

Chemische Methoden

## Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans

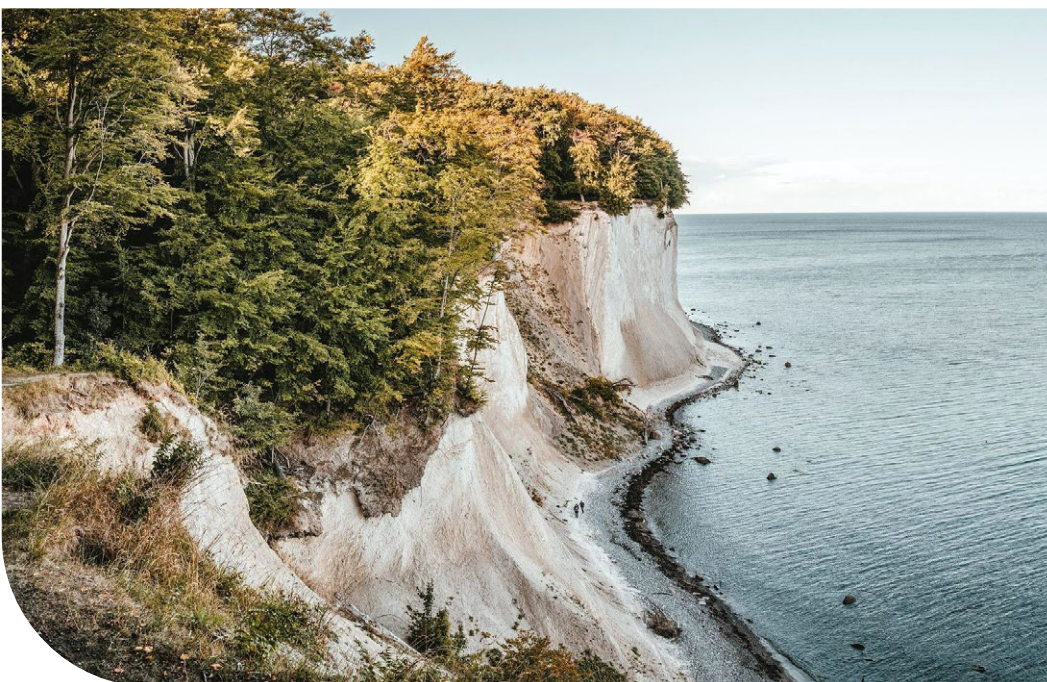
Wie viel Kohlendioxid der Ozean aufnehmen kann, ohne dabei stark zu versauern, hängt von der Alkalinität seines Oberflächenwassers ab. Hinter diesem Begriff verbirgt sich die Menge säurebindender mineralischer Bestandteile, die zuvor aus verwittertem Gestein gelöst und in das Meer eingetragen wurden. 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 Alkalinitätserhöhung. Die Forschungsmission CDRmare untersucht die Potenziale, Machbarkeit und Nebenwirkungen der verschiedenen Verfahren.

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

**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. 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 die Menschheit auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch Kohlendioxid-Restmengen emittieren wird. Deren Höhe liegt voraussichtlich bei 5 bis 15 Prozent der aktuellen Emissionen.

Die Rest-Emissionen müssen ausgeglichen werden. Es gibt verschiedene Lösungsansätze, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen und so einen Ausgleich herzustellen. Eine Grundidee lautet, die Kohlendioxid-Aufnahme der natürlichen Kohlenstoffsinken zu beschleunigen. Dazu gehört neben den Wäldern, Savannen und Feuchtgebieten an Land in erster Linie der Ozean. Seine Wassermassen enthalten heute schon mehr als 50-mal so viel Kohlenstoff wie die Erdatmosphäre und haben in den zurückliegenden Jahrzehnten ein Viertel der vom Menschen verursachten Kohlendioxid-Emissionen aufgenommen und die Erderwärmung so maßgeblich gebremst.



Kreidefelsen auf Rügen. Beispiel natürlicher Erosion und Verwitterung.

Foto: Felix Mittermeier, Pixabay.com

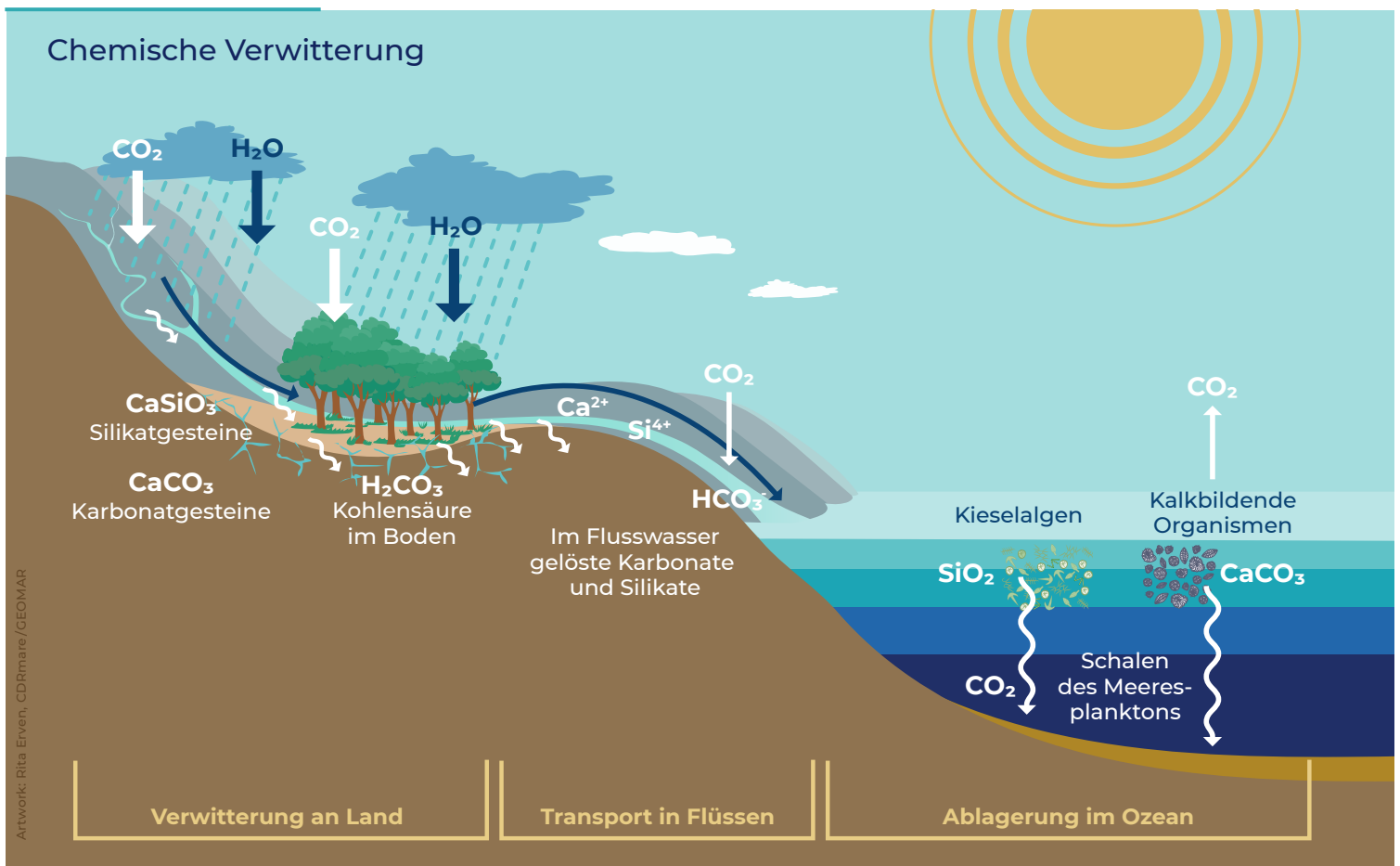
## Die Gesetze der Meereschemie

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

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 Carbonaten 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 mineralischer Bestandteile bestimmt (Hydrogencarbonat, Carbonat, 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.



Der Alkalinitätsgrad des Meerwassers wird durch zwei grundlegende Prozesse bestimmt: zum einen durch den Eintrag von im Wasser gelöster, säurebindender Lösungsprodukte 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 ( $\text{CaCO}_3$ ) ein Teil des vorher gebundenen Kohlendioxids ( $\text{CO}_2$ ) wieder freigesetzt wird.

Grafik: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

## 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.

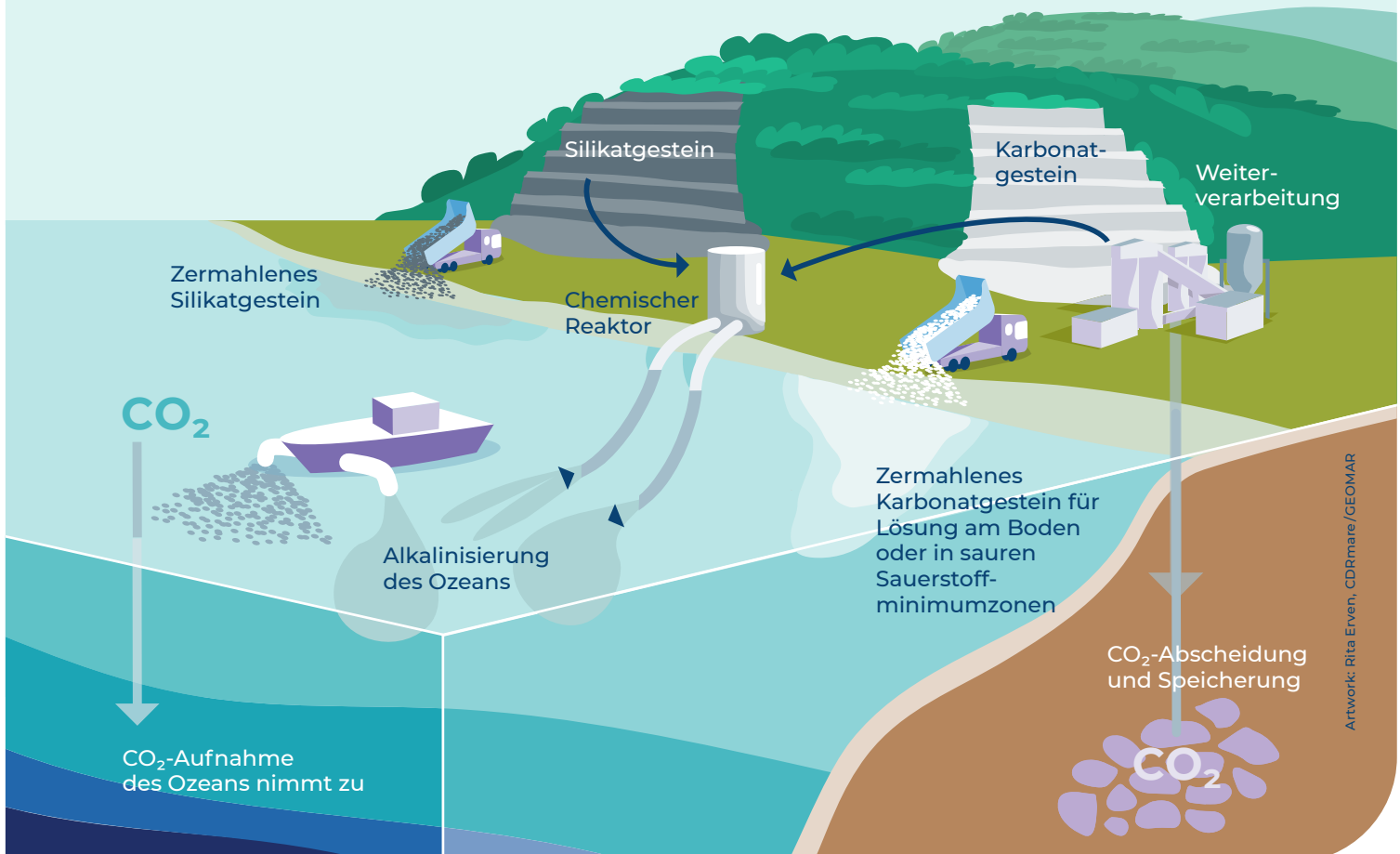
### Alkalinitätserhöhung im Ozean

**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 silikathaltige 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.



Eine Tonne Kohlendioxid entspricht etwa jenen jährlichen Rest-Emissionen, die zur Mitte des Jahrhunderts auf jeden Einwohner und jede Einwohnerin Deutschlands entfallen würden, wenn es wie geplant gelänge, die Treibhausgasemissionen der

Bundesrepublik bis 2045 auf netto-null zu reduzieren. Würde jeder Bürger diese Rest-Emissionen allein durch eine Alkalinitätserhöhung des Ozeans kompensieren wollen, müssten er oder sie pro Tag mehr als ein Kilogramm Basalt oder mehrere Kilogramm Kalk auflösen. Auf alle Einwohner Deutschlands hochgerechnet, entstünde ein zusätzlicher Basaltbedarf von bis zu 32 Millionen Tonnen bzw. ein Kalkbedarf von 100 Millionen Tonnen pro Jahr, bei einer Aufteilung der Kompensation auf mehrere Kohlendioxid-Entnahme-Methoden entsprechend weniger. Global betrachtet müssten für Alkalinisierungsmaßnahmen im erforderlichen Umfang weniger als ein Fünftel der heute weltweit abgebauten Gesteins- und Sandmengen als Ausgangsmaterial bereitgestellt werden.

Sowohl Kalk- als auch Silikatgesteine kommen in einem weit mehr als ausreichenden Maße im Untergrund vor. 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.



Kreideabbau in Lägerdorf. Foto: Joachim Müllerchen, Wiki Commons

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 Alkalinitätserhöhung 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, Transport und 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 Alkalinitätserhöhung des Ozeans ein bedeutsamer Beitrag zum Ausgleich der Rest-Emissionen geleistet werden soll.*

Basaltgestein.  
Foto: Zorion, Wiki Commons

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

Als Folge der Alkalinitätserhöhung 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-

Aufnahme. 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 Hydrogencarbonate 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 Alkalinitäts-erhöhung durchgeführt werden.

Eine wiederholte Alkalinitäts-erhöhung von Wassermassen, die bereits alkaliniert wurden, könnte schließlich zu einer Übersättigung und einem spontanen Ausfällen von Kalk führen, wobei

Kohlendioxid wieder freigesetzt werden würde. Die Alkalinitäts-erhöhung 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 Alkalinitäts-erhöhung aufnehmen würde 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 Alkalinitäts-erhöhung sind bekannt und wie ließen sich diese minimieren?

Über die Risiken und möglichen Umweltbelastungen aller mit einer Alkalinitäts-erhöhung 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 Alkalinitäts-erhöhung 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 Alkalinitäts-erhöhung 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 Meerwasser-Becken, 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 Alkalinitäts-erhöhung 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 (GWDG)

## 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.

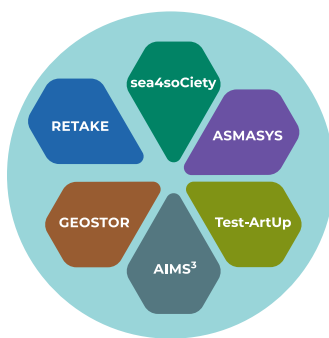
## Würde sich die internationale Klimapolitik ändern, wenn ihre Akteure auf die Option einer Alkalinitätserhöhung zurückgreifen könnten und würde der mögliche Nutzen eines Einsatzes die entstehenden Kosten und Nebenwirkungen rechtfertigen?

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 sozio-ökonomisches 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 – CO<sub>2</sub>-Entnahme durch Alkalinitätserhöhung: Potenzial, Nutzen und Risiken« durchgeführt.

Im Rahmen der Forschungsmission CDRmare der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM), die sich aus rund 200 Forschenden in 6 Verbänden zusammensetzt, werden verschiedene Methoden der marinen CO<sub>2</sub>-Entnahme und Speicherung (Alkalinisierung, Blue Carbon, Künstlicher Auftrieb, CCS) hinsichtlich ihres Potenzials, ihrer Risiken und Trade-Offs untersucht und in einem transdisziplinären Bewertungsrahmen zusammengeführt. Seit August 2021 wird CDRmare in seiner ersten dreijährigen Phase vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit 26 Mio. Euro gefördert.

### 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 // September 2022