

Neues Wissen zur CO₂-Entnahme durch die Erhöhung der Alkalinität des Meeres: Die sieben wichtigsten Erkenntnisse aus der RETAKE-Forschung

Im CDRmare-Forschungsverbund RETAKE untersuchen Wissenschaftler*innen verschiedene Verfahren zur Erhöhung des Säurebindungsvermögens (Alkalinität) des Ozeans daraufhin, ob sie die natürliche Kohlendioxid-Aufnahme des Meerwassers verstärken und welche Risiken oder positiven Effekte sie möglicherweise nach sich ziehen. Sieben ihrer relevantesten Forschungsergebnisse stellen wir an dieser Stelle vor.

- 1** Es werden mittlerweile sehr unterschiedliche Verfahren diskutiert, mit denen das Säurebindungsvermögen des Ozeans (Alkalinität) zum Zwecke einer verstärkten Kohlendioxid-Aufnahme erhöht werden kann. Jedes dieser Verfahren muss individuell erforscht und für verschiedene Standorte einzeln bewertet werden.
- 2** Die Erforschung von Verfahren zur Alkalinitätserhöhung ist gesellschaftlich umstritten. Kritiker*innen zufolge weckt sie die Hoffnung auf vermeintliche Klimälösungen, infolge derer wir Menschen uns weniger bemühen, CO₂-Emissionen gänzlich zu vermeiden.
- 3** Unsere Möglichkeiten, Verfahren zur Alkalinitätserhöhung einzusetzen, sind durch natürliche und technische Grenzen beschränkt.
- 4** Die Auswirkungen alkalinitätssteigernder Verfahren auf das Leben im Meer können beachtlich sein. Jeder Einsatz muss deshalb sorgsam geplant und relevante Umweltparameter in Abstimmung mit unabhängigen Expert*innen und den zuständigen Behörden überwacht werden.
- 5** Das Entnahmepotenzial und die Effektivität alkalinitätssteigernder Methoden unterscheiden sich von Meeresgebiet zu Meeresgebiet. Entlang der deutschen Küste gibt es Regionen, in denen ausgewählte Verfahren aus naturwissenschaftlicher Sicht zum Einsatz kommen können.
- 6** Deutschland könnte der Atmosphäre durch den Einsatz von zwei bis drei ausgewählten Verfahren zur Alkalinitätserhöhung in seinen Meeresgebieten pro Jahr mehrere Millionen Tonnen CO₂ entnehmen – und das lange vor dem Jahr 2045, in dem die Bundesrepublik treibhausgasneutral sein möchte.
- 7** Es ist schwierig, die durch Alkalinitätserhöhung erreichte zusätzliche CO₂-Entnahme zu messen und zu verifizieren.

Kernbotschaft 1

Es werden mittlerweile sehr unterschiedliche Verfahren diskutiert, mit denen das Säurebindungsvermögen des Ozeans (Alkalinität) zum Zwecke einer verstärkten Kohlendioxid-Aufnahme erhöht werden kann. Jedes dieser Verfahren muss individuell erforscht und für verschiedene Standorte einzeln bewertet werden.

Die Verfahren unterscheiden sich vor allem darin, ob die Alkalinität des Meerwassers mithilfe elektrochemischer Ansätze erhöht werden soll oder durch das beschleunigte Auflösen und Verwittern fein gemahlener Minerale wie Kalk- und Silikatgestein. Ihre Wirkung ist dieselbe: Versauernd wirkende Protonen im Meerwasser werden gebunden und der Anteil des gelösten Kohlendioxids (CO₂) sinkt.

Als Folge dessen kann das Meer an seiner Oberfläche wieder neues CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen. (Ausführliche Infos gibt es in unserem Fact Sheet: [Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans.](#))

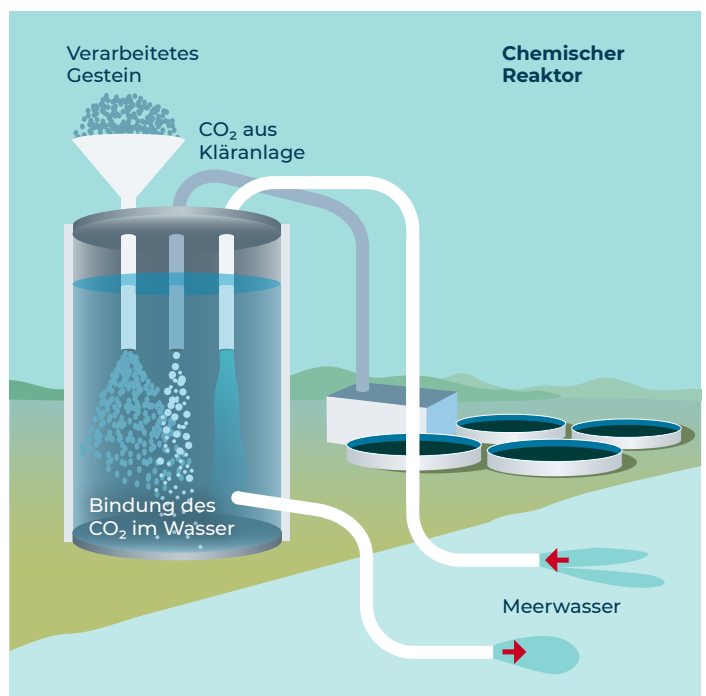
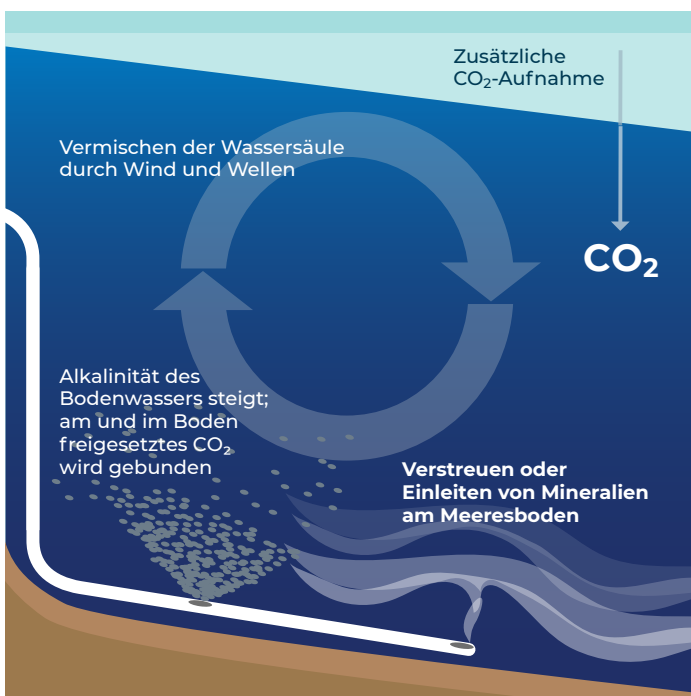
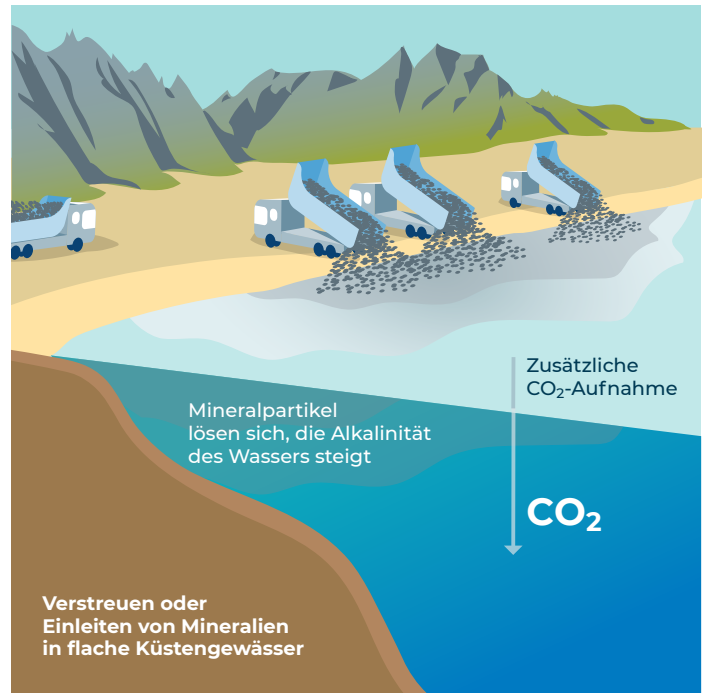
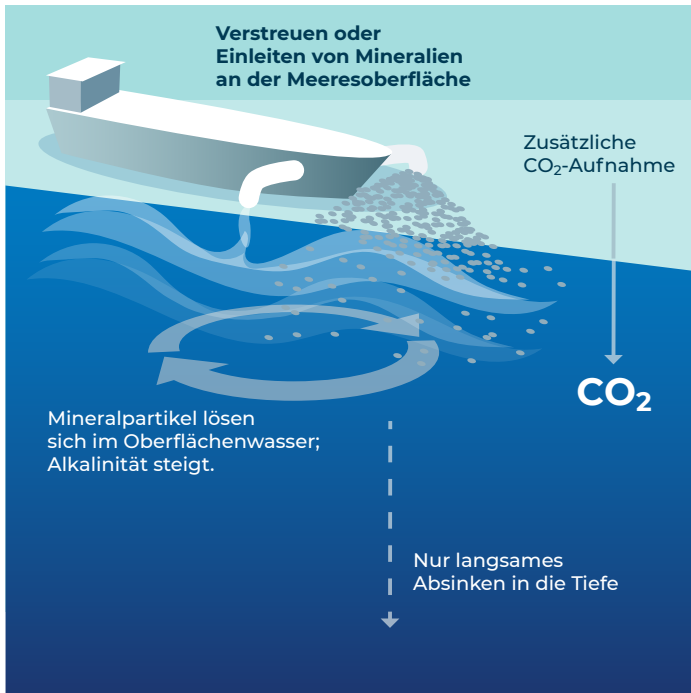
Elektrochemische Ansätze kosten viel Energie und produzieren große Mengen Säure. Sie werden derzeit von einigen Start-Ups entwickelt, vor allem in den USA. Die Forschenden des RETAKE-Verbundes hingegen konzentrierten sich auf eine beschleunigte Verwitterung fein gemahlener Minerale. Diese kann auf unterschiedliche Weise erreicht werden: Theoretisch wäre es zum Beispiel möglich, das Mineralpulver an der Meeresoberfläche zu verteilen. Man könnte es aber auch an Stränden oder in der Brandung ausstreuen oder aber über lange Schläuche direkt am Meeresboden ausbringen.

Soll die Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans durch ein Verstreuen von Gesteinspulver an der Meeresoberfläche erhöht werden, wird vorausgesetzt, dass die Mineralpartikel so lange im Oberflächenwasser verbleiben, bis sie sich auflösen. Denn nur wenn sich die Alkalinität des Oberflächenwassers erhöht, kann das Meer zusätzliches CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen. Sinken die Partikel zu schnell in große Tiefe, würde zwar die Alkalinität des Tiefenwassers ansteigen, das Säurebindungsvermögen des Oberflächenwassers, welches im Gasaustausch mit der Atmosphäre steht, bliebe jedoch nahezu unverändert. Es würde demzufolge kaum zusätzliches CO₂ aus der Atmosphäre aufgenommen.

Anders sieht es in flachen Küstengewässern aus: Wind und Wellen durchmischen die Wassersäule hier so umfassend, dass auch die säurebindenden Lösungsprodukte aus einer Gesteinsverwitterung am Meeresboden in das Oberflächenwasser gelangen und dessen Chemie verändern. Es kann dann zusätzliches CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen.

Wird das Gesteinspulver direkt am Meeresboden ausgebracht, würde seine Verwitterung CO₂ aus dem Bodenwasser binden, welches freigesetzt wird, wenn Mikroben im Meeresboden eingelagerte Tier- und Pflanzenreste zersetzen. Um mithilfe dieses Verfahren auch zusätzliches CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen, muss das alkalinierte Bodenwasser an die Meeresoberfläche gelangen. In der flachen Ostsee wäre dies innerhalb weniger Monate bis Jahre der Fall, weil Wind und Wellen die Wassermassen hier bis in ausreichende Tiefe vermischen. In tieferen Gewässern hingegen wäre ein Aufsteigen des Bodenwassers nur möglich, wenn die lokalen Strömungsverhältnisse dies erlauben.

Expert*innen des CDRmare-Forschungsverbundes RETAKE haben in den zurückliegenden drei Jahren außerdem ein Verfahren erforscht, bei dem fein gemahlene Kalkgestein in einem Reaktor verwittert wird und man die dabei erzeugte Lösung anschließend in das Meer einleitet. Für diese Form der Verwitterung wird das Gesteinsmehl in einem Reaktor mit Wasser vermischt, welches zuvor mit abgedehntem CO₂ angereichert wurde. Dieses CO₂ wird im Zuge der Verwitterung chemisch gebunden und nach dem Einleiten ins Meer von den Meeresströmungen verteilt und in den Tiefen des Ozeans eingelagert. Erste Praxis-Tests solcher Reaktoren in Deutschland werden aktuell geplant und durchgeführt. Die Reaktoren werden an Kläranlagen errichtet, deren Restbiomasse verbrannt wird, sodass CO₂ abgeschieden werden kann. Das alkalinierte Reaktor-Wasser wird dann zusammen mit dem geklärten Abwasser über Flüsse oder aber direkt in die Nord- oder Ostsee eingeleitet.



Grafiken: Rita Erven, CDRmare

Es gibt mittlerweile viele verschiedene Verfahren zur Erhöhung der Alkalinität des Ozeans. Im CDRmare-Forschungsverbund RETAKE werden folgende vier Methoden untersucht: das Verstreuen oder Einleiten von Mineralien oder alkalischen Lösungen 1) an der Meeresoberfläche (oben links), 2) im Flachwasser- oder Küstenbereich (oben rechts) sowie 3) direkt am Meeresboden (unten links). Als vierte Methode erproben die Fachleute die beschleunigte Verwitterung von Mineralien in chemischen Reaktoren (unten rechts). Bei diesem Verfahren wird jedoch in erster Linie CO₂ im Wasser gebunden, welches zuvor bei Verbrennungsprozessen abgeschieden wurde. Um eine echte CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre handelt es sich bei diesem Verfahren nur, wenn das abgeschiedene CO₂ aus der Verbrennung pflanzlicher Biomasse stammt, für deren Entstehung Pflanzen einst CO₂ aus der Atmosphäre aufgenommen haben.



Das Hamburger Unternehmen Planeteers entwickelt Verfahren zur beschleunigten Verwitterung von Mineralien in chemischen Reaktoren. Prototypen solcher Reaktoren werden aktuell an ausgewählten Kläranlagen in Norddeutschland aufgebaut und getestet. Dabei wird CO₂ im Reaktorwasser gebunden, welches zuvor bei der Verbrennung von Klärresten aus dem Rauchgasstrom abgetrennt wurde.

Foto: Planeteers

Wichtig bei alledem: Stammt das CO₂, mit dem das Reaktor-Wasser angereichert wird, aus den Abgasen von Kläranlagen oder der Verbrennung pflanzlicher Biomasse, stellt seine chemische Bindung durch Alkalinitätserhöhung tatsächlich eine CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre dar. Käme das CO₂ hingegen aus fossilen Quellen, wäre seine chemische Bindung im Wasser eine Form der Emissionsvermeidung.

Fraglich ist hingegen noch immer, ob es wirksam und zielführend wäre, Mineralpulver auf dem offenen Meer zu verteilen. Abgesehen vom Testlauf eines Nordamerikanischen Start-Ups hat es dazu bislang keinerlei Feldforschung gegeben. In Deutschland sind entsprechende Feldversuche bislang verboten. Dieses Verbot müsste aufgehoben werden, wenn Forschende unter realistischen Umweltbedingungen untersuchen sollen, unter welchen Bedingungen tatsächlich eine Kohlendioxid-Entnahme erreicht werden kann und welche Veränderungen das eingetragene Mineralpulver im Meer auslöst.

Kernbotschaft 2

Die Erforschung von Verfahren zur Alkalinitätserhöhung ist gesellschaftlich umstritten. Kritiker*innen zufolge weckt sie die Hoffnung auf vermeintliche Klimälösungen, infolge derer wir Menschen uns weniger bemühen, CO₂-Emissionen gänzlich zu vermeiden.

Solche Hoffnungen entbehren jeder faktischen Grundlage. Der Ozean kann das gigantische Emissionsproblem der Menschheit unter keinen Umständen zeitnah lösen – selbst dann nicht, wenn Verfahren zur Alkalinitätserhöhung in allen Teilen der Welt eingesetzt würden. Dafür sind die bekannten Verfahren zu kompliziert in der Umsetzung und ihre CO₂-Entnahmeraten viel zu klein.

Allein durch die Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas hat die Menschheit im Jahr 2024 fossiles CO₂ in einer neuen Rekordmenge von 37,4 Milliarden Tonnen freigesetzt. Addiert man die CO₂-Emissionen infolge veränderter Landnutzungen hinzu, ergibt sich eine Rekordsumme von 41,6 Milliarden Tonnen CO₂.

Mithilfe mariner Verfahren zur gezielten CO₂-Entnahme ließe sich nur ein Bruchteil davon ausgleichen. Aus diesem Grund muss alles Menschenmögliche getan werden, CO₂-Emissionen zu vermeiden – bei der Energiegewinnung ebenso wie im Verkehr, in der Industrie, bei der Nahrungs-

mittelproduktion sowie im Bau- und Wärmesektor. CO₂-Entnahmeverfahren können einzig und allein dazu beitragen, schwer- oder unvermeidbare Restemissionen auszugleichen. Dazu zählen zum Beispiel CO₂-Emissionen in der Landwirtschaft sowie im Schwerlastverkehr.

Unbegründet ist auch die Annahme, der Mensch könne den Ozean ohne Einschränkung als Kohlendioxid-Speicher nutzen. Wie die Richter*innen des Internationale Seegerichtshofes in ihrer wegweisenden Stellungnahme vom 21. Mai 2024 schreiben, stellt die vom Menschen verursachte Freisetzung fossiler CO₂-Emissionen in die Atmosphäre eine Form der Meeresverschmutzung dar (unter anderem, weil der Ozean anschließend einen Teil des CO₂ aufnimmt und infolgedessen versauert). Um die Verschmutzung der Meeresumwelt zu verringern – eine Pflicht, die sich unmittelbar aus dem UN-Seerechtsübereinkommen ergibt –, sind die Vertragsparteien dieses multilateralen Vertrags daher zugleich indirekt verpflichtet, die Freisetzung fossiler CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Wie die Richter*innen des Internationalen Seegerichtshofes feststellen, haben die Staaten dabei auch das Verlagerungsverbot des Artikel 195 aus dem UN-Seerechtsübereinkommen zu beachten, nachdem es prinzipiell nicht zulässig ist, eine Form der Verschmutzung in eine andere umzuwandeln. Maßnahmen, bei denen das Meer auf gezielte Weise belastet wird, um andere Formen der Verschmutzung zu kompensieren, sind damit unzulässig. Inwiefern die beschleunigte Verwitterung fein gemahlener Kalk- und Silikatgesteine zum Ausgleich schwer vermeidbarer Restemissionen eine solche Verschmutzung im Sinne des UN-Seerechtsübereinkommens darstellt, ist aktuell Gegenstand der wissenschaftlichen und rechtlichen Debatte.

Fest steht aber auch: Durch eine gezielte Erhöhung der Alkalinität lässt sich die klimabedingte Versauerung des Meerwassers zumindest kurzfristig abschwächen. Davon würden vor allem Muscheln, Foraminiferen und andere kalkbildende Meereslebewesen profitieren, denn in weniger versauertem Wasser fiele es ihnen leichter, ihre Schalen und Skelette aus Kalk zu bauen. Ein Nachteil: Bei der Kalkbildung im Meer wird immer CO₂ freigesetzt – egal, ob Tiere den Feststoff bilden oder aber er aufgrund chemischer Veränderungen ausfällt.

Kernbotschaft 3

Unsere Möglichkeiten, Verfahren zur Alkalinitätserhöhung einzusetzen, sind durch natürliche und technische Grenzen beschränkt.

Die Alkalinität des Ozeans lässt sich nicht unbegrenzt erhöhen. Wenn dem Meerwasser zu große Mengen Mineralpulver oder alkalische Substanzen hinzugefügt werden, können sich nach den Gesetzen der Chemie neue Feststoffe

bilden. Häufig fallen dann Karbonate in Form von Kalk aus. Dabei wird Alkalinität verbraucht und CO₂ freigesetzt.

Ausfällungen müssen bei Projekten zur Alkalinitätserhöhung unbedingt vermieden werden. Experimentelle Studien aus dem RETAKE-Verbund zeigen nämlich, dass Ausfällungsprozesse eine eigene Dynamik entwickeln können. Einmal in Gang gesetzt, können erste Ausfällungen weitere chemische Reaktionen im Ozean anschieben. Unter Umständen fallen am Ende so viele Karbonate aus, dass das Meerwasser schließlich weniger Alkalinität enthält als vor dem Eintrag der Mineralstoffe. Da bei jeder Karbonatausfällung vormals gebundenes CO₂ freigesetzt wird, erreicht man mit falsch »dosierten« Alkalinitätserhöhungen unter Umständen genau das Gegenteil des ursprünglichen Ziels und schwächt die CO₂-Aufnahme des Meeres anstatt sie zu stärken.

RETAKE-Forschung belegt außerdem, dass sich das Silikatgestein Olivin aus zwei Gründen nicht als Ausgangsmaterial für einen großflächigen Einsatz an der Meeresoberfläche eignet. Es löst sich erstens viel zu langsam im Meerwasser auf. Zwar könnte man die Verwitterungsdauer durch ein noch feineres Zermahlen des Gesteins beschleunigen. Allerdings würde bei einem Einsatz in der Nordsee selbst eine Korngröße von 10 Mikrometer (0,01 Millimeter) nicht ausreichen, um alles

Olivin innerhalb von 100 Jahren aufzulösen. Zweitens enthalten Silikatgesteine wie Olivin mitunter Schwermetalle wie Nickel. Werden diese im Zuge der Verwitterung in großen Mengen freigesetzt, schaden sie der Meeresumwelt (mehr dazu in Kernbotschaft 4).

Löschkalk (Kalziumhydroxid) würde sich den Ergebnissen zufolge als Ausgangsmaterial eignen. Er löst sich schnell im Wasser und enthält keine giftigen Verunreinigungen. Allerdings entstehen bei seiner Herstellung unvermeidbare CO₂-Emissionen, die abgeschieden und unterirdisch gespeichert werden müssten (englisch: Carbon Capture and Storage, CCS). Das wiederum erfordert ausreichend große und erschlossene CO₂-Speicherstätten sowie die dazugehörige Infrastruktur zum Transport des Kohlendioxids. Eine Alkalinitätserhöhung mithilfe von Löschkalk erscheint im Vergleich zu den Kosten anderer CDR-Verfahren durchaus wettbewerbsfähig, selbst wenn man die zusätzlichen Kosten für CCS berücksichtigt.

An eine technische Grenze könnte der Einsatz der geplanten Verwitterungsreaktoren stoßen. In jedem Reaktor kann nur eine bestimmte Menge Wasser alkaliniert werden. Ob ausreichend große und viele Reaktoren betrieben werden können, um schnell genug klimawirksame Effekte zu erzeugen, ist nach aktuellem Forschungsstand offen.

Neue Erkenntnisse konnten die Forschenden auch in Hinblick auf die Dauer der chemischen CO₂-Speicherung im Meer gewinnen. Modellstudien deuten darauf hin, dass CO₂, welches durch eine Alkalinitätserhöhung des Ozeans aufgenommen wird, viele Jahrtausende lang im Meer gespeichert bleibt. Um die Speicherdauer genauer zu bestimmen, müssen die Forschenden jedoch noch ergründen, ob und auf welche Weise kalkbildende Organismen sowie Prozesse in der oberen Meeresbodenschicht auf die Alkalinitätszugabe reagieren und ob sie das Säurebindungsvermögen der Wassermassen beeinflussen.

Kernbotschaft 4

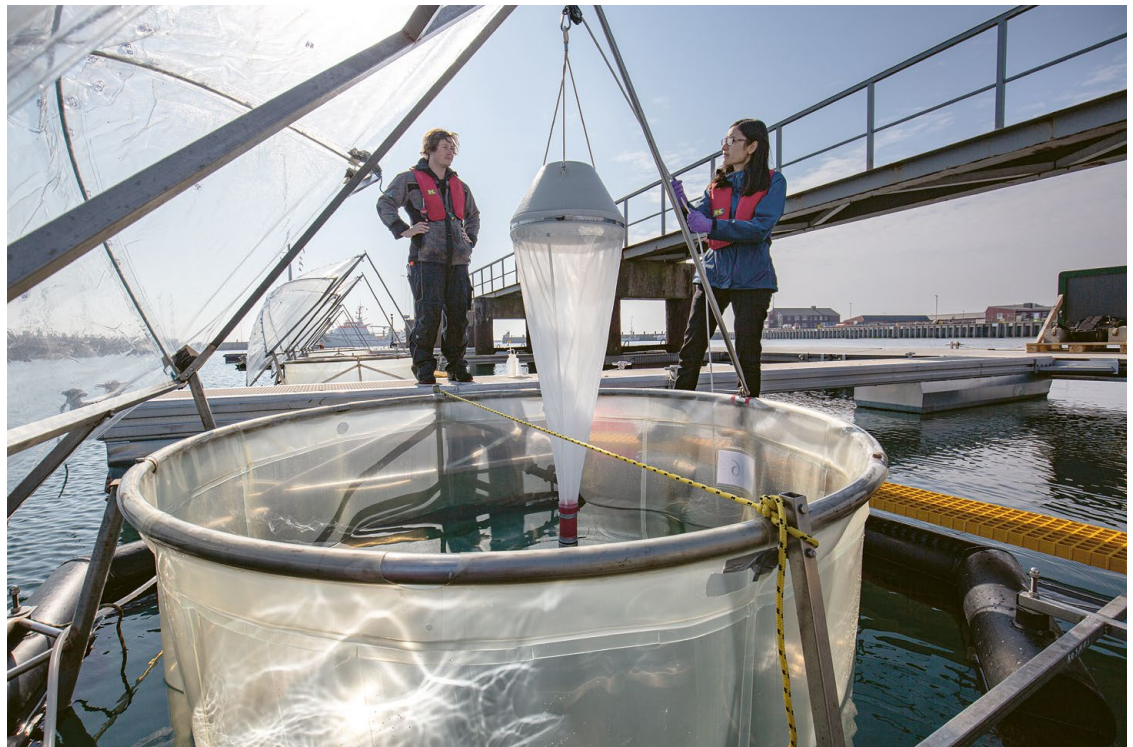
Die Auswirkungen alkalinitätssteigernder Verfahren auf das Leben im Meer können beachtlich sein. Jeder Einsatz muss deshalb sorgsam geplant und relevante Umweltparameter in Abstimmung mit unabhängigen Expert:innen und den zuständigen Behörden überwacht werden.

In verschiedenen Labor- und Mesokosmen-Experimenten haben Forschende des RETAKE-Verbundes untersucht, wie sich der Eintrag alkalinitätssteigerender Mineralpulver und -lösungen auf das Wachstum einzelliger Meeresalgen und Zooplankton-Arten auswirkt. Diese Organismen bilden das Fundament der Nahrungsnetze im Meer. Die Experimente zeigten, dass die

Planktongemeinschaft bei hoher Dosierung der eingebrachten Alkalinität recht empfindlich auf einen plötzlichen Anstieg des Säurebindungsvermögens in der Wassersäule reagiert. Das war insbesondere bei Experimenten im Frühling der Fall. Zu dieser Zeit entwickeln Mikroalgen Blüten und die Zooplankton-Arten befinden sich noch in der Wachstumsphase.

Ihre Beobachtungen begründen die Forschenden damit, dass Mikroalgen in Wasser mit hoher Alkalinität (viel CO₂ chemisch gebunden) weniger CO₂ für die Photosynthese zur Verfügung steht. Im Zuge dessen verlangsamt sich das Wachstum. Die Kalkalge und Schlüsselart *Emiliania huxleyi* beispielsweise stellt ihr Wachstum ein, wenn der CO₂-Gehalt des Meerwasser auf unter 100 Mikromol pro Kilogramm fällt. Außerdem reagieren Mikroalgen unterschiedlich empfindlich auf giftige Schwermetalle wie Nickel, die in Silikatgestein enthalten sein können. In entsprechenden Experimenten zeigte insbesondere die Kieselalge *Thalassiosira weissflogii* Wachstumsprobleme schon bei moderaten Nickel-Konzentrationswerten.

Einen Unterschied machte es auch, ob die Mineralien als Pulver in die Mesokosmen gegeben wurden oder in Form einer Lösung, in welcher die Mineralien bereits vorverwittert sind. Fachleute sprechen auch von vorgelöster Alkalinität. Bei Mesokosmen-Experimenten mit einer Lösung veränderten sich die Interaktionen zwischen verschiedenen Phyto- und Zooplanktonarten ab einer



Fotos: Michael Sswat,
GEOMAR

Um die Auswirkungen einer Alkalinitätserhöhung auf das Leben im Meer zu erforschen, haben RETAKE-Fachleute auf Helgoland große Plastikschräume mit Meerwasser und allen darin lebenden Organismen befüllt. Anschließend erhöhten sie die Alkalinität des Wassers in den Schräumen und dokumentierten, wie die Algen- und Zooplankton-gemeinschaft darauf reagierte.

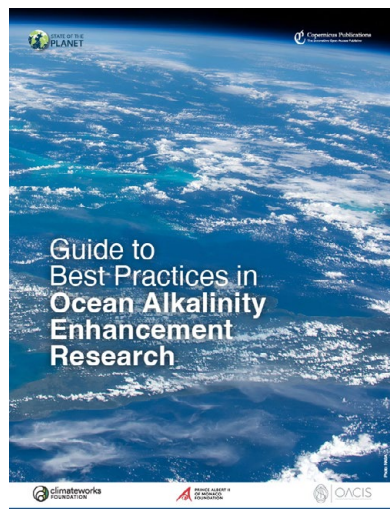
Eintragsmenge, im Zuge derer die Alkalinität des Meerwassers um 250 Mikromol pro Kilogramm anstieg. Zur Orientierung: Diesen Schwellenwert würde man erreichen, wenn die Alkalinität des Ozeans um 10 bis 15 Prozent erhöht würde. Abhängig von den Wind-, Strömungs- und Durchmischungsverhältnissen würde die Alkalinität des Oberflächenwassers aber um diesen Wert ansteigen, wenn Verfahren zur Alkalinitäts-erhöhung lokal zum Einsatz kämen – dann vermutlich aber nur für kurze Zeit.

Noch tiefer lag der Schwellenwert, als Forschende in einem internationalen Partnerprojekt die Mineralien in Pulverform in die Mesokosmen gaben. Schon bei einer Alkalinitäts-erhöhung von 150 Mikromol pro Kilogramm Wasser nahmen die Menge und Biomasse des Mikroplanktons ab. Das galt vor allem für Kieselalgen. Das noch kleinere Nano- und Picoplankton profitierte vom Rückgang der Kieselalgen, wahrscheinlich aufgrund der ungenutzten Nährstoffe. Nachweisliche Effekte gab es allerdings auch beim Zooplankton, sodass der Schwellenwert von einer Alkalinitäts-erhöhung um 150 Mikromol pro Kilogramm Wasser in diesem Fall sowohl für die Algen als auch für das algenfressende Kleinstgetier galt.

Die RETAKE-Expert*innen raten deshalb zur Vorsicht: Ein zu hoch dosierter Eintrag alkalischer Substanzen kann das Gefüge der Planktongemeinschaft und damit das Fundament der Nahrungsnetze verändern. Um die Anwendbarkeit von Methoden zur Alkalinitäts-erhöhung im Ozean im großen Maßstab zu prüfen, müssen deshalb die möglichen Auswirkungen einer zunehmenden Alkalinität umfassend untersucht werden – sowohl im Hinblick auf ganze Meeresgemeinschaften als auch auf relevante Schlüsselarten.

Die Wechselwirkungen innerhalb mariner Lebensgemeinschaften als Reaktion auf eine Alkalinitäts-erhöhung sind komplex und noch nicht vollständig verstanden. Selbst geringe Auswirkungen auf einzelne Arten können zum Beispiel die Zusammensetzung der Mikroalgen-Gemeinschaft verändern. Ein solcher Wandel wiederum könnte erhebliche Auswirkungen auf ihre Populationsgröße und damit auf ihre ökologische und biogeochemische Bedeutung nach sich ziehen. Projekte zur Alkalinitäts-erhöhung des Ozeans sollten deshalb nur dann umgesetzt werden, wenn sie ein engmaschiges Begleitprogramm zum Umweltmonitoring vorsehen.

Wie ein solches Begleitprogramm aussehen muss, ist Gegenstand der aktuellen RETAKE-Forschung. Dabei diskutieren die Fachleute auch, ob die in den bisherigen Experimenten verwendeten Alkalinitätswerte im Falle eines Einsatzes tatsächlich erreicht würden. Denkbar wäre nämlich auch, dass Wind, Wellen und Strömung das stark alkalinierte Wasser innerhalb kurzer Zeit mit dem umliegenden Wasser vermischen würden. Die hohen Alkalinitätswerte würde dann schnell abnehmen und im Laborversuch beobachtete Auswirkungen auf die Planktongemeinschaft eventuell gar nicht auftreten. Welches Laborszenario am ehesten der Realität entspricht, konnte in der ersten Projektphase noch nicht zufriedenstellend beantwortet werden.



Acht führende RETAKE-Expert*innen haben sich außerdem an der Entwicklung eines internationalen Leitfadens für eine verantwortungsvolle Forschung zu Methoden der Alkalinitäts-erhöhung beteiligt. Die Publikation mit dem Titel »Best Practices Guide to Ocean Alkalinity Enhancement Research« beleuchtet den Stand des Wissens zu Stärken und Schwächen verschiedener Ansätze und stellt wichtige Forschungsmethoden wie die Mesokosmen-Experimente näher vor. Auf diese Weise soll es gelingen, Wissenschaftler*innen aus aller Welt zu motivieren, vergleichbare, integrative und öffentlich transparente Forschung zur Alkalinisierung des Ozeans voranzutreiben.

Link zum Leitfaden:

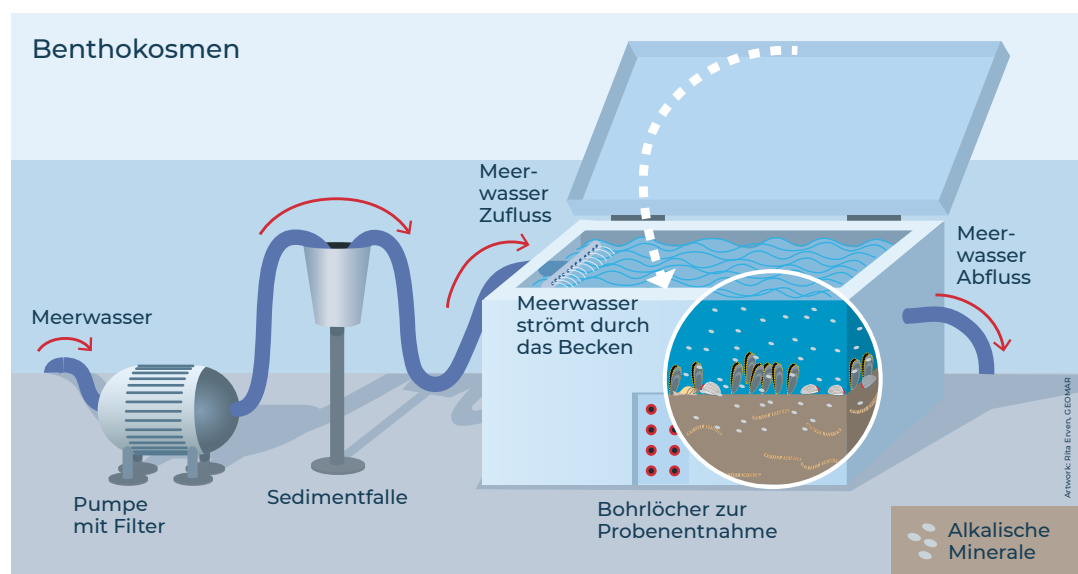
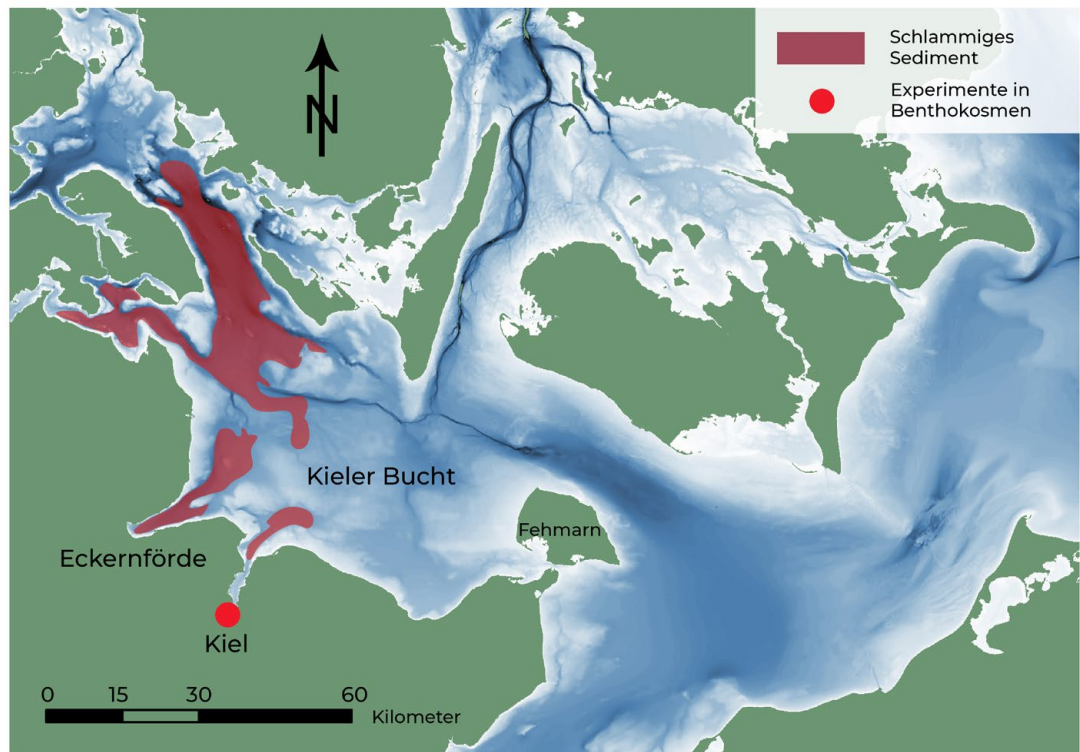
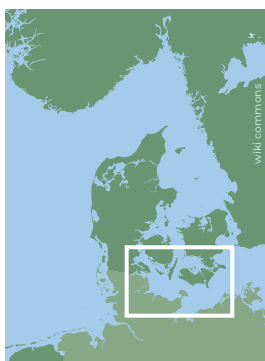
<https://sp.copernicus.org/articles/2-oea2023/>

Kernbotschaft 5

Das Entnahmepotenzial und die Effektivität alkalinitätssteigernder Methoden unterscheiden sich von Meeresgebiet zu Meeresgebiet. Entlang der deutschen Küste gibt es Regionen, in denen ausgewählte Verfahren aus naturwissenschaftlicher Sicht zum Einsatz kommen können.

Alle bisherigen Ergebnisse des Verbundprojektes RETAKE deuten darauf hin, dass die lokalen Umweltbedingungen darüber entscheiden, in welchem Maße sich die verschiedenen Verfahren zur Alkalinitätserhöhung für einen Einsatz vor Ort eignen. Eine relevante Rolle spielen dabei die Temperatur und der Säuregehalt des lokalen Meerwassers, die lokalen Strömungsverhältnisse, der

Grad der Vermischung der Wassermassen sowie in Flachwassergebieten auch die Beschaffenheit des Meeresbodens.



Karte: Michael Fuhr,
Rita Erven, GEOMAR,
Grafik: Rita Erven,
CDRmare

In der westlichen Ostsee gibt es einige Meeresgebiete, in denen der Meeresbodens schlammig und reich an organischem Material ist. Dort könnte eine gezielte Verwitterung von Mineralien am Meeresboden die CO₂-Aufnahme der Ostsee verstärken. Entsprechende Hinweise haben RETAKE-Wissenschaftler*innen in Laborexperimenten gefunden, in denen sie die Verwitterung von Kalzit im kleinen Maßstab ausprobiert haben.

Das Verstreuen von Mineralpulver zum Beispiel bietet sich vor allem in flachen Küstenmeeren an, weil Wind und Wellen die Wassermassen dort bis zum Meeresboden durchmischen. Selbst eine Verwitterung am Meeresboden kann so zu einer zusätzlichen CO₂-Aufnahme an der Meeresoberfläche führen. Sollten Silikatgesteine zum Einsatz kommen, böten warme Meeresregionen die besten Voraussetzungen, weil die chemischen Lösungsreaktionen in warmem Wasser schneller ablaufen als in kaltem.

Ein Ausbringen von Kalkpulver am Meeresboden erzielt dann die besten Entnahmeergebnisse, wenn zum einen das Bodenwasser sehr sauer ist, wie es insbesondere in sauerstoffarmen Gebieten der Ostsee der Fall ist. Zum anderen sollte die obere Meeresbodenschicht besonders schlammig sein, also feinkörnig und reich an organischem Material. Der Einsatz von gemahlenem Silikatgesteinen am Meeresboden hingegen setzt voraus, dass die obere Meeresbodenschicht sehr durchlässig ist und das Bodenwasser durch Strömungen kontinuierlich ausgetauscht wird. Solche Voraussetzungen sind zum Beispiel auf sandigen Flächen gegeben. Doch selbst dort würde es mehrere Jahrzehnte dauern, bis das eingetragene Silikatgestein vollständig verwittert wäre.

In der deutschen Nord- und Ostsee gibt es einige Regionen, in denen die Voraussetzungen für eine beschleunigte Verwitterung von fein gemahlenem Kalkgestein am Meeresboden gegeben sind. Eignen würden sich zum Beispiel Teilgebiete der Eckernförder Bucht an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. Ihr Meeresboden ist schlammig und ausgesprochen reich an organischem Material (Tier- und Pflanzenreste). Außerdem bilden sich im Sommer und Herbst sauerstoffarme Zonen am Meeresboden. Setzen die Organismen am und im Meeresboden unter diesen Bedingungen CO₂ frei, etwa weil sie organisches Material zersetzen, versauert das Tiefenwasser. In leicht angesäuertem Wasser wiederum verwittert Kalkgestein schneller. Durch den gezielten Eintrag von Mineralpulver in den betroffenen Zonen kann demzufolge die Versauerung am Meeresboden rückgängig gemacht und das von den Organismen freigesetzte CO₂ gebunden werden.

Offen bleibt aktuell jedoch, ob durch das gezielte Auflösen von eingebrachtem Kalkpulver die natürlich stattfindende Lösung von Muschelschalen und anderem biogenen Kalk am Meeresboden verzögert würde und ob Muscheln infolge einer gezielten Alkalinitätserhöhung besser wachsen würden und durch die CO₂-Freisetzung bei der Kalkbildung einen Teil der gewünschten CO₂-Entnahme wieder ausgleichen würden. Beide Fragestellungen stehen im Mittelpunkt der RETAKE-Forschungsarbeiten in Förderphase II, die aktuell läuft und im Sommer 2027 abgeschlossen sein wird.

Kernbotschaft 6

Deutschland könnte der Atmosphäre durch den Einsatz von zwei bis drei ausgewählten Verfahren zur Alkalinitätserhöhung in seinen Meeresgebieten pro Jahr mehrere Millionen Tonnen CO₂ entnehmen – und das lange vor dem Jahr 2045, in dem die Bundesrepublik treibhausgasneutral sein möchte.

Alle bisherigen Ergebnisse des Verbundprojektes RETAKE deuten darauf hin, dass die untersuchten Verfahren zur Alkalinitätserhöhung des Ozeans funktionieren; aufgrund der vielen einschränkenden Faktoren jedoch in einem kleineren Maßstab als theoretisch angenommen. Dennoch stellt die Alkalinitätserhöhung einen vielversprechenden Ansatz dar, um beträchtliche Mengen CO₂ dauerhaft aus der Atmosphäre zu entfernen und in den Wassermassen von Nord- und Ostsee zu speichern.

Deutschland könnte zum Beispiel jährlich mehr als 15 Millionen Tonnen CO₂ in seinen Nord- und Ostseegebieten binden, wenn es gelingt, zwei bis drei besonders geeignete Verfahren zu kombinieren. Infrage kommen dabei in RETAKE untersuchte Entnahmeverfahren wie die beschleunigte Verwitterung von fein gemahlenem Kalkgestein am Meeresboden der Ostsee, ein Einsatz vieler Verwitterungsreaktoren entlang großer deutscher Flüsse sowie das Verteilen einer Löschkalk-Lösung auf der Nordsee.

Mithilfe einer beschleunigten Verwitterung am Meeresgrund saisonal sauerstoffarmer Regionen in der gesamten Ostsee ließen sich Berechnungen zufolge in etwa 3,2 Millionen Tonnen atmosphärisches CO₂ pro Jahr chemisch binden, sofern keine, derzeit in RETAKE erforschten Folgeeffekte in der Meereschemie die Effizienz der Methode reduzieren. Dafür müsste man jedoch das Kalkpulver mindestens 10 Jahre lang regelmäßig in den entsprechenden Gebieten ausbringen und verwittern lassen.

Die Idee, Verwitterungsreaktoren im großen Maßstab entlang von Flüssen und an der Küste einzusetzen, böte in Deutschland ein zusätzliches Entnahme- und Speicherpotenzial von schätzungsweise 10 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr. Weitere 5 Millionen Tonnen CO₂ könnten theoretisch gebunden werden, indem man eine Lauge aus Löschkalk und Süßwasser entlang der Schifffahrtswege in der deutschen Nordsee verteilt. Ein solches Vorhaben würde jedoch jede Menge Energie und vor allem die Abscheidung und unterirdische Speicherung des bei der Produktion von Löschkalk anfallenden CO₂ erfordern. Bei der Herstellung von Löschkalk für die meeresbasierte Entnahme von 5 Millionen Tonnen CO₂, entstehen CO₂-Emissionen in Höhe von 3,5 Millionen Tonnen. Diese müssten abgeschieden und geologisch gespeichert werden.

Die technische Machbarkeit der genannten Methoden ist jedoch nur eine von vielen Voraussetzungen für den Einsatz mariner CO₂-Entnahmeverfahren. Es bedarf außerdem eines gesicherten Rechtsrahmens und der notwendigen politischen und gesellschaftlichen Unterstützung. Gebraucht werden zudem etablierte Kontroll- und Steuerungssysteme, um sicherzustellen, dass der Einsatz auf eine maximal nachhaltige Weise erfolgt und jene Ergebnisse erzielt, die er verspricht.

Kernbotschaft 7

Es ist schwierig, die durch Alkalinitätserhöhung erreichte zusätzliche CO₂-Entnahme zu messen und zu verifizieren.

Die schiere Größe des Weltozeans, seine komplexe Meereschemie sowie die großen natürlichen Schwankungen innerhalb des Systems Meer erschweren es Fachleuten enorm, nachzuweisen, wie stark die Alkalinität des Meerwassers nach einem Mineraleintrag gestiegen ist und wie viel zusätzliches Kohlendioxid das Meer dadurch aufgenommen hat. Entsprechende CO₂-Signale werden durch Wind, Wellen und Strömungen viel zu schnell verdünnt und fortgetragen. In vielen Meeresgebieten dauert es deshalb einige Jahrzehnte, bis sich die zusätzliche CO₂-Aufnahme des Ozeans tatsächlich durch Messungen belegen lässt.

Für kurzfristige Berichte und Kontrollen, die zum Beispiel für einen möglichen Zertifikate-Handel gebraucht würden, müsste bis dahin auf Abschätzungen aus theoretischen Überlegungen und kleinskaligen Experimenten oder auf Ergebnisse numerischer Modellierungen zurückgegriffen werden. Eine solche Vorgehensweise wäre jedoch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

Diese Unsicherheiten wiederum erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass effiziente Verfahren zur Alkalinitätserhöhung des Ozeans durch Mineraleinträge wegen mangelnder Nachweisbarkeit nicht zur gezielten CO₂-Entnahme eingesetzt werden. Interessierte Akteure könnten stattdessen auf Verwitterungsreaktoren oder auf Methoden zurückgreifen, bei denen CO₂ abgeschieden und unterirdisch gespeichert wird. Diese sind zwar ressourcenintensiv, dafür lässt sich der Entnahmeerfolg genau messen, dokumentieren und verifizieren.

IMPRESSUM

Dies ist eine Veröffentlichung unter der Creative Commons Lizenz 4.0 International:
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

Text: Sina Löschke, Andreas Oschlies, Maarten Boersma, Michael Fuhr, Judith Hauck, Nils Moosdorf, Jessica Strefler, Gregor Rehder, Ulf Riebesell, Marie-Catherine Riekhof, Niels Suitner, Rüdiger Voss und das RETAKE-Konsortium // Redaktion und Kontakt: Sina Löschke (sloeschke@cdrmare.de) // Design: Rita Erven // GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel // Wischhofstr. 1 – 3 // 24148 Kiel // Februar 2025

Diese CDRmare Insights sind folgendermaßen zu zitieren:

Löschke, S., Oschlies, A., Boersma, M., Fuhr, M., Hauck, J., Moosdorf, N., Strefler, J., Rehder, G., Riebesell, U., Riekhof, M.-C., Suitner, N., Voss, R. und das RETAKE-Konsortium (2025): *CDRmare Insights: Neues Wissen zur CO₂-Entnahme durch die Erhöhung der Alkalinität des Meeres: Die sieben wichtigsten Erkenntnisse aus der RETAKE-Forschung*, pp. 1-12, DOI 10.3289/CDRmare.47



retake.cdrmare.de



cdrmare.bsky.social



[linkedin.com/
company/cdrmare/](https://linkedin.com/company/cdrmare/)



CDRmare
Wissenstransfer
transfer@cdrmare.de



RETAKE – CO₂-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung: Potenzial, Nutzen und Risiken ist ein Forschungsverbund im Rahmen der **Forschungsmission CDRmare**. In der Forschungsmission CDRmare der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) werden verschiedene Methoden der marinen CO₂-Entnahme und Speicherung (Alkalinisierung, Blue Carbon, Künstlicher Auftrieb, CCS) hinsichtlich ihres Potenzials, ihrer Risiken und Wechselwirkungen untersucht und in einem transdisziplinären Bewertungsrahmen zusammengeführt.