden, ist noch nicht eindeutig geklärt.



Marines Plankton unter dem Mikroskop: Diese Aufnahme zeigt unterschiedliche Organismen, darunter Cyanobakterien, Kieselalgen und Ruderfußkrebse. Sie alle eint, dass ihre Schwimmrichtung von der Wasserströmung vorgegeben wird.

Foto: David Liittschwager, Wiki Commons

Zusammenwirken von biologischer und physikalischer Kohlenstoffpumpe

Die biologische Kohlenstoffpumpe ist jedoch nicht der einzige Prozess, der entscheidet, ob sich mit künstlichem Auftrieb tatsächlich zusätzliches Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnehmen lässt. Das Tiefenwasser im Ozean enthält neben hohen Nährstoffkonzentrationen nämlich auch zusätzliches Kohlendioxid, welches sich dort über zwei Prozesse angereichert hat: erstens über die oben beschriebene biologische Kohlenstoffpumpe, zweitens über die sogenannte physikalische Kohlenstoffpumpe.

Die physikalische Kohlenstoffpumpe wird durch das Absinken kalter Wassermassen in den Polarregionen angetrieben. Da kaltes Wasser eine hohe Gaslöslichkeit hat – das heißt, viel Gas

aufnehmen kann – enthalten die in den hohen Breiten absinkenden Wassermassen entsprechend viel Kohlendioxid. Pumpt man nun kaltes, kohlendioxidreiches Tiefenwasser an die Meeresoberfläche, erwärmt sich dieses Wasser. Parallel dazu sinkt seine Gaslöslichkeit und das gespeicherte Kohlendioxid kann wieder in die Atmosphäre entweichen. Für eine verstärkte Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre durch künstlichen Auftrieb müsste also mehr Kohlendioxid nachhaltig gebunden werden, als mit dem emporgepumpten Tiefenwasser an die Oberfläche gelangt.

Jüngste, zum Teil noch unveröffentlichte Ergebnisse der Forschungsmission CDRmare zum künstlichen Auftrieb zeigen

nun, dass eine Netto-Kohlendioxid-Entnahme durch künstlichen Auftrieb durch ein Zusammenwirken biologischer und physikalisch-chemischer Prozesse möglich ist. Vier Argumente sprechen demnach für eine klimabedeutsame Wirkungsweise des künstlichen Auftriebs:

- > Erstens liegt die Zeit, zu der das aufsteigende Tiefenwasser zum letzten Mal in Kontakt mit der Atmosphäre war, in vielen Gebieten vor dem Beginn der industriellen Revolution. Aus diesem Grund enthält dieses Wasser noch kein zusätzliches Kohlendioxid, welches auf vom Menschen verursachte Emissionen zurückzuführen ist. Die Wassermassen hätten demzufolge noch Potenzial, an der Meeresoberfläche weiteres Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen.
- > Zweitens nimmt das Säurebindungsvermögen des Meerwassers (Alkalinität) in einigen Regionen mit der Tiefe zu. Dieses Tiefenwasser könnte daher mehr Kohlendioxid aufnehmen als das heutige Oberflächenwasser. Es müsste dafür aber aus einer Tiefe von mehreren hundert Metern an die Meeresoberfläche befördert werden.
- > Drittens führt der Aufstieg kalten Tiefenwassers zu einer unmittelbaren Abkühlung der Meeresoberfläche und der darüber befindlichen Luftmassen. Dieser kühlende Effekt auf

das Klima wird jedoch durch eine Verdrängung des warmen Oberflächenwassers in tiefere Schichten erkaufte. Infolge dieser Verdrängung erwärmt sich das Ozeaninnere und es ist noch unklar, welche ökologischen und physikalischen Auswirkungen diese Erwärmung nach sich zieht.

- > Viertens zeigte sich in Mesokosmen-Studien vor Gran Canaria, dass die Kohlendioxid-Entnahmebilanz von Verfahren zum künstlichen Auftrieb durchaus positiv sein kann, weil mithilfe der aufgetriebenen Nährstoffe am Ende mehr Kohlenstoff organisch gebunden wurde als theoretisch angenommen. Wie positiv diese Entnahmebilanz jedoch ausfällt, hängt davon ab, wie effizient das kohlenstoffreiche Material in die Tiefe verfrachtet wird.

Für einen Einsatz von künstlichem Auftrieb spricht zudem, dass der fortschreitende Klimawandel die Schichtung der Wassermassen im Ozean verstärkt. Infolgedessen vermischen sich das Oberflächenwasser und das darunterliegende Zwischenwasser in einem geringeren Maße, weshalb die natürliche Nährstoffzufuhr aus der Tiefe des Meeres abnimmt. Ein künstlich erzeugter Auftrieb könnte dieser Entwicklung ein Stück weit entgegenwirken. Allerdings steht die Forschung zur Machbarkeit von Verfahren zum künstlichen Auftrieb sowie zu ihren Folgen und Risiken noch am Anfang.

Der erste Praxistest: Halten Theorie und Technik, was sie versprechen?

In der Forschungsmission CDRmare sollen grundlegende Wissenslücken zum Einsatz und Nutzen des künstlichen Auftriebs geschlossen werden. Dafür haben Wissenschaftler:innen einen interdisziplinären Forschungsansatz entwickelt, mit dem sie die Machbarkeit künstlichen Auftriebs aus technischer, ökologischer, biogeochemischer, ökonomischer und rechtlicher Sicht unter-

suchen. Außerdem testen sie eine wellengetriebene Auftriebspumpe vor der Küste Gran Canarias und dokumentieren die Funktionalität der Pumpe, die Ausbreitung des aufgetriebenen Wassers und dessen Auswirkungen auf das Ökosystem. Von den Ergebnissen erhoffen sich die Expert:innen Antworten auf viele Fragen.

Mit welcher Pump-Technik ließe sich künstlicher Auftrieb am effizientesten erzeugen?

Die bislang diskutierten Verfahren für künstlichen Auftrieb unterscheiden sich zum einen in der Pumpentechnik, zum anderen in der Auftriebsdauer. Eine Kernfrage lautet, woher die Pumpen die Energie beziehen, die sie benötigen würden, um große Wassermassen an die Meeresoberfläche zu transportieren. An CDRmare beteiligte Wissenschaftler:innen konnten bereits Erfahrungen mit einer in Kiel entwickelten Wellenpumpe sammeln. Pumpen dieses Typs besitzen einen Schwimmkörper, der im Rhythmus der Wellen auf- und absteigt. Seine Bewegung wird auf einen Wasserheber im Auftriebsrohr übertragen, der das Tiefenwasser dann mit der Kraft der Wellen in die Höhe hievt.

Die Wellenpumpe mit einer Rohrlänge von 30 Metern und einem Durchmesser von 0,4 m wurde erfolgreich vor Gran Canaria eingesetzt und erzeugte einen Aufwärtsstrom von circa 35 Kubikmeter Wasser pro Stunde. Bei Wellenfrequenzen und Wellenhöhen wie sie typisch für ozeanische Regionen in niederen bis

mittleren Breiten sind, lassen sich mit größer dimensionierten Pumpen dieser Art maximale Durchflussraten von ein bis zwei Kubikmeter Wasser pro Sekunde erzeugen. Um eine substanzielle klimawirksame Leistung zu erreichen, müssten jedoch Millionen Kubikmeter Tiefenwasser pro Sekunde an die Oberfläche gepumpt werden.

Höhere Pumpraten lassen sich durch elektrisch betriebene Propeller-Pumpen erzielen. In Norwegen werden solche Pumpen bereits in der Lachs-Aquakulturhaltung eingesetzt, um sauerstoffreiches und im Winter vor allem wärmeres Tiefenwasser in die Käfiganlagen zu pumpen. Die Lachse wachsen so schneller. Für Projekte zum künstlichen Auftrieb auf Hoher See wurden Propeller-Pumpen bislang allerdings noch nicht getestet. Die elektrisch betriebenen Pumpen kämen auch nur infrage, wenn sie vor Ort mit überschüssigem Wind- oder Solarstrom betrieben werden könnten.

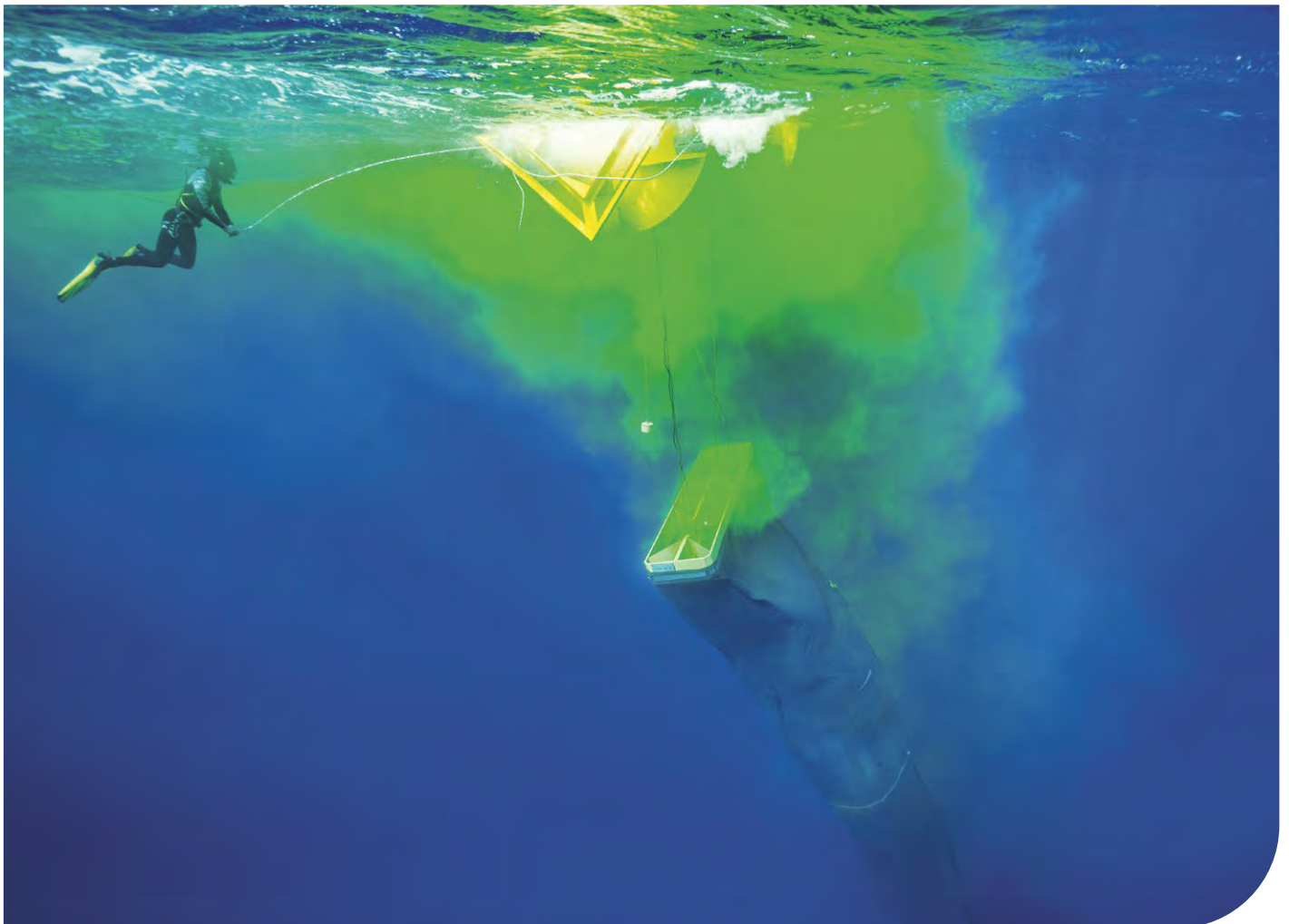
Eine zweite wichtige Kenngröße ist die Auftriebsdauer. Hierbei unterscheiden Expert:innen zwischen einer einmaligen und einer kontinuierlichen Zufuhr von Tiefenwasser, was ersten Testläufen zufolge unterschiedliche Auswirkungen auf das marine Ökosystem und die Produktion schnell absinkender Algen hat. Beim ersten Verfahren (gepulster Auftrieb) wäre die Pumpe stationär verankert. Das Oberflächenwasser würde stetig an ihr vorbeiströmen und jede einzelne Wassermenge für sich betrachtet nur ein einziges Mal mit Tiefenwasser beimpft werden. Im zweiten Verfahren hingegen würde die Pumpe in der Strömung mittreiben und könnte so ein und denselben Wasserkörper kontinuierlich mit Tiefenwasser versorgen.

Entscheidend für die Effizienz des künstlichen Auftriebs sind außerdem der Kohlendioxidgehalt des Tiefenwassers (mögliche Ausgasung durch Wassererwärmung) sowie sein Nährstoffgehalt. Letzterer kann sehr unterschiedlich sein, je nachdem in welchem Meeresgebiet der Pumpeneinsatz erfolgt und aus welcher Tiefe das Wasser nach oben verfrachtet wird. Welche Nährstoffkonstellation die Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres am effizientesten verstärkt, muss noch untersucht werden. Auch deshalb ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine Bewertung des Kohlendioxid-Entnahmepotenzials von künstlichem Auftrieb noch nicht möglich.

In der Forschungsmission CDRmare entwerfen, bauen und testen Forschende eine seetüchtige wellengetriebene Auftriebspumpe, die für einen langfristigen Offshore-Einsatz in Wassertiefen von mehr als 200 Metern geeignet ist. Parallel dazu verbessern sie ein Strömungsmodell (Simulationssystem), mit dem sich für ausgewählte Meeresregionen sowohl der Wassermassentransport zur Meeresoberfläche als auch die anschließende Verteilung von Nährstoffen, Salz und Energie realitätsnah und in hoher Auflösung simulieren lassen.

Mit dem Strömungsmodell führen die Forschenden außerdem Vergleichsstudien zwischen einem kontinuierlichen künstlichen Auftrieb und gepulsten Verfahren durch. Deren Ziel besteht darin, die strömungsmechanischen Vorgänge von künstlichem Auftrieb zu optimieren. Dazu verändern die Wissenschaftler:innen in ihren Modell-Simulationen sowohl die Länge der Pulsperiode als auch die Menge aufgetriebenen Tiefenwassers. Untersucht wird außerdem, in welchem Maße sich die Meereschemie in unmittelbarer Umgebung der Pumpe sowie in größerer Entfernung verändert.

Die in CDRmare durchgeführten Simulationsoptimierungen ermöglichen es, die weltweit erste Simulation des Nährstoffauftriebspotenzials einer Auftriebspumpe durchzuführen. Deren Ergebnisse fließen unmittelbar in die Entwicklung der Auftriebspumpe ein (optimale Größe, bestmögliches Design und Betriebsweise) sowie in die Planung ihres ersten Hochsee-Einsatzes für Forschungszwecke.



Beim Test der Wellenpumpe kommt ein grüner Farbstoff zum Einsatz. Er soll anzeigen, wie sich das Tiefenwasser an der Meeresoberfläche verteilt

Foto: Michael Sswat, GEOMAR

Welche Folgen hat künstlicher Auftrieb für die Ökosysteme des Meeres?

Künstlicher Auftrieb verändert die Nährstoffverfügbarkeit im Oberflächenwasser und somit eine der Säulen des Lebens im Meer. Wie tiefgreifend dieser Wandel sein kann und welche Unterschiede auftreten, haben Forschende durch vergleichende Experimente im Humboldtstrom (natürliches Auftriebsgebiet vor der Küste Perus) und in einer nährstoffarmen Meeresregion vor der Küste Gran Canarias untersucht. Dabei konzentrierten sie sich auf drei Kenngrößen: das Mischungsverhältnis zwischen nährstoffreichem Tiefenwasser und nährstoffarmen Oberflächenwasser (wenig bis viel), die Auftriebsdauer (kontinuierliche oder einmalige Zufuhr von Tiefenwasser) und den Silikatgehalt des Tiefenwassers, der entscheidend ist für das Wachstum von Kieselalgen.

Wie von den Forschenden erwartet, veränderten alle drei Parameter das Wachstum und die Artenzusammensetzung der Algen. Die stärksten Algenblüten entstanden, wenn viel Tiefenwasser heraufbefördert wurde, es viel Silikat enthielt und das Oberflächenwasser einmalig damit gedüngt wurde. Unter diesen Voraussetzungen lagerten die Algenblüten sogar besonders viel Kohlenstoff in ihre Biomasse ein. Kohlenstoff-Überkonsum nennen Fachleute dieses Phänomen. Die Wissenschaftler:innen schlussfolgerten daraus, dass bei einem künftigen Einsatz von künstlichem Auftrieb alle drei untersuchten Kenngrößen bei der Projektplanung berücksichtigt werden müssen.

Zur Überraschung des Forscherteams aber führten die zusätzlich gebildete Algenbiomasse und ihre vorteilhaften Eigenschaften bei den Experimenten vor Gran Canaria nicht automatisch zu einer Erhöhung der gewünschten Ökosystemleistungen. Die zusätzlich gebildete Algenbiomasse wurde kaum vom Zooplankton und anderen Meeresorganismen gefressen. Das heißt, anders als im Humboldtstrom fiel sowohl die erhoffte Weitergabe des gebundenen Kohlenstoffs im Nahrungsnetz aus als auch die beschleunigende Wirkung des Zooplanktonfraßes auf den Tiefentransport. Ruderfußkrebse und andere Zooplanktonarten bilden schnell sinkende Kotballen, in denen Kohlenstoff innerhalb kurzer Zeit in die Tiefe verfrachtet wird. Ohne ihre Mithilfe aber sank das im Oberflächenwasser gebildete kohlenstoffreiche Material nur langsam ab und wurde bakteriell abgebaut, bevor es große Tiefen erreichen konnte.

Eine Erklärung für diese Beobachtungen könnte die kurze Dauer der Experimente sein. Sie ließ der an Nährstoffmangel gewöhnten Lebensgemeinschaft vor der Küste Gran Canarias nur unzureichend Zeit, sich an das plötzlich zunehmende Nahrungsangebot anzupassen. Die Meeresorganismen waren deshalb nicht in der Lage, den plötzlichen Futterüberschuss zu verwerten und die gut gepanzerten Kieselalgen und andere große Algenarten zu vertilgen. Das Studienergebnis wäre somit dem experimentellen Forschungsansatz geschuldet und obendrein auch für ortsfeste Pumpen zu erwarten, an denen das Oberflächenwasser vorbeiströmt und nur einmalig einen Nährstoffpuls erfährt. Ob diese Annahme stimmt, muss allerdings noch geprüft werden.

Außerdem fehlen weiterhin Antworten auf die Fragen, welche Risiken für das Leben im Meer mit künstlichem Auftrieb einhergehen und wie lange es zum Beispiel dauern würde, bis sich nach der Inbetriebnahme einer oder mehrerer Pumpen das lokale Ökosystem vollständig angepasst hätte und in der Lage wäre, die maximale Menge Kohlenstoff zu binden und in die Tiefe zu exportieren. Auch muss untersucht werden, welche Auswirkungen der Export kohlenstoffreicher Biomasse auf die Ökosysteme im tiefen Ozean haben könnte und wie die Tiefsee-Lebensgemeinschaften auf mögliche Veränderungen der Temperatur und Wassermassen-Schichtung reagieren.

In der Forschungsmission CDRmare führen Wissenschaftler:innen vielschichtige Experimente in den nährstoffarmen Gewässern vor der Küste Gran Canarias durch. Sie wollen dabei die Ergebnisse bisheriger Studien zum künstlichen Auftrieb überprüfen und auf mögliche weitere Einflussfaktoren testen. Dafür werden sie in den verwendeten Mesokosmen (schlauchartige, im Meer schwimmende »Riesen-Reagenzgläser« mit einem Fassungsvermögen von je 55.000 Litern) unter anderem den Auftriebsmodus, das Mischungsverhältnis zwischen Oberflächenwasser und nährstoffreichem Tiefenwasser sowie die Nährstoffverhältnisse im Tiefenwasser manipulieren. Ihr Ziel ist es, herauszufinden, bei welcher Grundkonstellation die Algen- und Zooplanktongemeinschaft den höchstmöglichen Kohlenstoff-Export erzeugt. Die gewonnenen Datensätze werden außerdem daraufhin untersucht, welche Risiken und Nebenwirkungen für das Ökosystem der Wassersäule entstehen könnten.

In Laborexperimenten gehen die Forschenden der Frage nach, welche Mechanismen bestimmte Planktonarten in die Lage versetzen, pro verfügbarer Nährstoffmenge besonders viel Kohlenstoff zu binden. Dazu führen die Wissenschaftler:innen Wachstums- und Fraßexperimente mit ausgewählten Planktonarten durch und untersuchen die Zusammensetzung ihrer Zellinhaltsstoffe in Abhängigkeit von den Kulturbedingungen.

Die Kombination aller erhobenen biologischen, physikalischen und chemischen Forschungsdaten soll anschließend Aufschluss darüber geben, wie ein natürliches Ökosystem auf künstlichen Auftrieb reagiert. Mithilfe der Datensynthese wollen die Wissenschaftler:innen zudem die natürlichen Gesetzmäßigkeiten zwischen Auftriebsmodus und -intensität sowie Nährstoffverhältnissen und -konzentrationen im Auftriebswasser identifizieren. Dieses Wissen wird benötigt, um die biogeochemischen Auswirkungen des künstlichen Auftriebes zu parametrisieren und in Erdsystemmodelle zu integrieren.

Kann künstlicher Auftrieb auch in einer wärmer werdenden Welt wirkungsvoll die Kohlenstoffaufnahme des Meeres verstärken?

Mit zunehmendem Klimawandel werden die Weltmeere wärmer, saurer und sauerstoffärmer – Veränderungen, die das Leben im Meer nachhaltig beeinflussen. Global betrachtet wird zum Beispiel die Biomasseproduktion der Meere abnehmen, sodass sich die Frage stellt, ob Verfahren zum künstlichen Auftrieb langfristig auch in einer noch wärmeren Welt die Kohlenstoffaufnahme des Ozeans verstärken können.

Erste Computersimulationen liefern überraschende Erkenntnisse. Demnach steigt das Kohlendioxid-Entnahmepotenzial durch künstlichen Auftrieb mit jedem Grad zusätzlicher Erwärmung, ganz ungeachtet der abnehmenden Biomasseproduktion infolge von Meerenserwärmung, -versauerung und Sauerstoffverlusten. Verantwortlich dafür ist die oben beschriebene physikalische Kohlenstoffpumpe – also die Lösung von Kohlendioxid im Oberflächenwasser kalter Meeresregionen.

Sie würde laut Modellrechnungen in einer wärmeren Welt auf dreifache Weise von großflächigen Einsätzen des künstlichen Auftriebs profitieren: Erstens würde der Auftrieb kalten Tiefenwassers zu einer Abkühlung der oberflächennahen Luftschichten führen und gleichzeitig die Temperatur des Oberflächenwassers verringern. Zweitens speichert das Tiefenwasser der Ozeane bisher nur Kohlenstoff aus natürlichen Kohlendioxid-Quellen. Es hat demzufolge noch genügend Puffer-Kapazitäten, um zusätzliches Kohlendioxid aufzunehmen und dazu beizutragen, schwer vermeidbare Kohlendioxid-Emissionen des Menschen zu kompensieren. Drittens ist die Alkalinität des Tiefenwassers in einigen Meeresregionen höher als jene des Oberflächenwassers. Künstlicher Auftrieb würde dort zu einer Alkalinitätserhöhung

im Oberflächenwasser führen, was eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme erlaubt, der entsprechenden Versauerung jedoch entgegenwirken würde.

Welche der beiden Kohlenstoffpumpen im Hinblick auf künstlichen Auftrieb die wichtigste ist und wie sich deren Kohlendioxid-Entnahmepotenzial im Zuge des Klimawandels verändert, ist jedoch noch nicht eindeutig geklärt.

In der Forschungsmission CDRmare kombinieren Forschende ein globales biogeochemisches Ozean-Modell mit einem Ökosystemmodell, sodass sie die Kohlenstoff-Flüsse und Veränderungen der Meereschemie im Zuge von künstlichem Auftrieb simulieren können. Diese Fähigkeit versetzt sie in die Lage, gleich drei Fragestellungen zu untersuchen. Erstens berechnen sie anhand lokaler Beobachtungen eines kleinräumigen, gepulsten künstlichen Auftriebs, welche Effekte großflächigere Einsätze auf der regionalen und globalen Ebene haben würden. Zweitens führen sie eine Reihe numerischer Modellexperimente für ausgewählte Kohlendioxid-Emissions- und Klimaszenarien durch, um herauszufinden, wie sich der fortschreitende Klimawandel auf die Leistungsfähigkeit der biologischen und physikalischen Kohlenstoffpumpe auswirken wird. Drittens analysieren sie die einzelnen, im Hintergrund ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse, in welche künstlicher Auftrieb eingreift, um negative Nebeneffekte auf den Ozean zu identifizieren – etwa Veränderungen des Sauerstoffgehalts. Alle gewonnenen Erkenntnisse fließen anschließend in die wirtschaftliche Bewertung der Verfahren ein.

Wäre der Einsatz von Verfahren zum künstlichen Auftrieb eine klimapolitisch und wirtschaftlich sinnvolle Entscheidung?

Die Wissenschaft untersucht Ansätze und Ideen für den Kampf gegen den Klimawandel mithilfe integrierter Bewertungsmodelle. Diese Modelle werden entwickelt, um zu verstehen, wie sich bestimmte gesellschaftliche oder ökonomische Entwicklungen auf die Natur und das Klima auswirken. Aus diesem Grund fließen in jedes dieser Modelle sowohl Informationen zum System Erde als auch zur Gesellschaft ein. Das heißt, die Modelle berücksichtigen Naturgesetze ebenso wie Verhaltensveränderungen der Menschen und berechnen auch unerwünschte Nebenwirkungen oder aber beabsichtigte Vorteile bestimmter Maßnahmen und Entscheidungen. Bislang existiert allerdings kein Bewertungsmodell, welches Verfahren zum künstlichen Auftrieb sowie deren Vor- und Nachteile für Mensch und Natur abbilden kann. Das heißt, der Nutzen künstlichen Auftriebs für ein Erreichen der Klima- und Entwicklungsziele kann noch nicht genauer bestimmt werden.

In der Forschungsmission CDRmare entwickeln Forschende ein globales integriertes Bewertungsmodell, welches die biologischen Prozesse und die regional unterschiedliche Kohlendioxid-Aufnahme infolge künstlichen Auftriebs darstellen kann und somit eine ökonomische und klimapolitische Bewertung der Methode auf globaler Ebene ermöglicht. Außerdem untersuchen sie mithilfe eines ökologisch-ökonomischen Regionalmodells, welche Folgen und welchen wirtschaftlichen Nutzen ein Einsatz künstlichen Auftriebs für die Fischerei vor der Küste Gran Canarias hätte.

Basierend auf diesen Analysen nehmen die Expert:innen dann eine wirtschaftliche Bewertung verschiedener Auftriebsszenarien vor. Anschließend fassen sie ihre Erkenntnisse über den Nutzen des künstlichen Auftriebs für Klima, Natur und Mensch zusammen und leiten daraus Handlungsoptionen für Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft ab. 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.

Wäre ein Einsatz von Auftriebspumpen im Ozean überhaupt rechtlich zulässig und wenn ja, wer dürfte unter welchen Bedingungen die entsprechende Genehmigung erteilen?

Die rechtlichen Rahmenbedingungen eines Einsatzes von künstlichem Auftrieb sind bislang noch nicht klar definiert. Es stellt sich zum Beispiel die Frage, ob das Ausbringen vieler Auftriebspumpen gegen geltendes Recht verstoßen würde und ob ein Einsatz überhaupt genehmigungsbedürftig wäre – und wenn ja, wer unter welchen Bedingungen eine Genehmigung erteilen dürfte. Erschwerend kommt hinzu, dass es sich bei künstlichem Auftrieb um eine Aktivität im Meer handelt, die rechtlich in den Regelungsrahmen des Seevölkerrechts fällt, in der Sache aber auf die Erhöhung des Kohlendioxid-Aufnahmepotenzials des Ozeans abzielt und somit ein Klimaschutzrechtliches Ziel verfolgt.

Im Rahmen der Forschungsmission CDRmare wollen Forschende Klarheit und Rechtssicherheit in Sachen künstlicher Auftrieb schaffen. Rechtswissenschaftler:innen überprüfen die juristischen Rahmenbedingungen großangelegter Pumpen-Einsätze zur Steigerung der Kohlendioxid-Aufnahme des

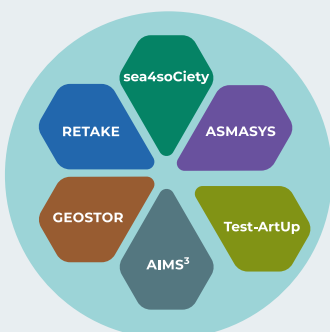
Meeres. Relevante Konventionen und Prinzipien sind hierbei das Londoner Protokoll sowie das deutsche Gesetz über das Verbot der Einbringung von Abfällen und anderen Stoffen und Gegenständen in die Hohe See.

Darüber hinaus analysieren die Expert:innen, inwiefern Einsätze zum künstlichen Auftrieb völkerrechtlich reguliert werden könnten, welche Entscheidungsbefugnisse einzelne Staaten besitzen und auf welche Weise Maßnahmen zum künstlichen Auftrieb in das internationale Meeresumweltschutz- und Klimaschutzrecht integriert werden können, ohne andere Formen der Meeresnutzung sowie Belange des Umwelt- und Artenschutzes zu gefährden. Dabei wollen die Forschenden herausfinden, welche Änderungen der rechtlichen Übereinkommen und Prinzipien vorgenommen werden müssten, um ein angemessenes Regelwerk für die Steuerung des künstlichen Auftriebs zu schaffen.



Um die Reaktion des Phyto- und Zooplanktons auf das heraufgepumpte nährstoffreiche Tiefenwasser unter realistischen Bedingungen zu testen, setzen die Wissenschaftler:innen sogenannte Mesokosmen ein. Dahinter verbergen sich schlauchartige, im Meer schwimmende Röhren, die mit Meerwasser gefüllt sind, aber nicht im Wasseraustausch mit ihrer Umgebung stehen.

Foto: Michael Sswat, GEOMAR/CDRmare



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



test-artup.cdrmare.de

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 Alkalinitätserrhöhung. Die Forschungsmission CDRmare untersucht die Potenziale, Machbarkeit und Nebenwirkungen der verschiedenen Verfahren.



Kreidefelsen auf Rügen. Ein Beispiel natürlicher Erosion und Verwitterung.

Die Gesetze der Meereschemie

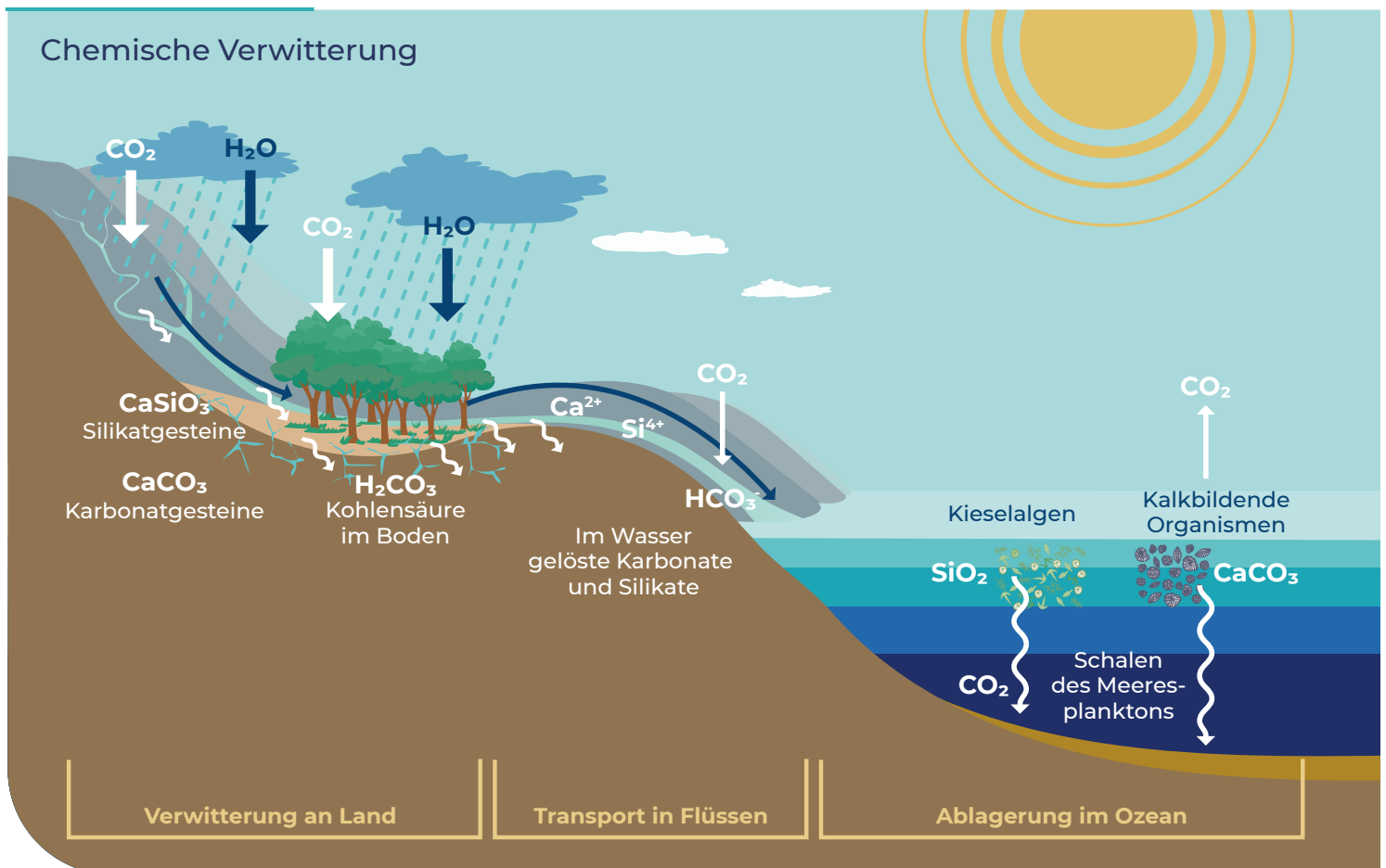
Der Ozean ist ein gigantischer Kohlenstoffspeicher: Seine Wassermassen enthalten heute schon mehr als 50-mal so viel Kohlenstoff wie die Erdatmosphäre. In den zurückliegenden Jahrzehnten hat der Ozean ein Viertel der vom Menschen verursachten Kohlendioxid-Emissionen aufgenommen und die Erderwärmung so maßgeblich gebremst.

Die Aufnahme des Kohlendioxids erfolgt an der Meeresoberfläche und ist möglich, weil zwischen dem Oberflächenwasser und der Atmosphäre ein ständiger Gasaustausch stattfindet. Druckunterschiede zwischen dem im Meerwasser gelösten Kohlendioxid und dem Kohlendioxid der Atmosphäre werden so ausgeglichen. Steigt die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre, nimmt daher auch der Ozean mehr Kohlendioxid auf.

Sowie sich Kohlendioxid im Meerwasser löst, durchläuft ein Großteil des Gases eine Abfolge chemischer Reaktionen. Dabei wird das gelöste Gas, welches jederzeit wieder in die Atmosphäre entweichen könnte, in Form von Hydrogencarbonaten und Karbonaten chemisch im Meerwasser gebunden. Als solche ist ein erneutes Ausgasen in die Atmosphäre ausgeschlossen. Gleichzeitig sinkt durch die chemische Reaktion die Konzentration des im Oberflächenwasser gelösten Kohlendioxids und der Ozean kann bis zu einem gewissen Maß wieder neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen.

Allerdings entstehen im Zuge dieser Reaktionskette auch sogenannte Protonen (Wasserstoffionen), die den Ozean versauern lassen, wenn sie freigesetzt werden. In welchem Umfang sie freigesetzt werden, hängt vom Säurebindungsvermögen des Wassers ab. Expert:innen sprechen an dieser Stelle auch vom Alkalinitätsgrad.

Die Alkalinität des Meerwassers wird in erster Linie durch die Menge säurebindender Bestandteile mineralischer Herkunft bestimmt (Hydrogencarbonat, Karbonat, Borat), die zuvor im Laufe vieler Jahrmillionen aus verwittertem Gestein an Land gelöst und vom Regenwasser über Bäche und Flüsse in das Meer eingetragen wurden. Ist ihr Anteil hoch, wird eine Vielzahl der Protonen gar nicht erst freigesetzt, sondern im Zuge der Kettenreaktion sofort durch die eingetragenen Minerale gebunden. Das bedeutet, die Versauerung des Wassers wird abgepuffert. Enthält das Wasser jedoch nur wenige Minerale, ist sein Säurebindungsvermögen begrenzt. Die Zahl der freien Protonen steigt und das Meer versauert zunehmend, was eine Verschlechterung der Lebensbedingungen für viele Meeresbewohner bedeutet.



Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

Der Alkalinitätsgrad des Meerwassers wird durch zwei grundlegende Prozesse bestimmt: zum einen durch den Eintrag von im Wasser gelösten, säurebindenden Lösungsprodukten der Gesteinsverwitterung; zum anderen durch die natürliche Aufnahme und Weiterverarbeitung dieser Lösungsprodukte durch Meeresbewohner wie kalkbildende Organismen (Karbonate) oder aber Kieselalgen (Silikate), wobei bei der Kalkbildung (CaCO₃) ein Teil des vorher gebundenen Kohlendioxids (CO₂) wieder freigesetzt wird.

Die Idee: Eine Beschleunigung der natürlichen Verwitterung

Die Gesteinsverwitterung und damit einhergehende Lösung der enthaltenen Minerale im Meer sind vergleichsweise langsam ablaufende natürliche Prozesse und beeinflussen das Klima der Erde über Zeiträume von tausenden Jahren und mehr. Pro Jahr entfernen sie 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 diese Kohlendioxid-Entnahme zu steigern und so unvermeidbare Kohlendioxid-Rest-Emissionen der Menschheit auszugleichen, müsste die natürliche Verwitterung etwa um den Faktor 5 beschleunigt werden.

Modellstudien zufolge wäre eine Steigerung durchaus möglich, wenn die natürliche Gesteinsverwitterung beschleunigt und der Alkalinitätsgrad des Meerwassers gezielt erhöht würde. Ein solcher Eingriff in die Meereschemie hätte den Vorteil, dass der Ozean mehr Kohlendioxid aufnehmen könnte, ohne dabei weiter zu versauern. Zugleich ließe sich in Meeresregionen mit einer hohen Ozeanversauerung dieser für viele Meeresorganismen schädliche chemische Prozess umkehren, was die Wiederherstellung von Korallenriffen und Muschelbänken erleichtern könnte.

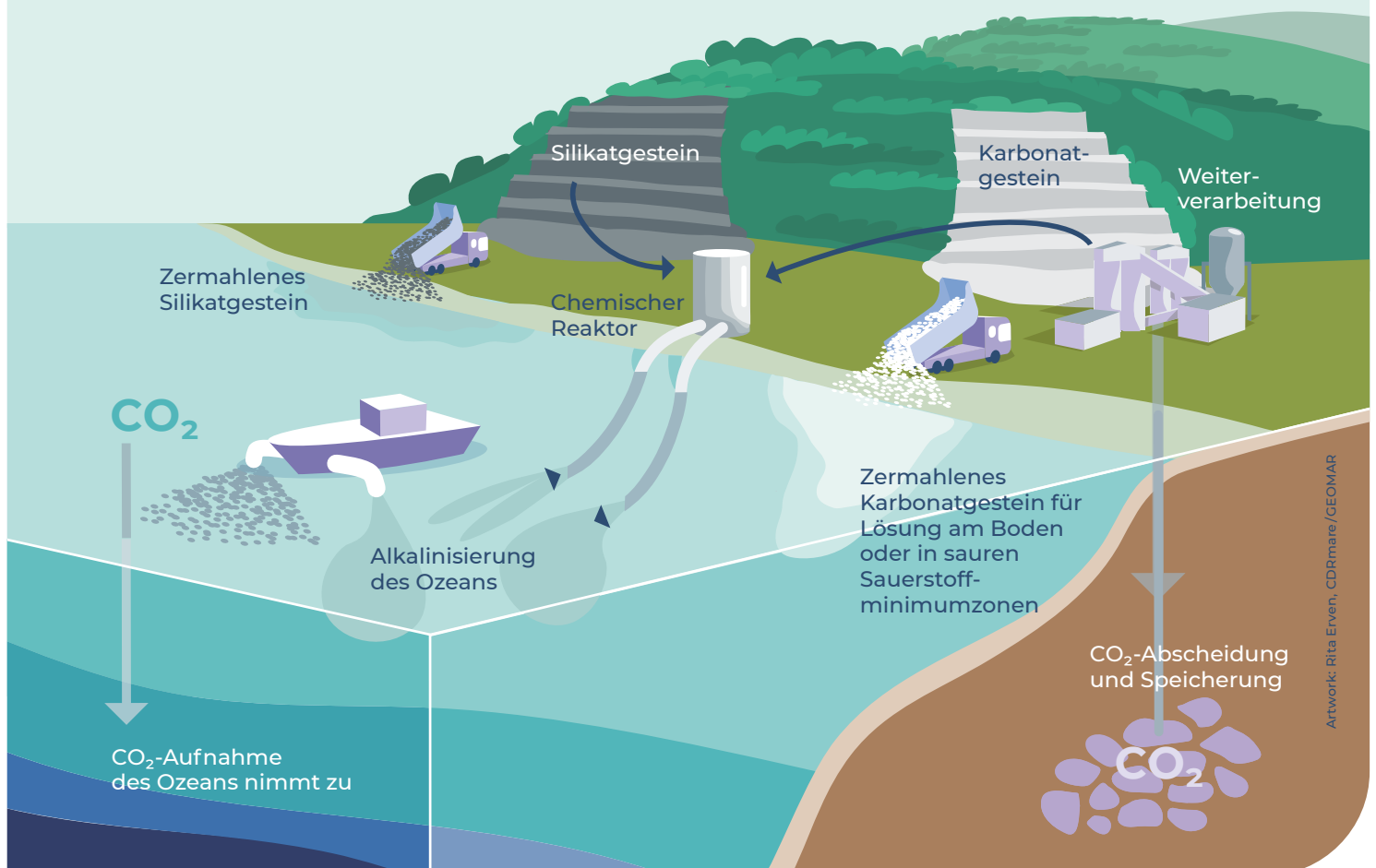
Alkalinitätserhöhung im Ozean

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

Skalierbarkeit:
Eine **Kohlendioxid-Entnahme im industriellen Maßstab ist theoretisch möglich**. Verfahren zur Alkalinitätserhöhung werden z.B. in der Lausitz bei der Sanierung (Neutralisation) saurer Tagebauseen bereits praktisch angewendet.

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**.



Alkalinitätserhöhung: 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. Dazu gehören Überlegungen, Kalkstein und Kreide oder silikat-haltige Gesteine wie Basalte und Olivin an Land abzubauen, anschließend zu zermahlen, um auf diese Weise die Oberfläche für eine Verwitterung (chemische Reaktionen) zu vergrößern, und das Gesteinsmehl an Stränden oder aber direkt auf dem Meer zu verteilen. Für denselben Zweck könnten auch Reststoffe oder Abfallprodukte aus der Zementherstellung verwendet werden.

Ein zweiter Ansatz zielt darauf ab, chemische Reaktoren an der Küste oder auf Schiffen oder Plattformen im Meer zu installieren.

In diesen Reaktoren würde das Gesteinsmehl unter kontrollierten Bedingungen besonders schnell verwittern und eine alkalische Lösung erzeugen, die anschließend in das Meer geleitet werden würde. Dadurch würde sich vor allem die Konzentration der Hydrogenkarbonate und, je nach verwittertem Gestein, der Anteil an Kalzium, Magnesium oder auch Silikat im Meerwasser erhöhen.

All diese Verbindungen sind bereits heute in hohen Konzentrationen im Meerwasser enthalten, so dass die relativen Änderungen durch einen gezielten Mineraleintrag im Bereich weniger Prozente lägen. Die Auswirkungen dieser Konzentrationsänderungen auf die marinen Ökosysteme müssen dennoch genau untersucht werden.

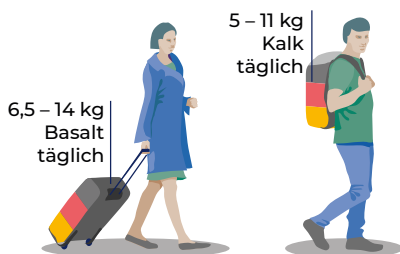
Aussagekräftige Labor- oder Feldstudien zu Risiken und Nebenwirkungen fehlen

Ein Großteil des Wissens über die chemischen und biologischen Folgen einer Alkalinitätserhöhung stammt bisher aus Modellstudien (Computersimulationen). Aussagekräftige Labor- oder Feldstudien zu lokalen, regionalen und globalen Auswirkungen eines Mineraleintrages im industriellen Maßstab auf den Men-

schen und die Umwelt fehlen jedoch bislang. Die Wissenschaft steht deshalb vor einer Vielzahl wichtiger Fragen, die im Rahmen der interdisziplinären Forschungsmission CDRmare beantwortet werden sollen.

Wie viele Tonnen Gestein würden benötigt, um Rest-Emissionen durch eine Alkalinitätserhöhung auszugleichen und welche der angedachten Verfahren sind am vielversprechendsten?

Fest steht: Für eine klimawirksame Alkalinitätserhöhung des Oberflächenwassers würden viel Gestein oder alkalische Mineralprodukte benötigt. Bisherige Schätzungen gehen davon aus, dass in der Praxis pro Tonne gebundenen Kohlendioxids eine halbe bis fünf Tonnen Mineralprodukte zum Einsatz kommen müssten.



Wenn man annimmt, dass Deutschland auch im Jahr 2045 noch immer Rest-Emissionen in Höhe von jährlich 60 bis 130 Millionen Tonnen Treibhausgasen ausstoßen wird, entfällt auf jeden einzelnen der 83,2 Millionen Einwohnenden ein Anteil von 0,7 bis 1,5 Tonnen. Würden nun alle

Bürger:innen diese Rest-Emissionen allein durch eine Alkalinitätserhöhung des Ozeans kompensieren wollen, müsste jeder von ihnen pro Tag 6,5 bis 14 Kilogramm Basalt oder 5 bis 11 Kilogramm Kalk im Meer auflösen. Auf die Gesamtbevölkerung Deutschlands hochgerechnet, entstünde demzufolge ein zusätzlicher Basaltbedarf von 200 bis 416 Millionen Tonnen bzw. ein Kalkbedarf von 150 bis 312 Millionen Tonnen pro Jahr. Würden die Men-

schen die Kompensation hingegen auf mehrere Kohlendioxid-Entnahme-Methoden aufteilen, wäre der Gesteinsbedarf entsprechend kleiner.



Kreideabbau in Lägerdorf.
Foto: Joachim Müllerchen, Wiki Commons

Kalk- und Silikatgesteine sind weltweit im ausreichenden Maße verfügbar. Letztere sind sogar die häufigsten Gesteine der Erdkruste. Unklar ist bisher allerdings, welcher Energieaufwand und welche Investitionen notwendig sein würden, um die Gesteine im industriellen Maßstab abzubauen, zu verarbeiten, an die Küste und später auf das Meer hinaus zu transportieren und welche Treibhausgasemissionen dabei entstünden.

Von Kalkgestein weiß man, dass es sich nicht im Meerwasser löst, da das Oberflächenwasser des Ozeans mit Karbonaten in der Regel chemisch übersättigt ist. Eine Ausnahme bilden saure und sauerstoffarme Wassermassen, die zum Beispiel in einigen tiefen Gebieten der Ostsee vorkommen. Auch das Wasser in Oberflächensedimenten ist häufig sehr sauer, so dass dort ebenfalls Kalk gelöst werden kann. Mit Silikaten ist das Meerwasser dagegen flächendeckend untersättigt, weshalb sich Silikatgestein prinzipiell auflösen würde. Um die Alkalinität des Ozeans möglichst schnell zu erhöhen, müsste das Silikatgestein zu einem sehr feinen Pulver zermahlen und in flachen Küstengewässern verteilt oder aber in chemischen Reaktoren im Meerwasser aufgelöst werden.

Kalk- und Silikatgestein sind jedoch nicht die einzigen Optionen. Mittlerweile gibt es vielversprechende, aus Gesteinen extrahierte Minerale wie Magnesium-Kalzium-Minerale, deren Gewinnung oder Herstellung weniger Energie benötigt als der Abbau und die Verarbeitung von Kalk- und Silikatgestein.

In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Forschende verschiedene Materialien und Verfahren zur Alkalinitäts-erhöhung des Ozeans in Hinblick auf ihr Potenzial und ihre Auswirkungen auf die Meeresumwelt, ihre technische Umsetzung und den jeweiligen Kostenrahmen – angefangen beim Eintrag von Gesteinsmehl, über die Herstellung möglichst optimaler alkalischer Lösungen bis hin zum Verteilen mineralhaltiger Materialien an Stränden und Felsküsten. Sie erforschen zum Beispiel, welche Materialien am schnellsten verwittern und testen dabei auch neue Stoffe auf ihre Eignung.

Auch die spontane Bildung neuer Minerale bei der Auflösung von Silikatgesteinen wird untersucht, da die Effizienz der Kohlendioxid-Aufnahme durch diese Mineralneubildungen verringert werden kann. Analysiert wird zudem, welche Mengen des jeweiligen Materials eingesetzt werden müssten und ökologisch vertretbar eingesetzt werden könnten; wie teuer ihre Herstellung, ihr Transport und ihr Einsatz wären, welche unerwünschten Inhaltsstoffe bei ihrer Lösung im Meerwasser freigesetzt würden und wie sich deren Menge reduzieren ließe. Außerdem berechnen die Wissenschaftler:innen, in welchen Mengen und auf welcher Meeresfläche die jeweiligen Materialien eingesetzt werden müssten, wenn durch eine Alkalinitäts-erhöhung des Ozeans ein bedeutsamer Beitrag zum Ausgleich der RestEmissionen geleistet werden soll.



Basaltgestein.

Foto: Zorion, Wiki Commons

Für wie lange würde der Ozean die zusätzlich aufgenommene Menge Kohlendioxid speichern?

Als Folge der Alkalinitäts-erhöhung kann das Oberflächenwasser mehr Kohlendioxid aufnehmen, welches chemisch gebunden und anschließend vor allem in Form von Hydrogenkarbonat gespeichert wird. Die im Oberflächenwasser gelösten Hydrogenkarbonate und weitere Lösungsprodukte der Verwitterung werden von den Meeresströmungen im gesamten Ozean verteilt und dabei selbst bis in sehr große Wassertiefen verfrachtet. Auf diese Weise wird der gesamte Ozean zum Speicher des an der Oberfläche eingetragenen Kohlenstoffs. Bis das kohlenstoffreiche Wasser eines Tages wieder auf natürlichem Wege an die Meeresoberfläche zurückkehrt, vergehen je nach Wassertiefe und Strömungsrichtung Jahrzehnte bis Jahrhunderte.

Bislang steigt in den sogenannten Auftriebsgebieten der Erde kontinuierlich Wasser an die Meeresoberfläche, dessen Alkalinität noch nicht vom Menschen erhöht wurde. Es besäße daher noch das volle Aufnahmepotenzial für eine gezielte Erhöhung der Alkalinität und die daraus resultierende Kohlendioxid-Auf-

nahme. Und selbst wenn eines Tages Wassermassen wieder an die Oberfläche steigen werden, die bereits vom Menschen freigesetztes Kohlendioxid in Form von gelöstem Kohlendioxid oder aber Hydrogenkarbonat gespeichert haben, so bleiben die Hydrogenkarbonate im Wasser erhalten, über einen Zeitraum von bis zu 100.000 Jahren. Das heißt, der in ihnen gebundene Kohlenstoff könnte nicht in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre ausgasen. Entweichen würde nur das gelöste Kohlendioxid.

Wie lange die zusätzlichen Hydrogenkarbonate im Ozean gelöst bleiben, hängt vor allem von chemischen und biologischen Prozessen ab: Durch die höhere Alkalinität verringert sich der (Kohlen-)Säuregehalt des Wassers, was zu einer verringerten Auflösung von Kalksedimenten am Meeresboden führt und es kalkbildenden Arten möglicherweise auch erleichtert, Kalkschalen zu produzieren. Es werden also weniger Kalksedimente aufgelöst und tendenziell mehr Kalkschalen gebildet.

Kalkbildung wiederum ist der umgekehrte Prozess der Verwitterung. Bei der chemischen Reaktion werden Hydrogenkarbonate verbraucht, wodurch sich die Alkalinität des Meerwassers verringert und gelöstes Kohlendioxid produziert wird. Letzteres hat eine Erhöhung der Kohlendioxid-Konzentration im Wasser zur Folge. Beim nächsten Kontakt mit der Meeresoberfläche kann dieses gelöste Kohlendioxid in die Atmosphäre entweichen.

Diese chemischen Auswirkungen auf die Kalklösung und -bildung stellen somit Leckagen des eingespeicherten Kohlenstoffs dar. Die Lösung von Kalksedimenten geschieht auf Zeitskalen von zehntausenden Jahren, die Bildung von Kalkschalen in Organismen kann innerhalb weniger Tage erfolgen, beispielsweise wenn die Umweltbedingungen Kalkalgenblüten erlauben. Es kann daher ganz entscheidend sein, in welchen Meeresregionen der Welt mögliche Maßnahmen zur Alkalinitätserhöhung durchgeführt werden.

Eine wiederholte Alkalinitätserhöhung von Wassermassen, die bereits alkalisiert wurden, könnte schließlich zu einer Übersättigung und einem spontanen Ausfällen von Kalk führen, wobei

Kohlendioxid wieder freigesetzt werden würde. Die Alkalinitätserhöhung als Maßnahme zur Steigerung der natürlichen Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres könnte daher vermutlich »nur« für viele Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte durchgeführt werden. Dennoch dürfte ein solcher Einsatz ausreichen, um die Rest-Emissionen auszugleichen und damit das Klima zu stabilisieren.

In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen, wie viel zusätzliches Kohlendioxid der Ozean im Zuge einer gezielten Alkalinitätserhöhung aufnehmen könnte und für wie lange dieses Kohlendioxid im Meer gespeichert werden würde. Dazu modellieren sie den lokalen aber auch den großflächigen Einsatz entsprechender Verfahren in verschiedenen Meeresregionen der Welt – unter anderem in deutschen und europäischen Küstengewässern sowie in der Labradorsee und im Südlichen Ozean. Letztere sind Meeresregionen, in denen bodennahes Tiefenwasser gebildet wird, dessen Wassermassen für Jahrhunderte bis Jahrtausende im tiefen Ozean zirkulieren, bevor sie wieder zur Meeresoberfläche aufsteigen und in den Gasaustausch mit der Atmosphäre gehen können.

Welche Risiken und Nebenwirkungen einer Alkalinitätserhöhung sind bekannt und wie ließen sich diese minimieren?

Über die Risiken und möglichen Umweltbelastungen aller mit einer Alkalinitätserhöhung verbundenen Maßnahmen und Prozesse weiß man bislang wenig. Bekannt ist zum einen, dass der Abbau von Mineralen in Steinbrüchen häufig zu Nutzungskonflikten um das betroffene Land, zu Eingriffen in lokale Ökosysteme sowie zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen und einer steigenden Lärm- und Staubbelastung führt. Zum anderen weiß man, dass Silikatgesteine bestimmte Nährstoffe (Silizium, Eisen) und Schwermetalle (Nickel, Chrom, Zink) enthalten. Erstere können das Wachstum bestimmter Algen (insbesondere Kieselalgen) und marine Nährstoffkreisläufe beeinflussen. Letztere könnten giftig wirken und somit schädliche Auswirkungen auf die Ökosysteme des Ozeans haben. Es besteht jedoch die Hoffnung, dass sich durch die Herstellung synthetischer Minerale schädliche Nebenwirkungen einer Alkalinitätserhöhung verhindern ließen. Detailwissen zu den jeweiligen Auswirkungen auf die chemischen und biologischen Prozesse des Meeres aber fehlt bislang weitestgehend.

In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen in verschiedenen Labor und Mesokosmen-Experimenten, inwiefern der Eintrag mineralhaltigen Materials oder aber die Verwitterung von Gestein am Meeresboden die Küstenökosysteme der Nord- und Ostsee beeinflussen würde und bis zu welchen Schwellenwerten sich negative Effekte der Alkalinitätserhöhung für die Lebensgemeinschaften des Meeres verhindern ließen. Dafür analysieren sie die physiologischen und ökologischen Reaktionen von Schlüsselarten wie Phyto- und Zooplankton sowie ausgewählter Organismen, die am oder im Meeresboden leben. Die sogenannten Mesokosmen – gemeint sind in sich geschlossene Meerwasserbecken, deren Umweltparameter verändert werden können – erlauben Experimente unter realistischen Bedingungen, in denen die Dynamiken erfasst werden können, die sich aus den Wechselwirkungen zwischen den Organismen und ihrer physikalischen und chemischen Umgebung ergeben.

Die lokalen Forschungsergebnisse werden mit Hilfe numerischer Modelle auf die regionale und globale Ebene hochgerechnet und ein Einsatz von Maßnahmen zur Alkalinitätserhöhung in deutschen Hoheitsgewässern und in anderen Meeresgebieten simuliert. Auf diese Weise können die Expert:innen Risiken identifizieren, kritische Schwellenwerte benennen, Konzepte für Monitoringverfahren testen und entsprechende Handlungsoptionen für die lokale, nationale und internationale Ebene ableiten.



In solchen Mesokosmen werden die Reaktionen der Lebewesen am Meeresboden (Benthos) untersucht – daher werden die Becken auch Benthokosmen genannt.

Foto: Sonja Geilert, CDRmare/GEOMAR

Würde ein flächendeckender Einsatz von Verfahren zur Alkalinitätserhöhung negative Auswirkungen auf die Fischbestände haben?

Fisch und Meeresfrüchte gehören zu den am stärksten gehandelten Waren weltweit. Rund um den Globus sind etwa 3,3 Milliarden Menschen auf Fisch angewiesen, wenn sie sich ausgewogen ernähren und ausreichend tierisches Eiweiß zu sich nehmen wollen. Daher ist es wichtig, die potenziellen Auswirkungen einer Alkalinitätserhöhung auf die globalen Fischbestände zu kennen, bevor über einen möglichen Einsatz der verschiedenen Verfahren diskutiert wird.

In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen die möglichen Auswirkungen einer Alkalinitätserhöhung auf die Biomasseproduktion in den Weltmeeren – angefangen beim Phytoplankton bis hin zu den Fischpopulationen.

Dazu kombinieren sie Szenarien zur weiteren Klimaentwicklung mit Modellierungen zu einer Alkalinitätserhöhung im großen Maßstab. Anschließend analysieren sie, welche Folgen mögliche Populationszuwächse oder aber -einbrüche in bestimmten Meeresregionen auf die globalen Handelsströme hätten und welche Nationen im besonderen Maße profitieren oder aber Verluste hinnehmen müssten. Einen besonderen Fokus richten sie dabei auf die Fischbestände der Ost- und Nordsee. Hinter all dieser Forschung steht die große Frage, ob eine flächendeckende Alkalinitätserhöhung die Ernährungssicherheit in bestimmten Regionen der Welt gefährden und somit ein Erreichen des UN Nachhaltigkeitszieles »Kein Hunger« unmöglich machen würde.

Wie könnte eine durch Alkalinitätserhöhung erzielte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans gemessen und überwacht werden?

Eine Alkalinitätserhöhung des Ozeans ergibt nur Sinn, wenn sich die angestrebten Effekte auch messen und dem Mineraleintrag zuschreiben lassen. Expert:innen sprechen in diesem Zusammenhang von der Verifikation und Attribution einer Veränderung – in diesem Fall einer veränderten Alkalinität und Erhöhung des Kohlenstoffgehalts des Meeres. Diese zu messen, von natürlichen Schwankungen zu unterscheiden und einzelnen Maßnahmen zuzuordnen, stellt eine große wissenschaftliche Herausforderung dar, für die es bislang keine verlässliche Methode gibt.

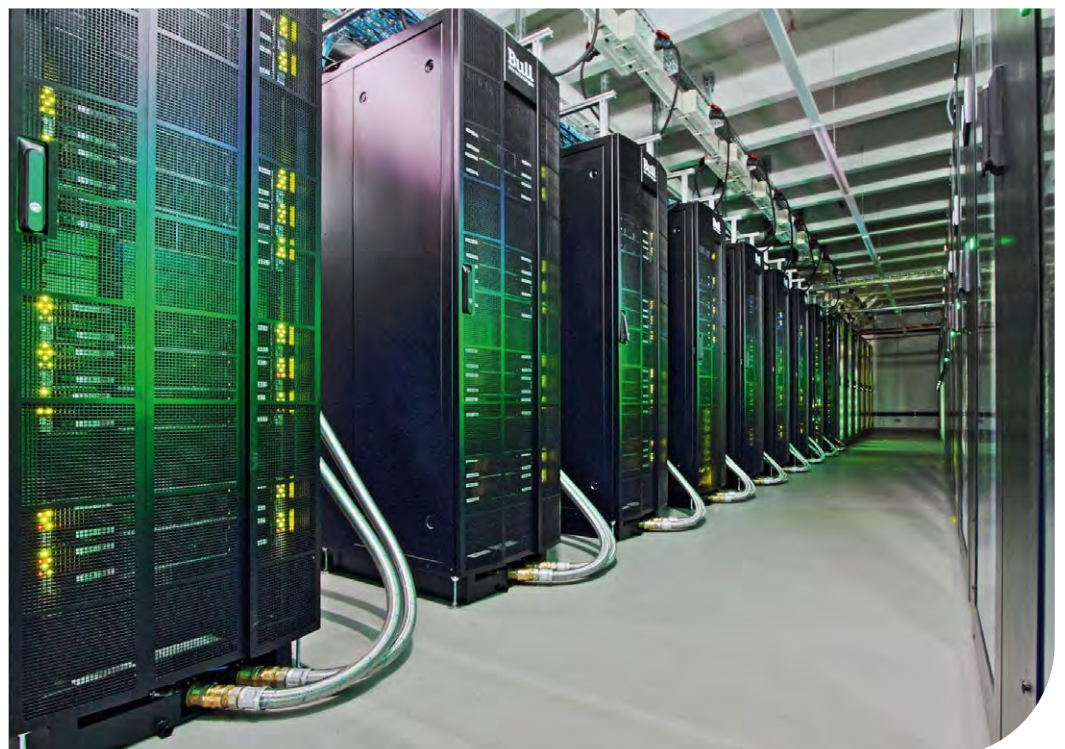
In der Forschungsmission CDRmare entwickeln Wissenschaftler:innen Überwachungsstrategien, mit denen sich Auswirkungen einer Alkalinitätserhöhung des Meeres nachweisen und zuordnen lassen. Dazu führen sie zum einen chemische Messungen, statistische Analysen, Modellierungen und Prozessbeobachtungen durch, auf deren Basis das Prozessverständnis

verbessert wird, sodass Aussagen zur Verifikation und Attribution einer künstlichen Alkalinitätserhöhung getroffen werden können. Zum anderen simulieren die Wissenschaftler:innen den Einsatz verschiedener chemischer Verfahren in Küstenmodellen, welche Meeresregionen wie die Nordsee, die Ostsee, das Wattenmeer und den nordwesteuropäischen Schelf in einer räumlichen Auflösung von 10.000 bis zu 10 Metern abdecken. Dabei überprüfen sie, inwiefern die jeweiligen Methoden zur Alkalinitätserhöhung die Kohlenstoffaufnahme des Ozeans verändern und sich auf die Ökosysteme auswirken.

Auf Grundlage ihrer Ergebnisse sollen Entscheidungsträger:innen anschließend in der Lage sein, zu beurteilen, ob und wie sich eine mögliche Alkalinitätserhöhung mit den Zielen des Klima, Umwelt und Naturschutzes in Einklang bringen ließe.

Hochleistungsrechner wie diese Supercomputer des HLRN-Verbundes an der Universität Göttingen werden benötigt, um die großen Modellsimulationen zur Alkalinitätserhöhung des Meeres durchzuführen.

Foto: Gesellschaft für wissenschaftliche Datenverarbeitung mbH Göttingen (GWDC)



Welche globalen Auswirkungen hätte eine weiträumige Alkalinitätserhöhung?

Der Weltozean ist ein globales, zusammenhängendes System: Veränderungen in einem Meeresgebiet führen zu Wechselwirkungen mit anderen verknüpften Teilbereichen. Das gleiche gilt für wichtige Parameter der Meereschemie. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass lokale Veränderungen der Alkalinität Auswirkungen nach sich ziehen, die nicht nur weit über die Grenzen des betroffenen Meeresgebietes hinausgehen, sondern sich auch über sehr lange Zeiträume erstrecken können. Welche konkreten globalen Auswirkungen der lokale Eintrag von Mineralen aber nach sich ziehen könnte, ist bislang nicht genau geklärt.

In der Forschungsmission CDRmare stellen Wissenschaftler:innen daher einen globalen Zusammenhang her. Sie simulieren mithilfe globaler Modelle, die den gesamten Kohlenstoffkreislauf der Erde abdecken, wie viel mehr Kohlendioxid der Weltozean in ausgewählten Gebieten aufnehmen würde, wenn die Alkalinität in europäischen Küstengewässern sowie in ausgewählten Meeresregionen, in denen Tiefenwasser entsteht,

gesteigert würde. Außerdem gehen sie den Fragen nach, welche Folgen eine Alkalinitätserhöhung für das Kohlenstoffsystem in größeren Wassertiefen hätte und inwiefern sich ein weiterer Anstieg der atmosphärischen Kohlendioxid-Konzentration auf die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Alkalinitätserhöhung auswirken würde.

Durch Verwendung verschiedener Modelle und unterschiedlicher Einstellungen von nicht genau bekannten Modellparametern werden Modellunsicherheiten abgeschätzt. Wissen zu Modellunsicherheiten ist ein wichtiger Baustein für die Entwicklung sicherer Verfahren für das Monitoring, den Nachweis und die Zuordnung von Alkalinisierungsmaßnahmen. Gleichzeitig wird es benötigt, um Methoden zur »Kohlenstoff-Kontierung« zu entwickeln also Methoden der »Verbuchung« – sowie um die rechtlichen Rahmenbedingungen möglicher Einsätze zu definieren.

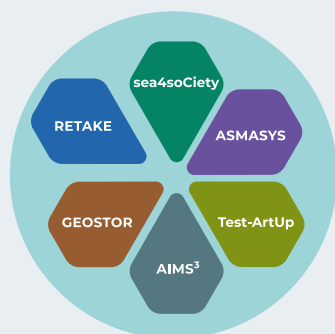
Würde sich die internationale Klimapolitik ändern, wenn ihre Akteure auf die Option einer Alkalinitätserhöhung zurückgreifen könnten und würde der mögliche Nutzen eines Einsatzes die entstehenden Kosten und Nebenwirkungen rechtfertigen?

Bei den internationalen Klimaverhandlungen ziehen Regierungen und Expert:innen häufig sozio-ökonomische Modelle zurate. Mit diesen lässt sich berechnen, welche wirtschaftlichen Gewinne und Verluste der Klimawandel auf unterschiedlichen Erwärmungsstufen mit sich bringen würde und ob sich Investitionen in Emissionsreduktionen am Ende auch tatsächlich auszahlen. Die Ergebnisse dieser Modellierungen sind somit ein wichtiges Werkzeug für die Entwicklung von Handlungsoptionen in der internationalen Klimapolitik.

Bislang sind solche Modelle jedoch nicht in der Lage, einen möglichen Einsatz verschiedener Verfahren zur Alkalinitätserhöhung des Ozeans in ihren Berechnungen zu berücksichtigen. Es ist deshalb völlig unklar, welche langfristigen Handlungsoptionen sich ergeben würden, wenn diese Verfahren eingesetzt würden. Würde eine Anwendung aus sozioökonomischer Perspektive Sinn ergeben oder wären andere Ansätze für eine verstärkte Kohlenstoffaufnahme des Meeres oder aber der Landflächen

zielführender und effektiver? Entsprechende Untersuchungen waren bislang nicht möglich, gerade weil Grundlagenwissen zu den Kosten, Risiken und Nebenwirkungen einer Alkalinitätserhöhung fehlten.

In der Forschungsmission CDRmare tragen Wissenschaftler:innen neues und altes Grundlagenwissen zu den verschiedenen Verfahren der Alkalinitätserhöhung zusammen und bauen es als neue Variable erstmals in ein sozioökonomisches Modell ein. Anschließend untersuchen sie, ob sich im Zuge der Modellberechnungen neue Handlungsoptionen für die Klimapolitik ergeben und welche dies wären. Außerdem analysieren die Expert:innen, inwiefern der Nutzen einer Alkalinitätserhöhung die dabei entstehenden Kosten und Nebenwirkungen rechtfertigen würde und ob andere Verfahren zur Stärkung natürlicher Kohlenstoffsenken besser geeignet wären als der großflächige Eintrag von Mineralen ins Meer.



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



retake.cdrmare.de

Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee

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

Die dauerhafte Speicherung von Kohlendioxid im Meeresuntergrund

Neben einer gezielten Verstärkung der natürlichen Kohlenstoffaufnahme des Ozeans gibt es weitere Optionen, schwer vermeidbare Rest-Emissionen der Menschheit auszugleichen. Eine lautet, Kohlendioxid im selben Umfang aus der Atmosphäre zu entnehmen. Anschließend muss das Gas sicher eingelagert werden. Einige der Rest-Emissionen lassen sich aber auch von vornherein vermeiden, indem ihre Freisetzung in die Atmosphäre verhindert wird. Dazu wird das Kohlendioxid an seiner Quelle abgeschieden und anschließend dauerhaft unterirdisch gespeichert. Fachleute bezeichnen diese technologische Option zur Vermeidung von

Kohlendioxid-Emissionen als Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (englisch: carbon capture and storage), kurz CCS.

Mit ihr sollen künftig Kohlendioxid-Emissionen der Industrie verhindert werden, die auch bei einem Einsatz erneuerbarer Energien nicht vermieden werden können. Die Einlagerung von Kohlendioxid im Untergrund ist zudem zentraler Bestandteil wichtiger landbasierter Kohlendioxid-Entnahmemethoden wie Direct Air Capture und Bioenergiegewinnung mit Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (BECCS).

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

Foto: Frederic Diercks, Pixabay

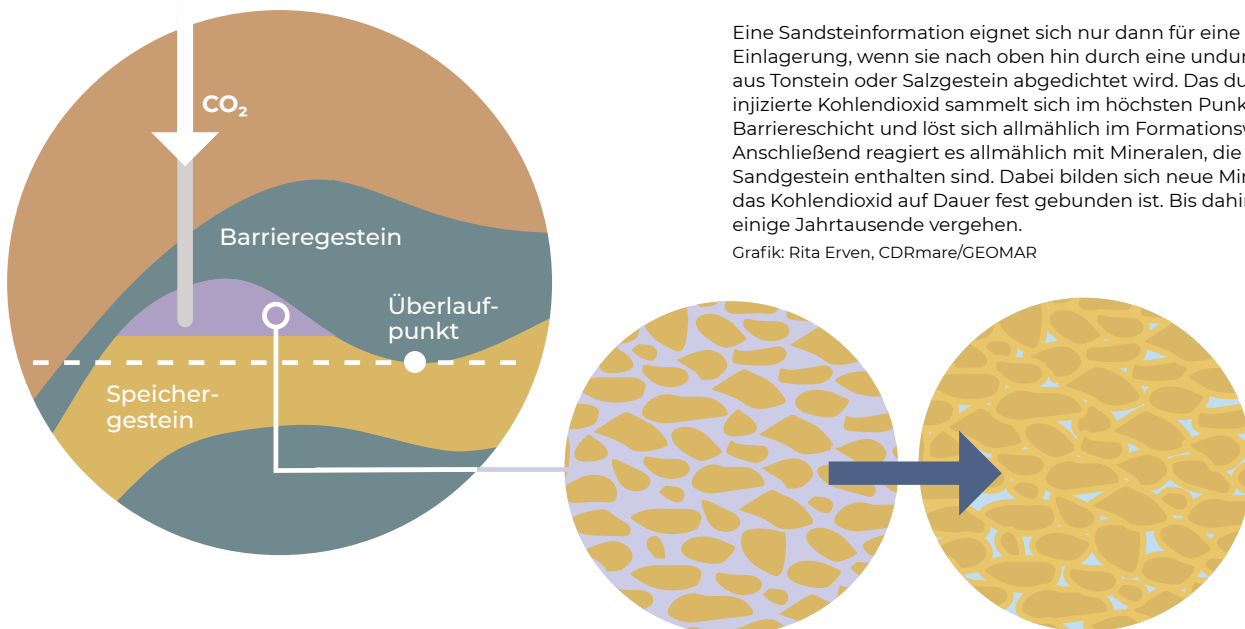


Als geologische Kohlendioxid-Speicher eignen sich in erster Linie Sandsteinformationen, die man sowohl an Land als auch im tiefen Untergrund der Schelfmeere (800 Meter und tiefer) findet. Diese Gesteinsschichten weisen Poren zwischen den einzelnen Sandkörnern auf, in denen sich das eingeleitete Kohlendioxid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

Erfüllt ein Speicherstandort diese und weitere geologische Voraussetzungen, kann das abgeschiedene Kohlendioxid komprimiert und über eine oder mehrere Bohrungen in die Speicherformationen injiziert werden. Dort breitet sich das Kohlendioxid in den mit salzigem Wasser gefüllten Gesteinsporen aus. Expert:innen nennen dieses salzige Porenwasser auch »Forma-

tionswasser, steigt es im Speichergestein auf, sammelt sich am höchsten Punkt unter der Barrierschicht und verbleibt so im Speichergestein.

Im Laufe der Zeit löst sich das Kohlendioxid im Formationswasser auf. Die dabei entstehende Lösung ist schwerer als Wasser, sodass 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, wenn 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, bis diese Prozesse abgeschlossen sind.



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

Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

Kohlendioxid-Speicherprojekte in der Nordsee

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

Einige Nordsee-Anrainerstaaten injizieren Kohlendioxid bereits heute tief in den Meeresuntergrund oder stehen kurz davor,

mit der Einleitung zu beginnen. Den Auftakt machte der norwegische Erdölkonzern Equinor (ehemals Statoil) im Jahr 1996: Nachdem die Regierung Norwegens eine landesweite Kohlendioxidsteuer eingeführt hatte, wurde das im Erdgas enthaltene Kohlendioxid nicht mehr in die Atmosphäre freigesetzt, sondern vor Ort auf der Offshore-Produktionsplattform abgetrennt und in eine Sandsteinformation tief unter der Plattform injiziert.

Andere Firmen und Länder folgen nun diesem Beispiel, denn aufgrund der steigenden Preise für Kohlendioxid-Emissionszertifikate wird die Speicherung des Treibhausgases im tiefen Meeresuntergrund allmählich zum lohnenden Geschäft. Eine

Tonne Kohlendioxid abzuscheiden, über eine Pipeline in das Meeresgebiet hinauszuleiten und dort im Untergrund zu verpressen, kostet schätzungsweise 80 bis 200 Euro. Zertifikate zur Emission der gleichen Menge Kohlendioxid in die Atmosphäre kosteten im Jahr 2022 etwa 80 Euro. Derzeit werden mehrere

neue Projekte zur Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der Nordsee geplant und umgesetzt – so zum Beispiel vor der Küste Rotterdams (Niederlande), unter der dänischen und britischen Nordsee sowie unter norwegischen Gewässern.

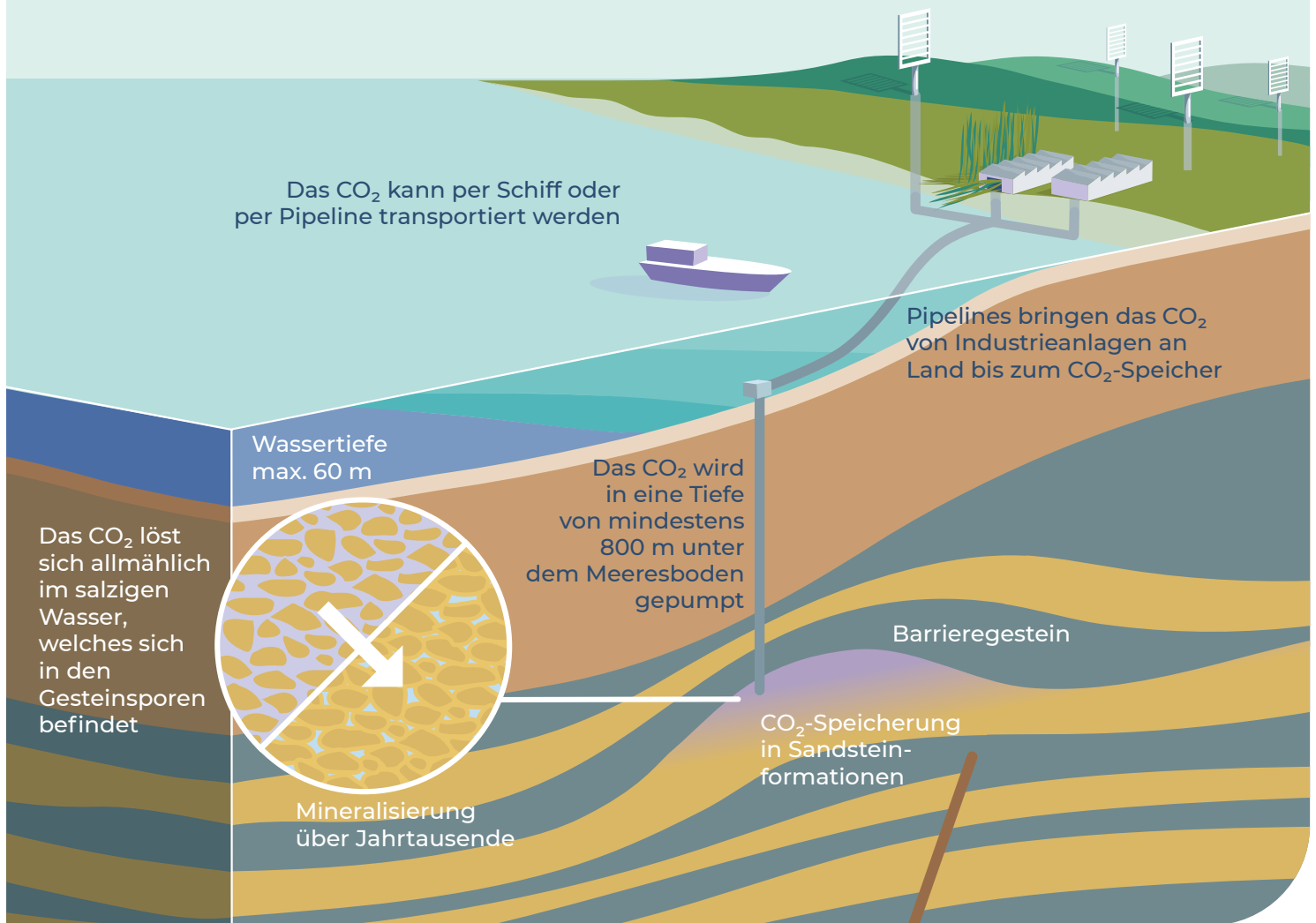
CO₂-Speicherung in Sandsteinformationen der deutschen Nordsee

Kosten für Abscheidung, Verflüssigung, Transport, Speicherung, Überwachung: **circa 80 bis 200 Euro pro Tonne Kohlendioxid**

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

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

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



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

Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

Ein machbares Verfahren mit offenen Fragen

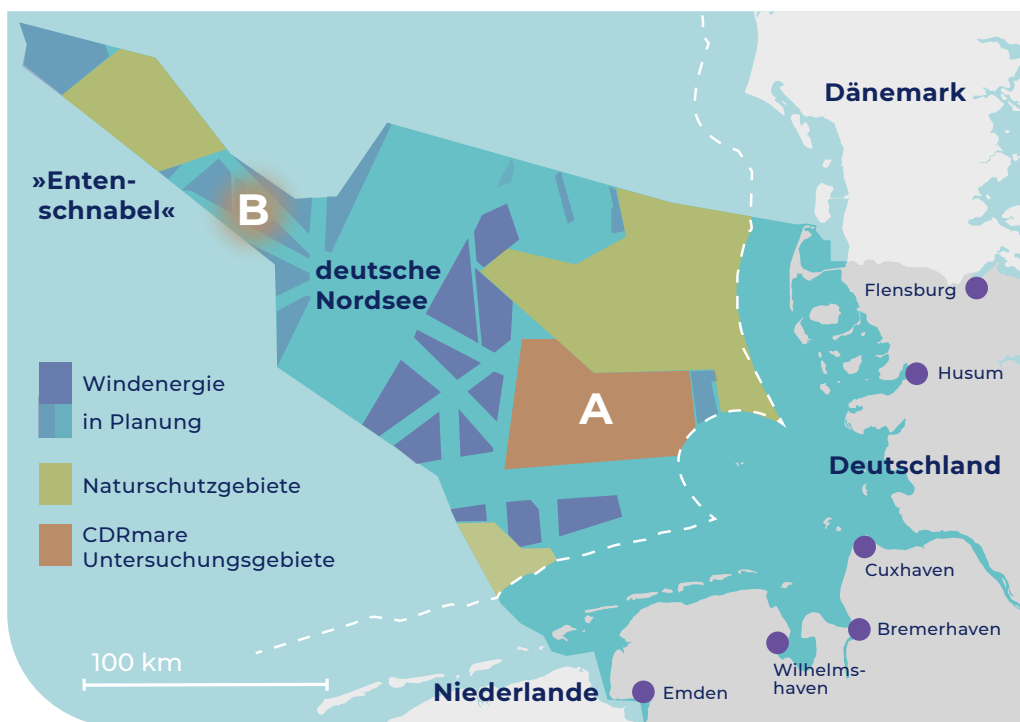
Die sichere Einlagerung und Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund der Nordsee ist seit Jahrzehnten technisch machbar. Bevor ein Demonstrationsprojekt unter der deutschen Nordsee angedacht werden kann, gibt es jedoch eine Menge offener Fragen zu beantworten.

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

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

der Gesteinsschichten in der Tiefe am besten als künftige Speicher geeignet sind.

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



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

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

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

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

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

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

Die Kostenabschätzungen für verschiedene CCS-Projekte im Meeresgebiet variieren, denn es gibt viele projektspezifische Einflussfaktoren, die allgemeine Aussagen erschweren. Einer neueren internationalen Analyse zufolge liegen die Kosten für die Kohlendioxid-Abscheidung, den Transport, die Injektion in den Untergrund und die anschließende Überwachung des Kohlendioxid-Speichers bei circa 70 bis 150 Euro pro Tonne Kohlendioxid. Für ein Projekt unter der deutschen Nordsee existieren

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

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

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

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

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

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

Wenn Kohlendioxid aus dem Meeresboden entweicht

Der Meeresboden der Nordsee ist keine dicht versiegelte Fläche. Im Gegenteil: An einigen Stellen tritt Erdgas aus dem Meeresboden aus. Pro Jahr und Austrittsstelle werden etwa 1 bis maximal 70 Tonnen Erdgas freigesetzt. Seine Herkunft ist nicht immer eindeutig. Es wird entweder von Mikroorganismen im Meeresboden gebildet oder kann entlang natürlicher Störungen aus dem tiefen Untergrund aufsteigen. Zudem entweicht Erdgas an alten Bohrlöchern in einer Größenordnung von 1 bis 19 Tonnen pro Austrittsstelle und Jahr.

Ob solche Erdgasaustritte beispielgebend für mögliche Kohlendioxid-Leckagen aus großer Tiefe sind, untersuchen Forschende in CDRmare.

Bislang sind Kohlendioxid-Austritte an modernen, speziell für den Zweck der Kohlendioxid-Speicherung erstellten Bohrungen

nicht bekannt. Bei den norwegischen Speicherprojekten, die bereits seit vielen Jahren betrieben werden, wurde bisher ebenfalls kein Kohlendioxid am Meeresboden freigesetzt. Dennoch muss bei der Auswahl von Speicherstandorten auf die Existenz von Störungen und anderen speziellen Sedimentstrukturen im Untergrund geachtet werden, durch die Kohlendioxid und unter Umständen auch Formationswasser zum Meeresboden aufsteigen könnten. Gleichzeitig muss überprüft werden, ob Altbohrungen vorhanden sind und wenn ja, ob diese dicht verschlossen sind.

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

Freisetzungsexperimente am Meeresboden der Nordsee zeigen, dass sich austretendes Kohlendioxid sofort im bodennahen Meerwasser löst und dabei dessen chemische Eigenschaften verändert. Das Meerwasser rund um die Austrittsstelle versauert, wodurch die Lebensbedingungen insbesondere für Muscheln und andere kalkbildende Tiere beeinträchtigt werden. Das von der Versauerung betroffene Gebiet ist dabei vergleichsweise klein (ca. 10 – 50 Quadratmeter), wenn in etwa dieselbe Menge Kohlendioxid entweicht, wie Erdgas an den oben beschriebenen Austrittsstellen der Nordsee.

Für sorgfältig erkundete und ausgewählte Kohlendioxid-Speicherstandorte im Meeresgebiet gehen die Expert:innen davon aus, dass bei einem planmäßigen Betrieb nur ein sehr geringer Anteil Kohlendioxid aus dem Speicher entweichen kann, sodass mehr als 99 Prozent des eingelagerten Kohlendioxids auf Dauer im Untergrund verbleiben.

Dennoch müssen Leckagen weitgehend vermieden werden. Geeignete Frühwarn- und Überwachungssysteme sind nötig, um Abweichungen vom erwarteten Speicherverhalten frühzeitig zu erkennen und schnell geeignete Gegenmaßnahmen zu treffen.

In der Forschungsmission CDRmare untersuchen Wissenschaftler:innen in zwei ausgewählten Gebieten den Meeresuntergrund und alle bekannten Bohrlöcher auf mögliche Erdgas-Austritte und entwickeln Methoden zur Eindämmung möglicher Kohlendioxid-Leckagen.

Wenn die Kohlendioxid-Injektion Bewegungen im Untergrund auslöst

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

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

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

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

Lärmbelastigungen für Meeressäugetiere

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

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



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

Foto: Sytske Dijkse, Ecomare, Wiki Commons

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

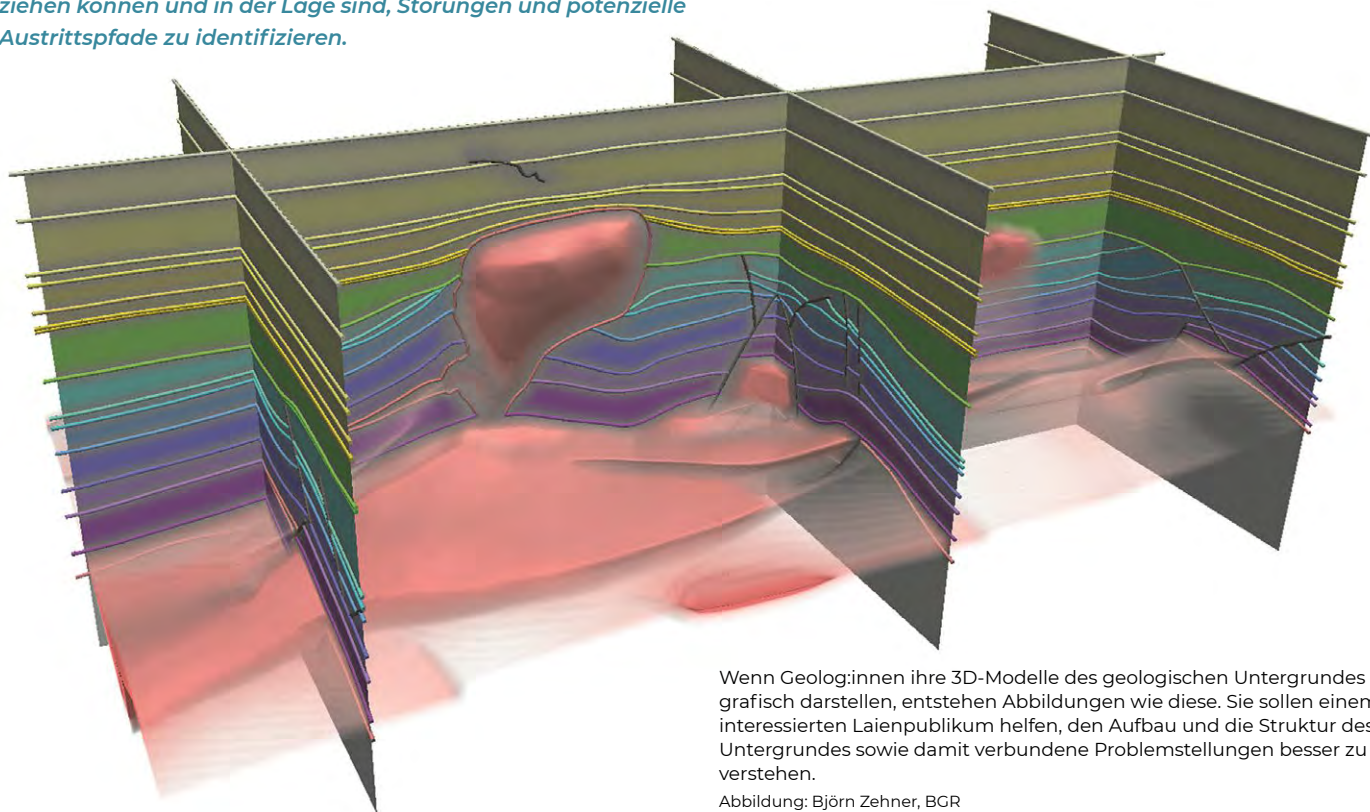
Die Injektion und Speicherung von Kohlendioxid im Meeresuntergrund müssen aus mehreren Gründen umfassend und auch über einen langen Zeitraum überwacht werden – so zum Beispiel, um zu kontrollieren, ob sich das Kohlendioxid wie erwartet im Speichergestein ausbreitet, und um mögliche Kohlendioxid-Leckagen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

Eine ergänzende Messmethode könnten sogenannte passive seismische Verfahren sein. Für sie werden hochsensible Messgeräte auf dem Meeresboden platziert, die dann völlig geräuschlos sowohl natürlich auftretende seismische Ereignisse aufzeichnen würden als auch solche, die durch eine CO₂-Injektion entstünden.

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

Für den Einsatz passiv-seismischer Verfahren spricht zudem, dass mit ihnen eine kontinuierliche Überwachung möglich ist. Bedacht werden muss allerdings: Wo passiv-seismische Messgeräte am Meeresboden liegen, müssen diese vor Zerstörungen geschützt werden. Das heißt, der Fischfang und das Anker von Schiffen und Booten müssten eventuell eingeschränkt werden. Vor der Umsetzung eines 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.

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



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

Abbildung: Björn Zehner, BGR

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

Schifffahrt, Windparks, Fischerei, Pipelines, Erdgasförderung: Die deutsche Nordsee ist bereits heute ein intensiv genutztes Meeresgebiet. Gleichzeitig ist sie aber auch ein wichtiger Lebensraum für viele verschiedene Meereslebewesen, die durch das Ausweisen von Meeresschutzgebieten geschützt und erhalten werden sollen. Um Konflikte mit dem Meeresschutz und ande-

ren Nutzungen zu vermeiden, müssten potenzielle Kohlendioxid-Speicherstandorte in die maritime Raumordnung integriert werden.

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

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

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

Welche rechtlichen Rahmenbedingungen gibt es?

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

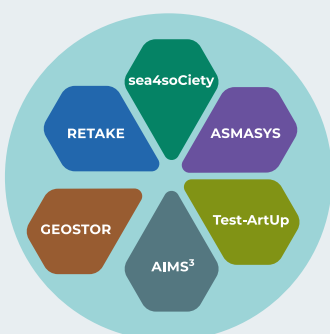
Für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union gilt zudem die EU-Richtlinie zur Speicherung von Kohlendioxid, welche die deutsche Bundesregierung im August 2012 national unter anderem mit dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) umgesetzt hat.

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

Da die Befugnis der Länder, die Erprobung und Demonstration der dauerhaften Speicherung für unzulässig zu erklären, nach dem Wortlaut des KSpG auf »bestimmte Gebiete« beschränkt ist, stieß der pauschale Ausschluss des Meeresuntergrundes 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 Küstenmeeres umgesetzt werden könnten, wenn die Antragsfrist verlängert würde, oder ob auch diese dem Länderverbot unterliegen könnten.

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

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



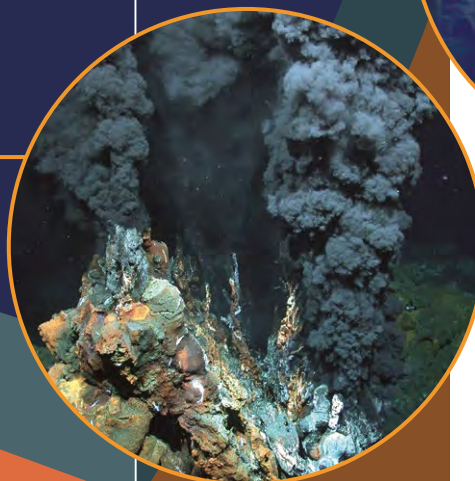
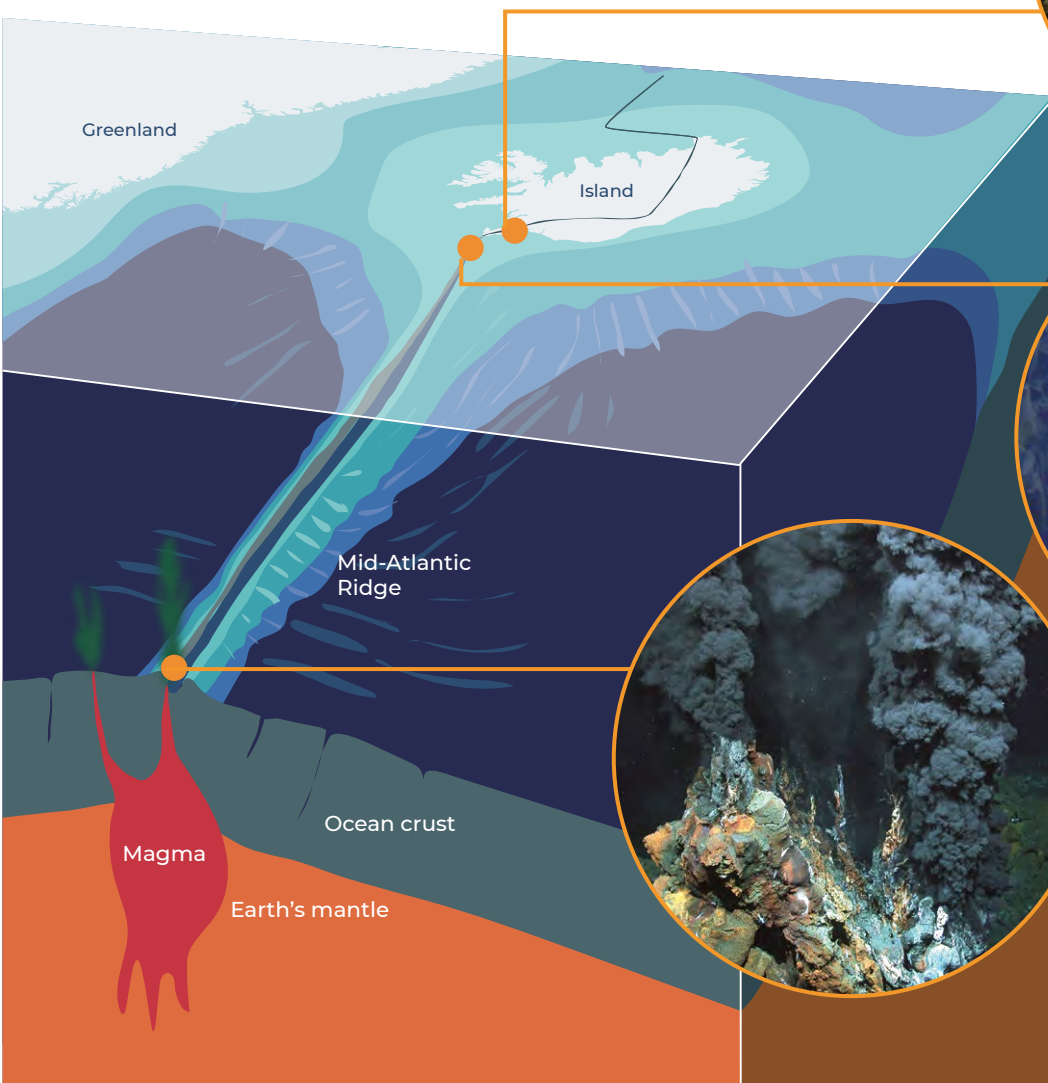
Alle hier beschriebenen Forschungsarbeiten werden im CDRmare-Forschungsverbund »GEOSTOR – Submarine Kohlendioxid-Speicherung in Geologischen Formationen der Deutschen Nordsee« durchgeführt.



geostor.cdrmare.de

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.



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 weg bewegen.

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

Porös und reaktionsfreudig: Das Basaltgestein der oberen Ozeankruste

Angesichts der großen Mengen Kohlendioxid, welche die Menschheit der Atmosphäre entnehmen muss oder aber deren Freisetzung durch eine Abscheidung und Speicherung verhindert werden muss, stellt sich die Frage: Wo noch auf der Erde lassen sich große Mengen Kohlendioxid sicher und dauerhaft im Untergrund einlagern?

Als geologischer Kohlendioxid-Speicher bieten sich neben den Sandsteinformationen von Randmeeren wie der Nordsee auch 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) vor-

stellen. 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 ein Gestein, in dem 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 Unterwasserfelsen 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 kohlendioxidhaltigem 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 CO₂, aber für **größere Meerestiefen bislang unklar**.

Skalierbarkeit:

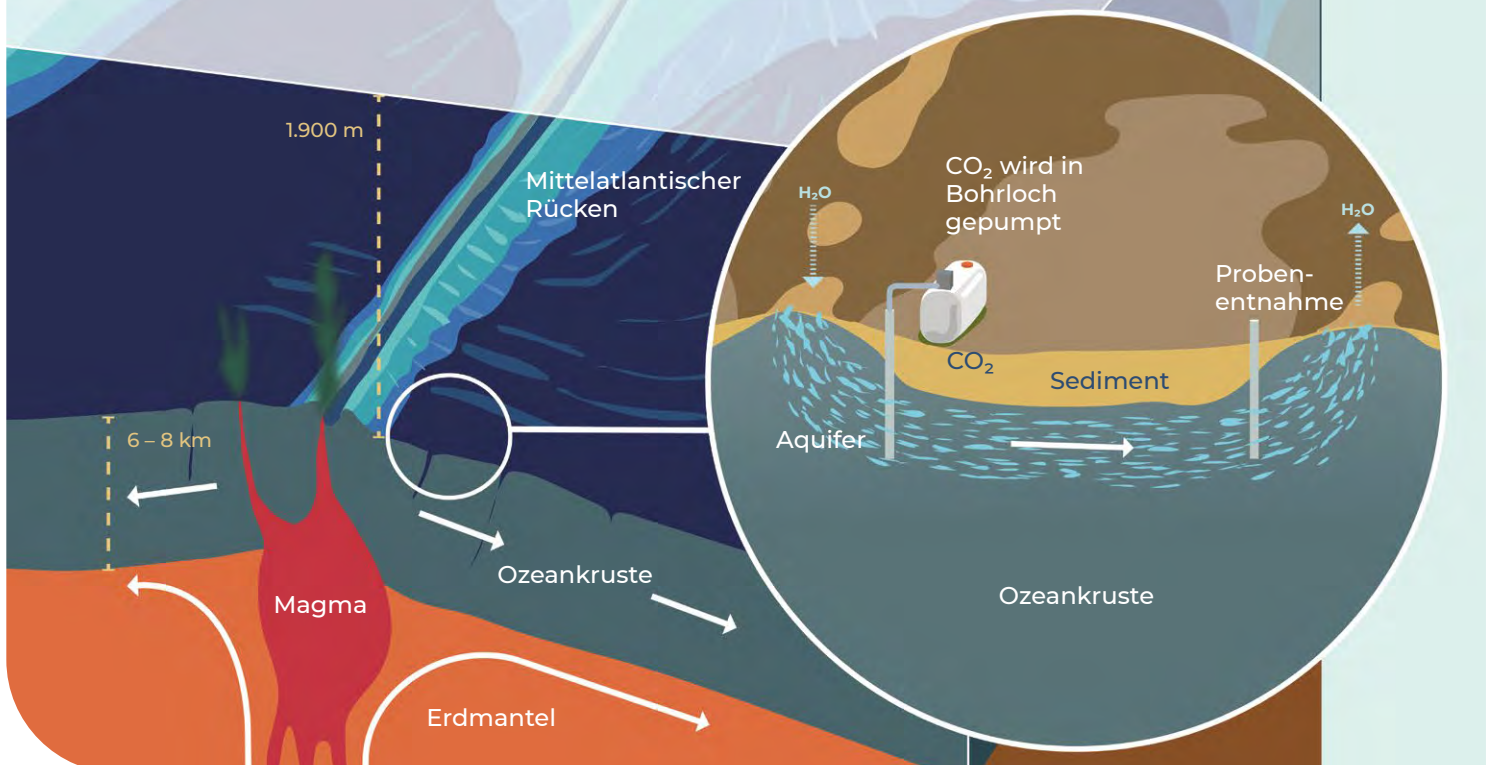
Eine **Kohlendioxid-Einlagerung im industriellen Maßstab ist theoretisch möglich**.

Dauer der Speicherung:

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



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?

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

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.



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.

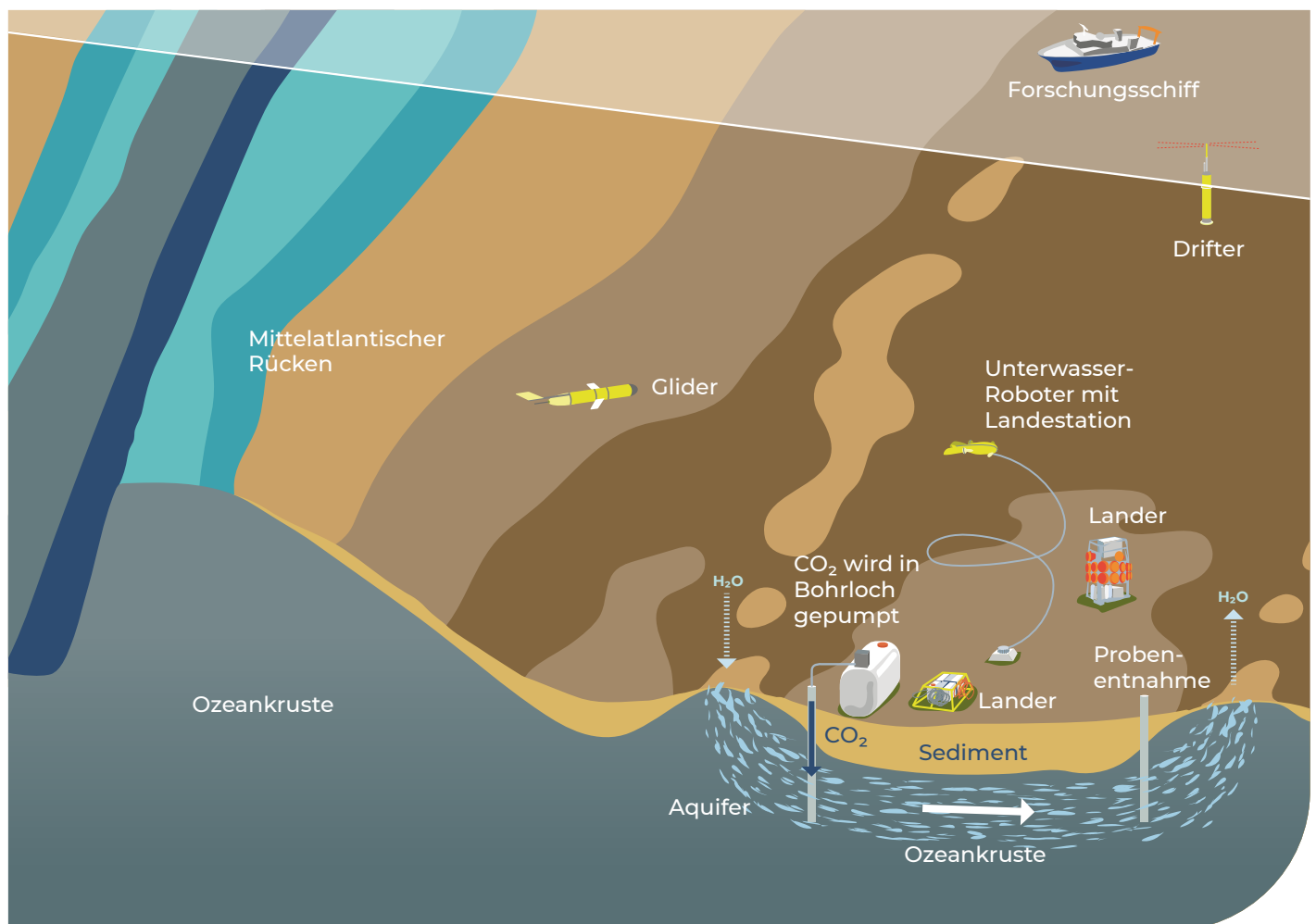
Wie soll das Experiment überwacht werden?

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 Härtetest 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.

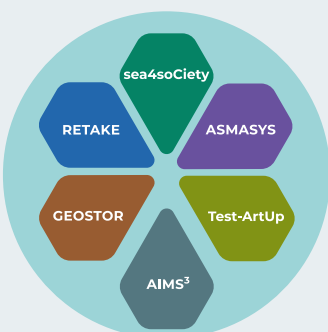
Wissenschaftler:innen der CDRmare-Forschungsmission kollaborieren eng mit den Organisatoren dieser internationalen Projekte und teilen die wissenschaftlichen Daten. Ihr Ziel lautet, alle verfügbaren Datensätze zur Struktur, Beschaffenheit und zu den geochemischen Prozessen in der oberen Ozeankruste am 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.



An einigen Stellen entlang des Mittelatlantischen Rückens ragt das poröse Basaltgestein aus dem Sediment empor und bietet Tiefseebewohnern einen willkommenen festen Untergrund zum Rasten oder Siedeln.

Foto: MARUM, Universität Bremen



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

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 naturwissenschaftlichen Klimaforschung herrscht Konsens: Die Menschheit wird die Erderwärmung und ihre 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).

Vom Menschen verursachte Kohlendioxid-Emissionen entstehen durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle sowie durch eine veränderte Landnutzung. Unklar ist, wie die Menschheit diese Emissionen künftig zu 100 Prozent auf technische, ökonomische und sozialverträgliche Weise vermeiden kann. Expert:innen gehen davon aus, dass die Menschheit auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch Kohlendioxid und andere Treibhausgase emittieren wird.

Optimistischen Prognosen zufolge wird die Höhe dieser Rest-Emissionen für Deutschland auf 10 bis 20 Prozent unserer aktuellen Emissionen geschätzt. Dieser Anteil entspricht einem Ausstoß von etwa 60 bis 130 Millionen Tonnen Treibhausgasen pro Jahr, darunter zu einem Großteil Methan und Lachgas. Es gibt allerdings noch keinen gesellschaftlichen Konsens darüber, wie hoch mögliche Rest-Emissionen sein und welche Sektoren diese verursachen dürfen. Zurzeit sind Rest-Emissionen beispielsweise in der Zementherstellung, im Flug- und Schwerlasttransport

oder aber in der Landwirtschaft und bei der Müllverbrennung schwer vermeidbar.

Einig sind sich Expert:innen darin, dass Rest-Emissionen ausgeglichen werden müssen, wenn die Erwärmung gestoppt werden soll. Dafür gibt es verschiedene Lösungsansätze. Verfahren, bei denen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnommen wird, werden als Kohlendioxid-Entnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) bezeichnet. Zudem werden Methoden diskutiert, bei denen die Freisetzung von Rest-Emissionen verhindert wird – etwa, indem das Kohlendioxid aus fossilen Quellen an der Emissionsquelle aufgefangen und im Anschluss geologisch, das heißt, im tiefen Untergrund gespeichert wird. Verfahren dieser Art werden als Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) bezeichnet und nicht zu den Entnahme-Verfahren gezählt.

Viele bekannte Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme sind landbasiert. Da Landfläche jedoch eine knappe Ressource ist, rücken nun ozeanbasierte Methoden verstärkt in den Fokus. In der interdisziplinären Forschungsmission CDRmare untersuchen Forschende ein breites Spektrum mariner Ansätze einschließlich vielversprechend erscheinender Methoden und Maßnahmen.

Ist oder wäre ein Einsatz mariner CDR-Methoden langfristig für Mensch und Umwelt erstrebens- und wünschenswert?

Foto: Nattu Adnan, unsplash.com



Schwierige Entscheidungen für Gesellschaft und Politik

Menschliche Eingriffe in den marinen Raum mit dem Ziel, die Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans zu erhöhen, sind verbunden mit einer Veränderung der Meereschemie oder der Ökosysteme, und damit der 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. Ein ganzer Wirtschaftszweig – die Meereswirtschaft oder auch Blue Economy – setzt darauf, dass der Ozean einer wachsenden Weltbevölkerung langfristig jene Nahrung, Energie und Rohstoffe (auch für die Energiewende) liefert, 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 die Lebensgemeinschaften der Meere erhalten bleiben und nachhaltig genutzt werden.

Aktuellen Schätzungen zufolge muss die Menschheit der Atmosphäre in den kommenden 80 Jahren 420 bis 1100 Milliarden Tonnen Kohlendioxid entnehmen, wenn sie die globale Erwärmung bis zum Jahr 2100 auf 1,5 Grad Celsius begrenzen will. Sollte diese Entnahme verstärkt durch ozeanbasierte Methoden erfolgen,

würde dies – so viel steht heute schon fest – großräumige Eingriffe über lange Zeiträume hinweg erfordern, selbst dann, wenn nur die effizientesten Methoden zum Einsatz kämen. Das heißt, es müssten internationale Industriezweige und die dazugehörigen regulatorischen Rahmenbedingungen entstehen, deren Zweck vorrangig eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme 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. So hat es die Staatengemeinschaft in den 17 Zielen für eine nachhaltige Entwicklung festgeschrieben, die auch bei Überlegungen zu marinen Kohlendioxid-Entnahme-Methoden berücksichtigt werden müssen. In diesen Zielen hat sich die internationale Staatengemeinschaft unter anderem dem Schutz des Lebens unter Wasser, dem Schutz der biologischen Artenvielfalt, dem Klimaschutz und dem Recht des Menschen auf Frieden, Gesundheit, Bildung und gerechte Behandlung verschrieben.

Wie lassen sich marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden bewerten?

Um diese Herausforderung zu meistern, brauchen politische und gesellschaftliche Entscheidungsträger:innen Antworten auf die Fragen, ob Methoden der marinen Kohlendioxid-Entnahme tatsächlich im erhofften Maße funktionieren, ob sie politisch, rechtlich, sozial und finanziell umsetzbar wären, welche zusätzlichen Vorteile und Risiken sie für Mensch und Umwelt mit sich bringen und ob die mit dem Einsatz verbundenen Auswirkungen langfristig tatsächlich erstrebenswert sind. Auf Grundlage dieses Wissens kann dann faktenbasiert entschieden werden, ob marine CDR-Methoden möglicherweise im großen Maßstab umgesetzt werden oder nicht.

Einen dringend benötigten Leitfaden zur Bewertung der verschiedenen CDR-Methoden entwickeln Wissenschaftler:innen aus den Natur-, Sozial-, Geistes-, Rechts- und Wirtschaftswissenschaften in der Forschungsmission CDRmare. Er soll die vielen Dimensionen des facettenreichen Themas Kohlendioxid-Aufnahme und -Speicherung im Ozean abdecken und es ermöglichen, ein faktenbasiertes und nachvollziehbares Urteil zu einzelnen Methoden oder künftigen Einzelprojekten und Anwendungen zu fällen.

Bevor die Forschenden jedoch die erste Version eines solchen Bewertungsleitfadens auf dessen Einsatztauglichkeit testen können, müssen die Wissenschaftler:innen grundlegende Fragen beantworten.

Anhand welcher Kategorien sollte eine Bewertung mariner Kohlendioxid-Entnahme-Methoden vorgenommen werden?

In der Debatte um marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden liegt das Hauptaugenmerk bisher vor allem auf der technologischen, wirtschaftlichen, politischen und rechtlichen Machbarkeit und damit auf der Frage: Welche Methoden funktionieren und lassen sich tatsächlich umsetzen?

Eine zweite Frage spielt jedoch eine ebenso wichtige Rolle, wird allerdings vielfach nicht ausdrücklich gestellt. Sie lautet: Ist oder wäre ein Einsatz mariner CDR-Methoden auch für die Gesellschaft erstrebens- und wünschenswert? Hierbei geht es um ein Abwägen der Vor- und Nachteile und ob diese mit anderen gemeinschaftlichen Zielen vereinbar sind.

Dass diese Frage wichtig ist, zeigt sich unter anderem darin, dass fast alle wissenschaftlichen Studien, die sich mit der Machbarkeit mariner CDR-Methoden befassen, auch mögliche positive und negative Auswirkungen für Mensch und Umwelt in den Blick nehmen. Die Forschenden wollen herausfinden, ob marine Methoden der Kohlendioxid-Entnahme zu unserem Ziel der Treibhausgasneutralität beitragen können, ohne andere international anerkannte Ziele und Normen zu gefährden – so zum Beispiel das Recht auf Nahrung und Gesundheit.

Ein weiterer, immer wichtiger werdender Anspruch ist der nach einer gerechten und fairen Lastenverteilung des Klimawandels. Politisch debattiert wird er unter dem Stichwort »Klimagerechtigkeit« (englisch: Climate Justice). Vor dem Hintergrund der Diskussion um marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden umfasst dieser Aspekt insbesondere Fragen wie: Sollten in erster Linie die großen Treibhausgasemittenten für potenzielle CDR-Maßnahmen aufkommen? Wie werden mögliche Risiken und Vorteile eines CDR-Einsatzes verteilt? Und soll es Staaten erlaubt werden, abgeschiedenes Kohlendioxid zur unterirdischen Speicherung in andere Länder zu exportieren?

In der Forschungsmission CDRmare verfolgen Forschende daher das Ziel, erstmals einen Bewertungsleitfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden zu entwickeln, der klar zwischen den Bewertungskategorien des technologisch, wirtschaftlich, rechtlich und politisch Machbaren und des gemein-

schaftlich Wünschenswerten unterscheidet und der beiden Kategorien dieselbe Priorität zuordnet. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass im Zuge einer Verfahrens- oder Projektbewertung alle entscheidungsrelevanten Informationen transparent zusammengetragen werden und auf dieser Basis ein umfassendes Urteil über die Eignung des Verfahrens oder Projekts gefällt werden kann – sowohl aus technischer, finanzieller, rechtlicher und politischer Perspektive als auch gemessen an anerkannten sozialen und ökologischen Standards. Hierbei fließen die Erkenntnisse aller an den einzelnen Entnahme- und Speichermethoden arbeitenden Konsortien innerhalb der Forschungsmission CDRmare in die Bewertung mit ein – etwa zu Blue Carbon, zur Alkalinitätserhöhung des Meerwassers, zu künstlichem Auftrieb sowie zu Kohlendioxid-Einlagerungen in tiefer Ozeanbasaltkruste sowie in den Sandsteinformationen unter der deutschen Nordsee.

Die klare systematische Unterscheidung der Bewertung von Machbarkeit und Wünschenswertigkeit ist für eine gesellschaftliche Debatte enorm wichtig. Denn letztendlich brauchen wir nicht nur eine Debatte darüber, welche Formen von CDR wir umsetzen können, sondern auch darüber, welche Formen von CDR wir umsetzen wollen. Insbesondere letztere kann die Wissenschaft nicht für die Gesellschaft entscheiden, aber sie kann wichtige Grundlagen für die Debatte liefern. Der zu entwickelnde Bewertungsleitfaden soll hierzu einen Beitrag leisten.

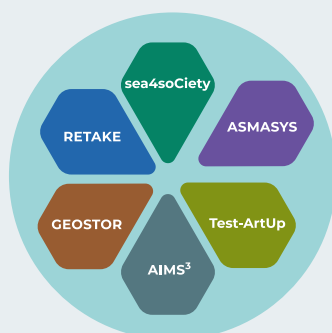
Welche Herausforderungen ergeben sich aus der Aufgabe, den Bewertungsleitfaden als Werkzeug für die deutsche Klimaschutzpolitik zu entwickeln?

Forscher:innen in CDRmare untersuchen, inwiefern marine Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme innerhalb deutscher Hoheitsgewässer oder als Teil einer international ausgerichteten deutschen Klimastrategie machbar und gesellschaftlich wünschenswert sind.

Im Zuge dessen treten die Forschenden unter anderem mit Interessenvertreter:innen aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft in den Dialog, um deren Standpunkte zu den angedachten Bewertungskategorien und -kriterien einzuholen oder gemeinsam zu erarbeiten. Die Entwicklung plausibler Einsatzszenarien mariner Kohlendioxid-Entnahme-Methoden bietet

dabei eine Diskussionsplattform. Geplant ist zudem, den in CDRmare entwickelten Bewertungsleitfaden so zu synchronisieren, dass er den Vergleich mit landbasierten Kohlendioxid-Entnahme-Methoden ermöglicht.

Am Ende, so die Zielstellung des CDRmare-Teams, soll der entwickelte Bewertungsleitfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden die Bundesregierung und andere Entscheidungsträger:innen in die Lage versetzen, sich ein umfassendes Urteil über die verschiedenen ozeanbasierten Kohlendioxid-Entnahme-Methoden zu bilden und ihre Klimaschutzstrategien und -maßnahmen entsprechend anzupassen.



Alle hier beschriebenen Forschungsarbeiten werden im CDRmare-Forschungsverbund »Bewertungsrahmen für marine Kohlendioxidentnahme und Synthese des aktuellen Wissensstandes« durchgeführt.



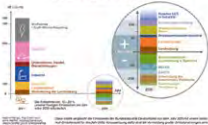
asmasy.cdrmare.de

www.cdrmare.de

Wissenschaftliche Zusammenfassung
Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre: Dringend benötigt

Zusammenfassung: Die globale Erwärmung durch den Anstieg des atmosphärischen Kohlendstoffgehalts ist ein zentrales Problem der Klimawissenschaften. Die Entnahme von Kohlendstoff aus der Atmosphäre ist eine wichtige Strategie zur Erreichung der Klimaziele.

Die Herausforderung: Die globale Erwärmung durch den Anstieg des atmosphärischen Kohlendstoffgehalts ist ein zentrales Problem der Klimawissenschaften. Die Entnahme von Kohlendstoff aus der Atmosphäre ist eine wichtige Strategie zur Erreichung der Klimaziele.



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

Zusammenfassung: Die Ausweitung von Wäldern und Meereswäldern ist eine wichtige Strategie zur Verstärkung der Kohlenstoff-Speicherung.

Die Herausforderung: Die Ausweitung von Wäldern und Meereswäldern ist eine wichtige Strategie zur Verstärkung der Kohlenstoff-Speicherung.



Wissenschaftliche Zusammenfassung
Künstlicher Auftrieb: Mehr Power für die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres

Zusammenfassung: Künstlicher Auftrieb ist eine Methode zur Verstärkung der biologischen Kohlenstoffpumpe des Meeres.

Die Herausforderung: Künstlicher Auftrieb ist eine Methode zur Verstärkung der biologischen Kohlenstoffpumpe des Meeres.



Wissenschaftliche Zusammenfassung
Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans

Zusammenfassung: Minerale sind eine wichtige Komponente für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans.

Die Herausforderung: Minerale sind eine wichtige Komponente für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans.



Wissenschaftliche Zusammenfassung
Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee

Zusammenfassung: Die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee ist eine wichtige Strategie zur Erreichung der Klimaziele.

Die Herausforderung: Die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee ist eine wichtige Strategie zur Erreichung der Klimaziele.



Wissenschaftliche Zusammenfassung
Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in zentraler Kruste

Zusammenfassung: Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in zentraler Kruste ist eine wichtige Studie zur Erreichung der Klimaziele.

Die Herausforderung: Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in zentraler Kruste ist eine wichtige Studie zur Erreichung der Klimaziele.



Wissenschaftliche Zusammenfassung
Spezialforschung: Ein Bewertungsfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden

Zusammenfassung: Ein Bewertungsfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden ist eine wichtige Studie zur Erreichung der Klimaziele.

Die Herausforderung: Ein Bewertungsfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden ist eine wichtige Studie zur Erreichung der Klimaziele.



CDRmare Factsheet-Reihe
WISSEN KOMPAKT:
 Alle Hintergründe und Methoden kompakt auf je zwei Seiten.
www.cdrmare.de/factsheets



Forschungsmission der Deutschen
Allianz Meeresforschung (DAM)
»Marine Kohlenstoffspeicher als Weg
zur Dekarbonisierung«



Innovative Ansätze zur Verbesserung
des Kohlenstoffspeicherpotenzials von
Vegetationsküstenökosystemen (*sea4soCiety*)



Künstlicher Ozeanauftrieb im Feldtest (*Test-ArtUp*)



CO₂-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung:
Potenzial, Nutzen und Risiken (*RETAKE*)



Submarine Kohlendioxid-Speicherung in Geologischen
Formationen der Deutschen Nordsee (*GEOSTOR*)



Alternative Szenarien, innovative Technologien und
Monitoringansätze für die Speicherung von
Kohlendioxid in ozeanischer Kruste (*AIMS³*)



Bewertungsrahmen für marine CO₂ und Synthese
des aktuellen Wissensstandes (*ASMASYS*)



Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) »Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung«

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 CO₂-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.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Freie
Hansestadt
Bremen



Behörde für Wissenschaft,
Forschung, Gleichstellung
und Bezirke



Niedersächsisches Ministerium
für Wissenschaft und Kultur



Schleswig-Holstein
Ministerium für Bildung,
Wissenschaft und Kultur