

Hintergrund II: Der natürliche Kohlenstoffkreislauf der Erde

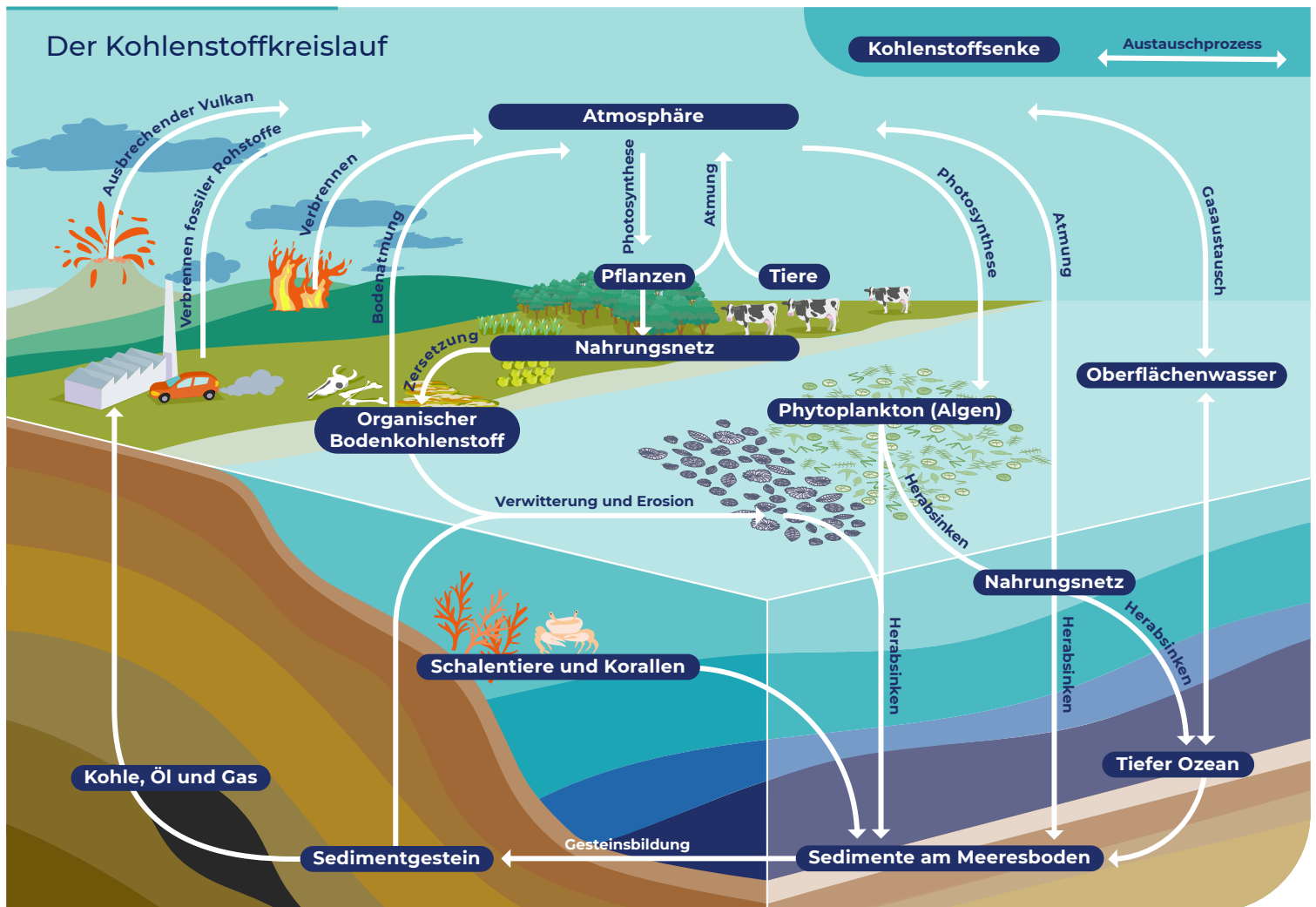
Kohlenstoffspeicher Ozean: So nimmt das Meer Kohlendioxid auf

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 Kohlenstoffaufnahme 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.

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



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.

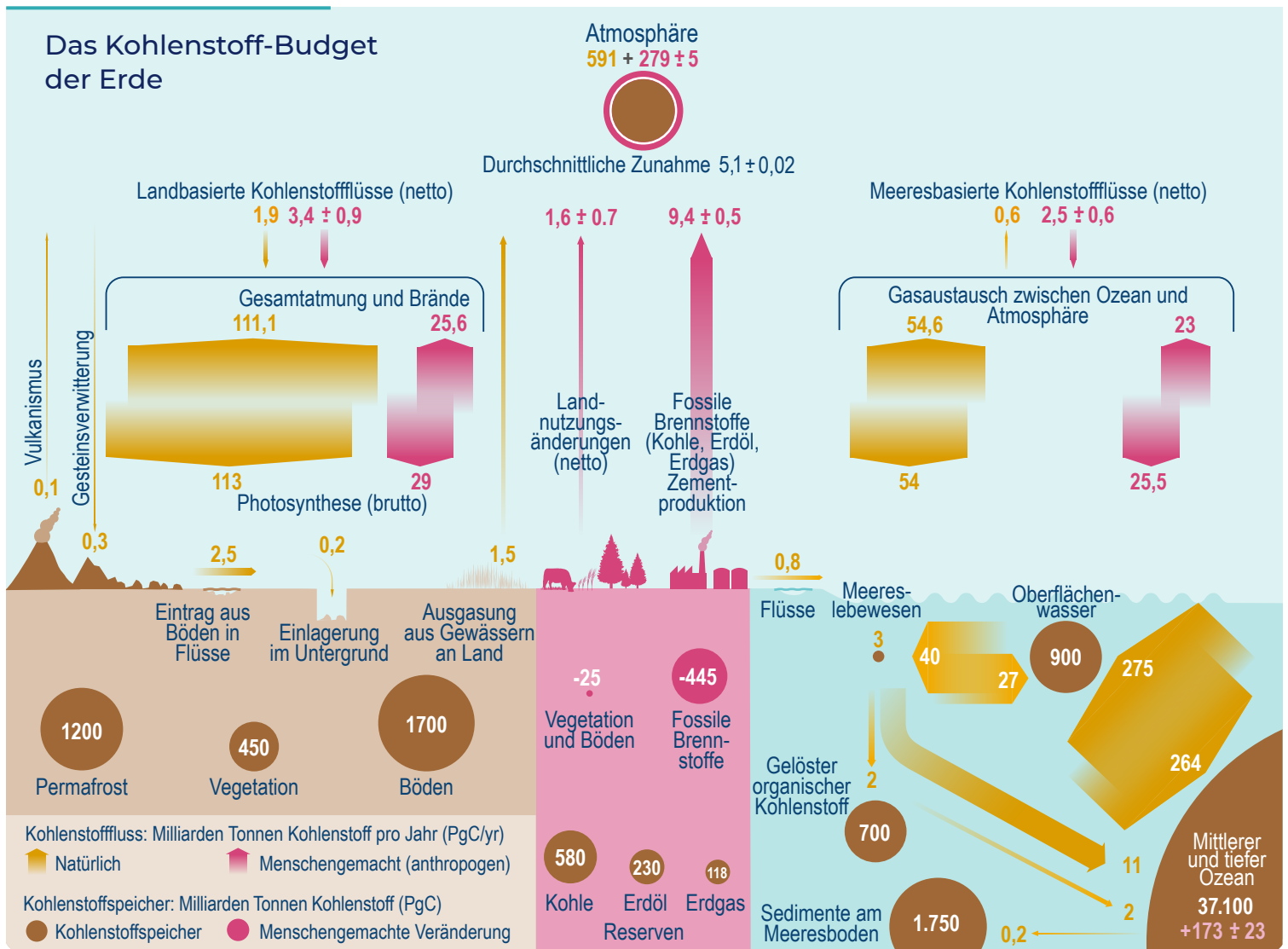
Gratik: Rita Erven/CDRmare

atome 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 (Kohlenstoffsinken) oder aber in diese entlassen (Kohlenstoffquellen).



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

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.

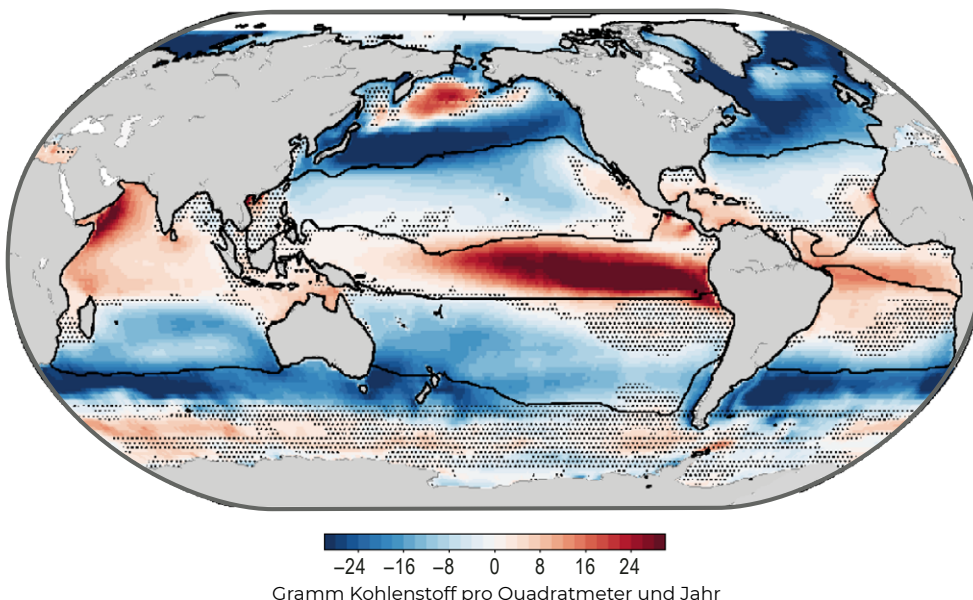
Kohlendioxid-Aufnahme an der Meeresoberfläche

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:

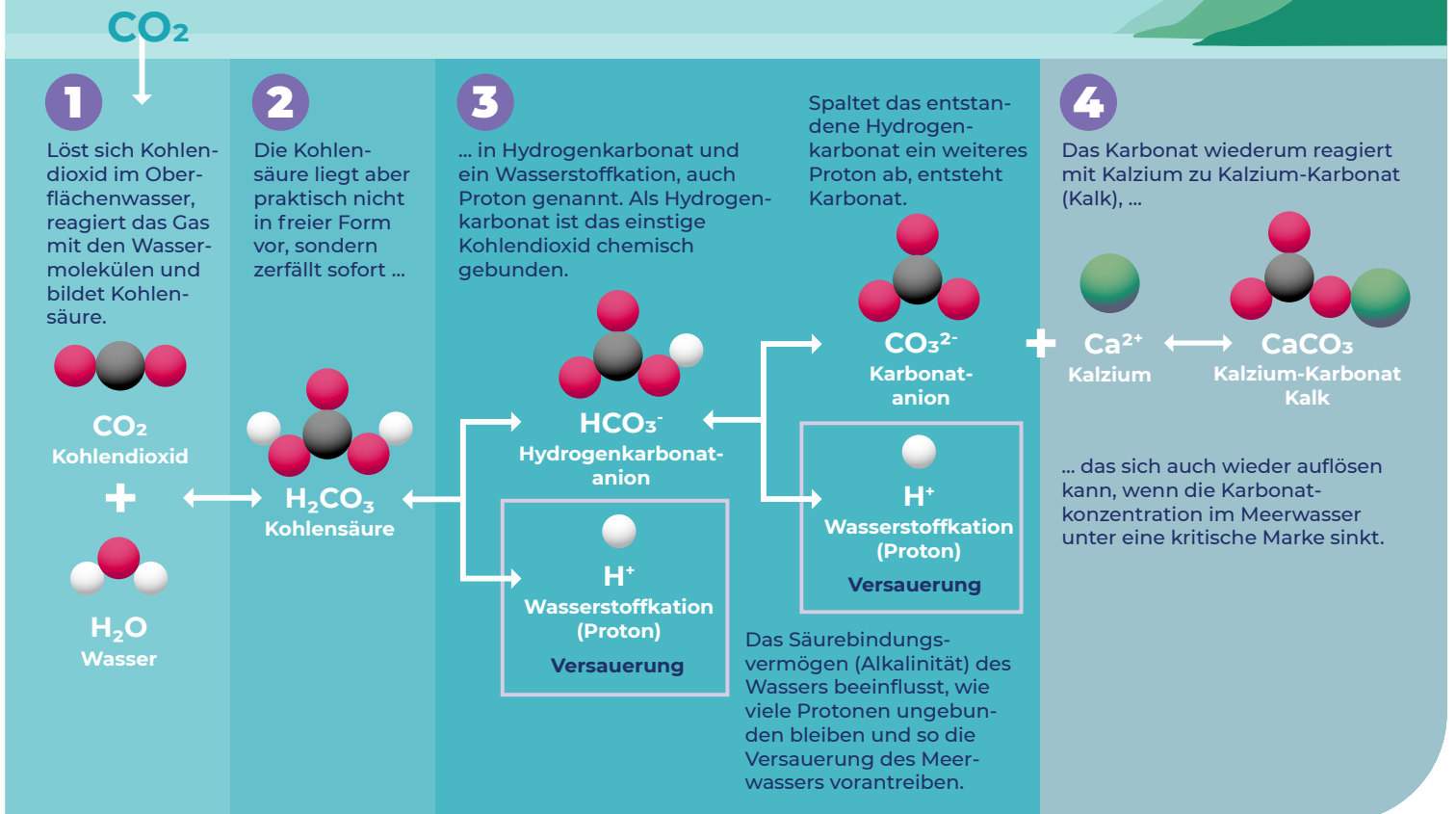
- > als Kohlendioxid (CO_2), welches auch wieder in die Atmosphäre entweichen kann. Es macht nur rund ein Prozent des im Ozean gespeicherten Kohlenstoffs aus, bestimmt aber den Kohlendioxid-Partialdruck des Meerwassers;
- > als Hydrogenkarbonat, welches etwa 90 Prozent des im Ozean gespeicherten Kohlenstoffs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

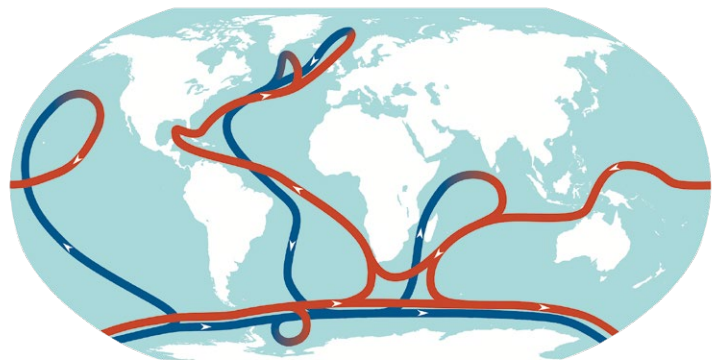
Die drei Kohlenstoffpumpen des Meeres

Sowie die chemische Gleichgewichtsreaktion im Oberflächenwasser beendet ist und Kohlenstoff in seinen drei gelösten Formen Kohlendioxid, Hydrogencarbonat 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, Hydrogencarbonat, 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.

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

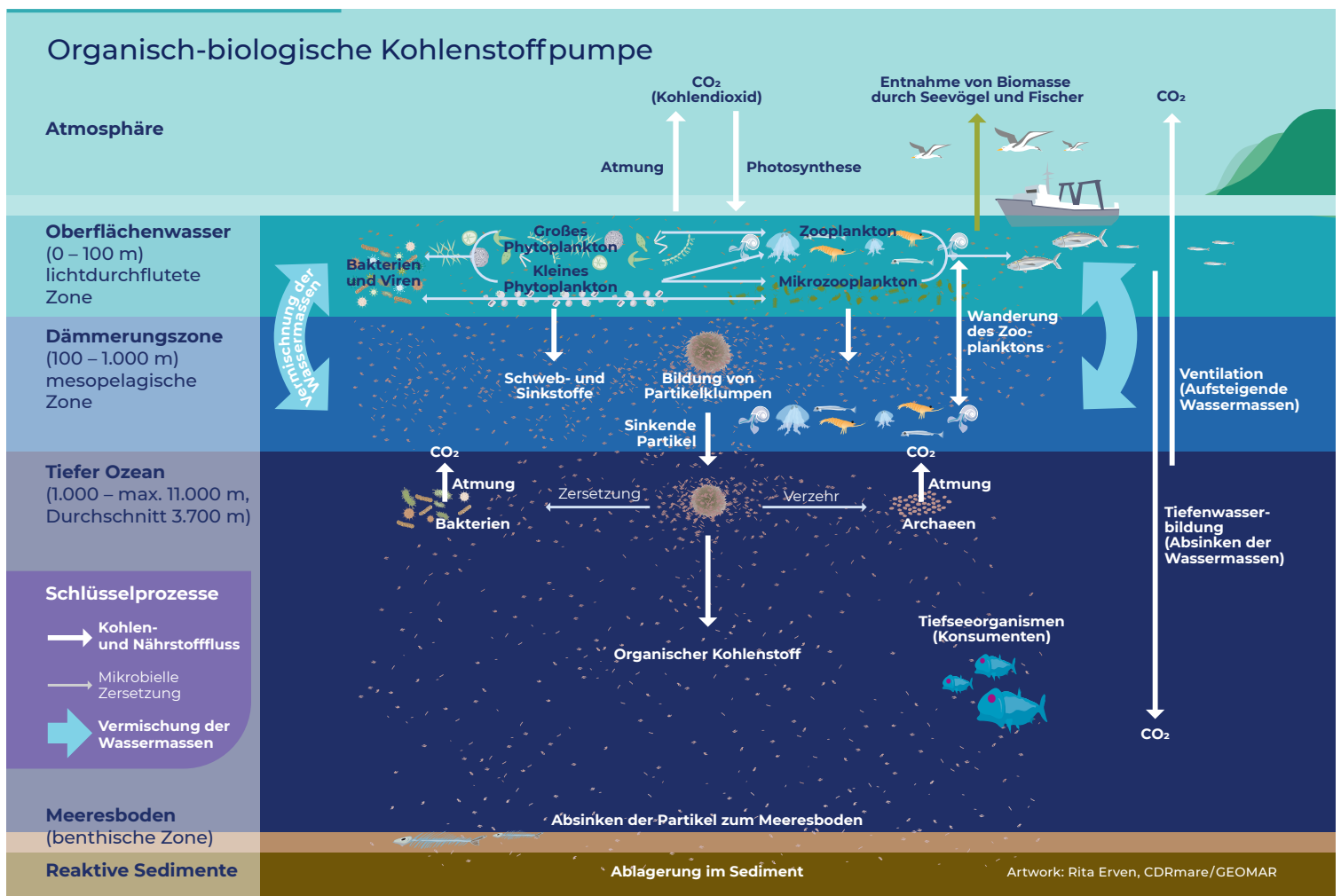
Bis dieses kohlenstoffreiche Tiefenwasser wieder an die Meeresoberfläche zurückkehrt und erneut in den Gasaustausch mit der Atmosphäre eintreten kann, vergehen Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Eines Tages aber steigen die Wassermassen wieder auf – meist in einem der sogenannten küstennahen Auftriebsgebiete 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 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



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 nach einer Vorlage des Office of Biological and Environmental Research of the U.S. Department of Energy Office of Science.

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.

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 kohlenstoffhaltigen 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 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 zwar nur auf 0,2 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 einen 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 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.

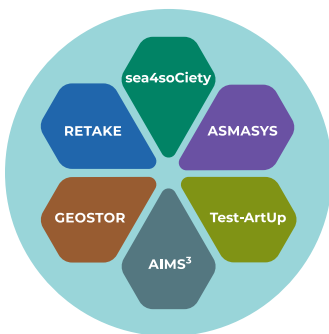
Forschungsmission CDRmare: Wie lässt sich die Kohlenstoffaufnahme des Ozeans verstärken?

Selbst bei ambitionierter Klimapolitik und maximalen Anstrengungen, die menschengemachten Kohlendioxid-Emissionen zu reduzieren, wird die Menschheit in drei Jahrzehnten voraussichtlich noch immer 5 bis 15 Prozent der aktuellen Kohlendioxid-Emissionen freisetzen und die Erderwärmung weiter vorantreiben. Ein möglicher Ausweg: Ein Ausgleich dieser nicht 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.



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.

IMPRESSUM

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel // Wischhofstr. 1–3 // 24148 Kiel
// **Verantwortlich für den Inhalt:** Andreas Oeschlies, Gregor Rehder, Achim Kopf, Ulf Riebesell, Klaus Wallmann, Martin Zimmer // **Redaktion:** Ulrike Bernitt (ubernitt@geomar.de) // **Texte:** Sina Lösckke (schneehohl.net) // **Design und Grafiken:** Rita Erven // 31. Juli 2022