



# CDRmare Science Stories

Die CDRmare Science Stories sind im Rahmen der Forschungsmission »Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung (CDRmare)« der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) entstanden.

CDRmare startete im Sommer 2021 mit sechs Forschungsverbänden, die verschiedene Methoden der marinen CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Speicherung (Alkalinisierung, Ausweitung vegetationsreicher Küstenökosysteme, Künstlicher Auftrieb, CCS) hinsichtlich ihres Potenzials, ihrer Risiken und Wechselwirkungen untersuchen und in einem transdisziplinären Bewertungsrahmen zusammenführen.

Im August 2024 ist CDRmare mit fünf Forschungsverbänden in die zweite dreijährige Förderphase gestartet. Gefördert wird CDRmare vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und den Wissenschaftsressorts der norddeutschen Bundesländer (Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Schleswig-Holstein).

# **CDRmare Science Stories**



# CDRmare Science Stories

## Inhalt

Vorwort . . . . .	6
Wie viel Kohlenstoff speichern Deutschlands Salzmarschen? . . . . .	9
Wie reagiert das Leben im Meer? . . . . .	21
Ein Forschungsduo trotz dem Druck . . . . .	33
Alle Hoffnung auf die neongrüne Wolke . . . . .	45
Auf den Aha-Moment kommt es an . . . . .	55
Ein Wegbereiter aus Überzeugung . . . . .	63
Fragen der Gerechtigkeit . . . . .	75
Das 10 Millionen-Tonnen-Ziel . . . . .	85
Ergänzende Begriffserklärungen . . . . .	95
Impressum . . . . .	106



# Vorwort

Foto: Javier Saint-Jean/unsplash.com

Seit dem Jahr 2021 arbeiten rund 200 Forschende im Rahmen der Forschungsmission CDR<sub>mare</sub> zu marinen CO<sub>2</sub>-Entnahme-Methoden. Dieses kleine Buch erzählt die Geschichten einiger dieser Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler – von ihrer Forschung, ihren Herausforderungen und ihrer Motivation. Doch warum beschäftigen wir uns mit dem Thema CO<sub>2</sub>-Entnahme?

Spätestens seit der Veröffentlichung des 6. Sachstandsberichts des Weltklimarats wissen wir: Die globale Erwärmung lässt sich bis zum Jahr 2100 aller Voraussicht nach nicht allein durch die Vermeidung von Treibhausgasemissionen auf unter zwei Grad Celsius begrenzen. Um das Ziel des Pariser Klimaschutzabkommens dennoch einzuhalten, müssen wir so schnell wie möglich alle vermeidbaren Treibhausgasemissionen einstellen und zusätzlich Kohlendioxid gezielt aus der Atmosphäre entfernen, um die nicht vermiedenen Emissionen auszugleichen. Nur durch ein Erreichen des Netto-Null-Ziels (CO<sub>2</sub>-Neutralität)– können wir die globale Erwärmung stoppen. Bis dahin steigt jedoch mit jeder Emission die globale Temperatur und damit das Risiko für schwerwiegende Klimaschäden für Mensch und Natur.

Aktuell entstehen schwer vermeidbare Treibhausgasemissionen in der Zement- und Düngemittelproduktion, in der Landwirtschaft, zum Beispiel bei der Tierzucht und im Ackerbau, aber auch im Flug- und Schwerlast-

transport sowie bei der Müllverbrennung. Alle diese Emissionen sind strenggenommen nicht unvermeidbar, ihre Vermeidung würde aber gegebenenfalls extreme ökonomische oder soziale Kosten verursachen. Es gibt bisher keinen gesellschaftlichen Konsens darüber, wie hoch die nicht vermiedenen Emissionen in der Zukunft sein und wie sie auf verschiedene Sektoren verteilt werden sollen. Um jedoch das Netto-Null-Ziel zu erreichen und die globale Erwärmung zu stoppen, bleibt uns keine andere Wahl, als diese sogenannten Rest-Emissionen durch eine gezielte Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre auszugleichen.

Aber wie effizient sind die verschiedenen Methoden zur CO<sub>2</sub>-Entnahme? Welche Auswirkungen haben sie auf die Biodiversität sowie auf sozio-ökologische Systeme? Können die Ansätze tatsächlich großflächig eingesetzt werden, um genug CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entfernen? Welche Methoden lassen sich kombinieren, und welche Wechselwirkungen ergeben sich dabei? Wie gehen wir mit wissenschaftlichen Unsicherheiten um? Welche Verantwortung tragen wir gegenüber zukünftigen Generationen? Und wie können wir marine CO<sub>2</sub>-Entnahme-Technologien verifizieren und regulieren?

Fragen wie diese erforschen unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, indem sie zum Beispiel Kohlenstoffflüsse messen, tief in den Meeresboden bohren, oder Laborexperimente durchführen. Andere benutzen Modelle, Szenario-Analysen, oder Plausibilitätstest oder ergründen, wie Rechtsnormen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Speicherung ausgelegt werden müssen.

Dieses Buch möchte Ihnen Einblicke geben – in die wissenschaftliche Arbeit, die Motivation und den Alltag unserer jungen Forschenden. Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Kennenlernen dieser engagierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler!

*Nadine Mengis*                      *Andreas Oschlies*  
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

*Alexander Proelß*                      *Gregor Rehder*  
Universität Hamburg                      Institut für Ostseeforschung  
Warnemünde

Vorsitzende der Forschungsmission CDRmare



# Wie viel Kohlenstoff speichern Deutschlands Salzmarschen?

Foto: Ella Logemann/Universität Hamburg

## CDRmare-Expertinnen liefern erste Bestandsaufnahme

Die Hamburger Biologinnen Ella Logemann und Clarisse Gösele haben geschafft, was zuvor niemand gewagt hat. In monatelanger Feld- und Laborarbeit haben sie herausgefunden, wie viel Kohlenstoff Deutschlands Salzmarschen speichern und welche Treibhausgasmengen die Küstenökosysteme abgeben. Ihre Forschungsergebnisse werden nun helfen, zu entscheiden, ob und wo eine Wiederherstellung und Erweiterung der Salzmarschen aus Sicht des Klimaschutzes sinnvoll wären.

Für die Hamburger Biologin Ella Logemann gibt es keinen spannenderen Arbeitsplatz als die Salzmarschen entlang der deutschen Nordseeküste. »Mich fasziniert, in welchem Umfang die Marschen ständigen Veränderungen unterworfen sind. Egal, wie oft ich zu den Salzmarschen hinausfahre, immer sehen sie anders aus. Mal verändert sich der Himmel oder die Farben der Pflanzen. Ein anderes Mal haben die Gezeiten Wattboden an einer Stelle abgetragen oder andernorts angespült. Immer aber fühlt es sich so an, als würde ich an einen neuen Ort ankommen«, erzählt die Doktorandin vom Institut für Pflanzenwissenschaften und Mikrobiologie der Universität Hamburg voller Begeisterung.



In pastell-violett blüht der Gewöhnliche Strandflieder (*Limonium vulgare*) eine Pflanze, die Biologin Ella Logemann häufig bei ihren Vegetationsanalysen gefunden hat. Der Strandflieder wächst vor allem in der unteren Marsch. So heißt jener Teil der Salzwiese, der bei Springflut überflutet wird.

Fotos: Ella Logemann & Kathryn Nicol/Universität Hamburg



Sie und ihre Institutskollegin Clarisse Gösele müssen es wissen: Für ihre gemeinsame Forschung im CDRmare-Verbund sea4soCiety haben die beiden Hamburger Wissenschaftlerinnen die Salzmarschen an Deutschlands Nord- und Ostseeküste fast ein Jahr lang ausgiebig untersucht. Ihr Ziel war es, herauszufinden, wie groß die Kohlenstofflagerstätten unter den Ökosystemen in der Übergangszone zwischen Land und Meer sind und welche Treibhausgase sie aufnehmen und wieder freisetzen. Clarisse Gösele übernahm dabei die schwierige Analyse der Treibhausgase Methan, Lachgas und  $\text{CO}_2$ , Ella Logemann konzentrierte sich auf die Untersuchungen des Bodenkohlenstoffs und der Vegetation. Außerdem wollten die beiden Forscherinnen wissen, ob beziehungsweise wie von Schafen oder Rindern beweidete Salzmarschen sich hinsichtlich ihrer Kohlenstoff- und Treibhausgasbilanz von ungestörten Marschen unterscheiden.

## Ökosysteme mit zusätzlichem Klimanutzen?

Dass es auf diese Fragen bis zu diesem Jahr noch keine Antworten gab, verdeutlicht, welche untergeordnete Rolle die Salzmarschen der deutschen Nord- und Ostsee bislang in der nationalen Klimaschutzdebatte gespielt



An der deutschen Nordseeküste kommen Salzmarschen sowohl auf dem Festland als auch auf den Inseln vor. Ihre Gesamtfläche beläuft sich auf 46.000 Hektar.

Foto: Clarisse Gösele/Universität Hamburg

haben. In Zeiten des drastischen Klimawandels aber wächst ihre Bedeutung. Jeder Ansatz, der helfen kann, dass Deutschland sein Ziel der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 erreicht, muss untersucht werden. Nur so lässt sich die globale Erderwärmung bremsen.

Salzmarschen wiederherzustellen, sie neu anzulegen oder aber zu erweitern, ist eine von vielen Ideen, mit denen die natürliche CO<sub>2</sub>-Aufnahme der Meere verstärkt werden könnte. »Die Pflanzengemeinschaften der Salzwiesen nehmen Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und binden einen Teil des enthaltenen Kohlenstoffs durch Photosynthese«, erläutert Clarisse Gösele. »Anschließend lagern sie den Kohlenstoff in ihren Blättern und im Wurzelwerk ein, indem sie dort neue Biomasse bilden und wachsen. Sterben Wurzeln oder Blätter ab, wird das kohlenstoffreiche Pflanzenmaterial im Boden eingelagert und im Idealfall für Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte klimasicher weggeschlossen, denn die Gezeiten des Meeres versetzen die Salzwiesen in die Lage, im Untergrund eingelagertes Pflanzenmaterial besonders lange zu konservieren«, so die Wissenschaftlerin.

Durch die regelmäßigen Überflutungen wird der Marschboden wiederkehrend durchnässt. Wasser dringt dabei ins Erdreich und verdrängt die Luft aus den winzigen Bodenporen. Sauerstoffzehrenden Bodenmikroben fehlt so gewissermaßen die Atemluft, die sie bräuchten, um das eingelagerte Pflanzenmaterial zu zersetzen. Abgeschnitten von der Sauerstoffzufuhr, bleiben die gefräßigen Mikroorganismen weitgehend inaktiv und die Kohlenstofflagerstätten unter den Salzwiesen zum Großteil erhalten. Einige Zersetzungsprozesse finden aber dennoch statt – ausgelöst von Mikroben, die ohne Sauer-



Die Salzmarschen auf dem Festland wurden bis zur Gründung der Wattenmeer-Nationalparks intensiv von Menschen genutzt, vor allem als Weidegrund (oben). Die Inselmarschen hingegen wurden in der Regel sich selbst überlassen und gelten deshalb als »naturbelassen« (unten). Fotos: Clarisse Gösele, Ella Logemann/Universität Hamburg

stoff auskommen. Diese setzen zwar nicht annähernd so viel Biomasse um wie sauerstoffzehrende Mikroben, dafür aber produzieren sie unter anderem das klimaschädliche Treibhausgas Methan.

### Jede Marsch ist anders

Für ihre Feldarbeit reisten Ella Logemann und Clarisse Gösele immer wieder quer durch Norddeutschland. Ihr Weg führte die Wissenschaftlerinnen von der Leybucht in Ostfriesland bis hoch zur Nordseeinsel Sylt, und von dort in die Schlei-Mündung kurz vor Dänemark bis zu einer Insel im Peene-Strom kurz vor der polnischen Grenze. Die untersuchten Salzmarschen konnten sie in drei Typenklassen einteilen – in Festlandmarschen, Inselmarschen und Ostseemarschen.

Als Festlandmarschen werden die Salzwiesen an der Nordseeküste bezeichnet. »Sie liegen vor den Deichen und tragen zum Küstenschutz bei. Sie werden teilweise beweidet und sind in der Regel von geraden Entwässerungsgräben durchzogen. Die Entwässerung zielte darauf ab, die Marschen für die Landwirtschaft besser nutzbar zu machen«, erläutert Ella Logemann.

Im Gegensatz dazu sind die Inselmarschen weitgehend naturbelassen. Sie wachsen auf den Nordseeinseln zumeist im Schutz der Dünen und damit auf sehr sandigem Boden. An der Ostseeküste hingegen existieren Salzmarschen im Stil der Nordsee-Marschen nur dort, wo sie von Rindern oder Schafen

Überlebenswichtig und schützenswert: Salzmarschen bremsen Wellen aus, reinigen das Meerwasser und dienen unter anderem Seevögeln wie dem Austernfischer als Rastplatz oder Brutstätte. Ihre Bedeutung für Mensch und Natur geht deshalb weit über ihre Klimaschutzleistung hinaus. Fotos: Clarisse Gösele/Universität Hamburg, MabelAmber/Pixabay





Um den Bodenkohlenstoffgehalt der Salzwiesen zu bestimmen, stach Ella Logemann 100 Zentimeter lange Bodenkerne aus dem Wiesenuntergrund. Dazu benutzte sie einen Moorkammerbohrer. Dieser wurde mit einem Hammer in den Boden geschlagen und anschließend einmal um die Längsachse gedreht. Dabei schnitt der Bohrer die Bodenprobe mit seiner scharfen Längskante aus dem Untergrund, sodass die Biologin den Kern im Anschluss herausziehen konnte. Fotos: Kathryn Nicol & Ella Logemann/Universität Hamburg

beweidet werden. Die Tiere verdichten durch ihren Weidegang den Boden, sodass der Salzgehalt im Erdreich steigt und die typischen Salzpflanzen sich ausbreiten. Überflutungen mit dem Ostseewasser allein reichen nicht aus, um weniger salztolerante Gräser und Pflanzen zu verdrängen.

### **Mit Ausdauer, Muskelkraft und richtig viel Geduld**

In 14 ausgewählten Salzmarschen stach Ella Logemann bei ihrer Rundreise mit einem Moorkammerbohrer eine Vielzahl von Bodenproben aus dem Untergrund und analysierte die Pflanzenvielfalt. In sechs Marschen hatte Clarisse Gösele jeweils zehn Rundrahmen aus Plastik im Boden eingelassen – einmal quer über die Marsch verteilt. Diese brauchte sie, um ihre Messkammer für die regelmäßigen Treibhausgasmessungen darauf zu befestigen.



Am Rande eines natürlich entstandenen Grabens hat Ella Logemann zwei kleine Messrahmen ausgelegt. Diese markieren jene Flächen, auf denen die Biologin alle Pflanzen bestimmen und zum Teil mitnehmen wird, um untersuchen zu können, welche Pflanzengemeinschaft den meisten Kohlenstoff im Untergrund einlagert. Dieselben Arbeiten hat sie auch auf beweideten Salzmarschen durchgeführt, wie das rechte Bild zeigt. Zu erkennen sind darauf auch von Menschen angelegte, gerade Entwässerungsgräben.

Fotos: Kathryn Nicol & Ella Logemann/Universität Hamburg

Die unterschiedlichen Messstationen anzulaufen, fühlte sich für beide wie ein Kraft-Ausdauermarsch bei der Bundeswehr an. »Meine Praktikantin und ich transportierten unsere gesamte Ausrüstung im Rucksack. Dazu gehörten der Vorschlaghammer, verschiedene Stahlbohrer, unsere Proben-Behältnisse und vieles mehr. Auf dem Rückweg kamen dann noch die vielen Kilos der Bodenproben dazu. Wir waren also wirklich schwer bepackt«, erzählt Ella Logemann. »Ein Hindernis stellten auch die Gräben in den Salzmarschen dar, wegen derer wir oft Umwege gehen mussten. Ich hatte zum Glück einen Wagen dabei, in dem ich meine zwei 15 Kilogramm schweren Messkoffer und alle anderen Utensilien hinter mir herziehen konnte«, sagt Clarisse Gösele.

Auf die körperlich und mental herausfordernde Arbeit im Feld folgten Hunderte Stunden Laborarbeit. 1500 Einzel-Bodenproben mussten geknetet,



Ob Schneefall, Nieselregen oder Sonnenschein: Mit Ausdauer und Hartnäckigkeit führte Clarisse Gösele ihre Treibhausgasmessungen durch. Dazu setzte sie ihre Messkammer auf einen vorinstallierten Rahmen, schloss alle Leitungen und die Messgeräte an, erfasste die Gaszusammensetzung der Umgebungsluft und maß im Anschluss, wie sich die Konzentration von Methan, Lachgas und Kohlendioxid in der Messkammer veränderten. Zehn Stationen pro Salzmarsch bedeuteten, dass Clarisse Gösele (im letzten Bild rechts) ihre Messinstrumente sowohl im überfluteten Teil der Marsch aufbaute als auch weiter landeinwärts, wo die Vegetation mitunter hüfthoch steht.

Fotos: Caroline Chen & Clarisse Gösele/Universität Hamburg



Foto: Clarisse Gösele/Universität Hamburg

homogenisiert, getrocknet, gewogen, im Mörser zerkleinert, angesäuert und noch einmal getrocknet werden, bevor schlussendlich der Anteil des organischen Kohlenstoffs gemessen werden konnte. »Zum Glück hatte ich Studentinnen, die mir bei dieser Arbeit geholfen haben«, sagt Ella Logemann rückblickend. Clarisse Gösele kämpfte sich derweil durch biogeochemische Feinanalysen, mit denen sie zum Beispiel den Sauerstoffgehalt des Bodens bestimmte, sowie durch ein 3000 Zeilen langes Treibhausgas-Auswertungsskript. Dessen Anleitung musste sie folgen, um die Rohdaten aus den im Feld gemessenen Treibhausgasflüssen zu extrahieren. Anschließend mussten die Rohdaten noch statistisch ausgewertet werden.

### **Salzmarschen so trocken wie eine normale Graslandschaft**

Die Forschungsergebnisse der beiden Wissenschaftlerinnen offenbarten deutliche Unterschiede zwischen den Marschtypen. »Die Ostseemarschen emittieren deutlich mehr Methan als die Festlandmarschen an der Nordseeküste«, sagt Clarisse Gösele. »Erklären lässt sich diese Beobachtung damit, dass der Boden in den Ostseemarschen nicht so gut durchlüftet ist wie der Boden in den Nordseemarschen – und wo Sauerstoff fehlt, produzieren Mikroorganismen gern Methan.«

Außerdem konnte sie feststellen, dass in den Festlandmarschen wenig Methan in den tieferen Bodenschichten entsteht. Dieser Umstand führt dazu, dass methanzehrende Mikroben in den oberen Bodenschichten Methan aus der Atmosphäre aufnehmen und in CO<sub>2</sub> umwandeln. »Am Anfang meiner Arbeit bin ich davon ausgegangen, dass ich aufgrund dessen, dass Marschen Feuchtgebiete sind, keinerlei Anzeichen einer Methanaufnahme messen werde. Jetzt aber weiß ich, dass einige der Salzmarschen in Deutschland so trocken sind, dass sie sich teilweise wie eine normale Graslandschaft verhalten – und in Graslandschaften wurde beobachtet, dass atmosphärisches Methan zu CO<sub>2</sub> veratmet wird.«

Interessant ist außerdem: Wo Salzmarschen entwässert werden, um eine Beweidung durch Schafe oder Rinder zu ermöglichen, ist der Boden besser durchlüftet als auf unbeweideten Flächen. Die verbesserte Sauerstoffzufuhr wiederum bewirkt, dass im Boden beweideter Marschen weniger Methan produziert wird als im Untergrund nicht-beweideten Marschen.

### **Kohlenstoffeinlagerung: International im Mittelfeld**

Im Hinblick auf ihren Bodenkohlenstoffgehalt belegen die deutschen Salzwiesen im internationalen Vergleich Plätze im Mittelfeld. Betrachtet man den Oberboden, speichern die Ostseemarschen in etwa doppelt so viel Kohlenstoff wie die Nordseemarschen. »Dabei fällt auf, dass vor allem in den Nordseemarschen die beweideten Flächen sehr viel mehr Kohlenstoff in die obere Bodenschicht eintragen als die nicht-beweideten Salzmarschen«, sagt Ella Logemann.

Wie dieses Kohlenstoffplus im Oberboden entsteht, kann aufgrund komplexer Wechselwirkungen im Boden aktuell nicht eindeutig bestimmt werden. »Wird eine Salzmarsch beweidet, passieren verschiedene Dinge. Zum einen fressen die Tiere die oberirdische Biomasse weg, was sich erst einmal negativ auf den Kohlenstoffeintrag auswirkt. Es kann aber auch bewirken, dass die Salzwiesenpflanzen dann deutlich mehr Energie in den Aufbau ihrer Wurzeln und damit in ein System investieren, das Kohlenstoff sehr gut speichern kann«, so die Biologin. »Zum anderen verdichten die Tiere den Boden. Die daraus folgenden biogeochemischen Veränderungen können einen positiven Einfluss auf die Kohlenstoffeinlagerung haben. Beweidung führt somit auf verschiedenen Ebenen zu Veränderungen«, führt Ella Logemann fort.



Die Farbpalette der Bodenproben aus den untersuchten Salzmarschen reicht von fast gelb bis dunkelbraun. Diese Spannweite deutet an, wie stark der Anteil des organischen Kohlenstoffs variiert. Foto: Ella Logemann/Universität Hamburg

Wissen sollte man aber auch, dass in Deutschland vor allem die beweideten Salzwiesen stark entwässert werden. »Und Entwässerung geht damit einher, dass der Kohlenstoff im Boden stark zersetzt werden kann, weil das Erdreich viel besser durchlüftet ist. In den von mir untersuchten Flächen scheint jedoch der positive Effekt der Bodenverdichtung größer zu sein als die negativen Effekte der Bewässerung. Das heißt, auch die beweideten Salzmarschen lagern aktuell mehr Kohlenstoff im Untergrund ein als zersetzt wird« erläutert Ella Logemann.

Am Ende entscheiden jedoch die konkreten Umweltbedingungen vor Ort, welche Salzpflanzen in einer Marsch wachsen, wie viel Kohlenstoff sie aufnehmen und binden, bis in welche Bodentiefe dieser eingelagert wird und in welchem Tempo und welcher Form Mikroben das eingelagerte Material wieder zersetzen.

## Die Zukunft der Salzmarschen in einer wärmeren Welt

Die Bestandsaufnahme zur Kohlenstoffspeicherung und zu den Treibhausgasflüssen in deutschen Salzmarschen war für beide Wissenschaftlerinnen allerdings erst der Anfang. Für ihre Doktorarbeiten untersuchen sie in weiterführenden Experimenten, wie sich die Pflanzenvegetation und die Treibhausgasflüsse der Salzwiesen in einer 1,5 oder 3 Grad Celsius wärmeren Welt verändern werden. Diese Studien sind nicht Teil der CDRmare-Forschung. Ihre Ergebnisse aber werden für unseren künftigen Umgang mit den norddeutschen Salzwiesen eine ebenso wichtige Rolle spielen wie die Daten zur aktuellen Klimaschutzleistung dieser wertvollen Küstenökosysteme.

---

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



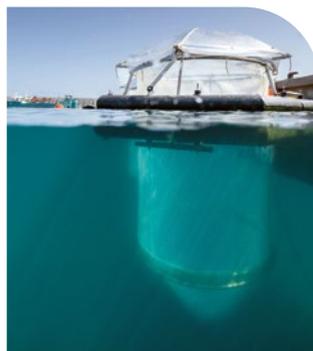
# Wie reagiert das Leben im Meer?

Foto: Amrita Bhaumik/Alfred-Wegener-Institut

## Experimente zur Alkalinitätserhöhung des Ozeans

Technische Verfahren zur Alkalinitätserhöhung des Ozeans gelten als vielversprechende Methoden, um die natürliche Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans zu verstärken. Eine zentrale Frage aber kann die Wissenschaft bis heute nicht beantworten: Welche Auswirkungen hätten Eingriffe in die Meereschemie für die Lebewesen des Ozeans? Die Meeresbiologinnen Amrita Bhaumik, Leila Kittu, Giulia Faucher und ihr Team suchen auf Helgoland nach Antworten – mit Experimenten in Mesokosmen, in denen die Forschenden einen Einsatz alkalinitätserhöhender Verfahren so realitätsnah nachstellen wie selten zuvor. Ihr Ziel: die Auswirkungen auf die Meeresumwelt möglichst verlässlich abschätzen zu können.

Die Uhr tickt und mit jedem Tag verrinnt die Zeit für Amrita Bhaumik, Leila Kittu und Giulia Faucher ein bisschen schneller. So fühlt es sich zumindest an im Frühjahr 2023. Denn während die drei Meeresforscherinnen und ihre Kolleg\*innen das dritte einer Reihe von Forschungsexperimenten zu den Umweltauswirkungen einer Alkalinitätserhöhung des Ozeans durchführen und dafür acht Wochen lang auf der Nordseeinsel Helgoland im Forschungs-

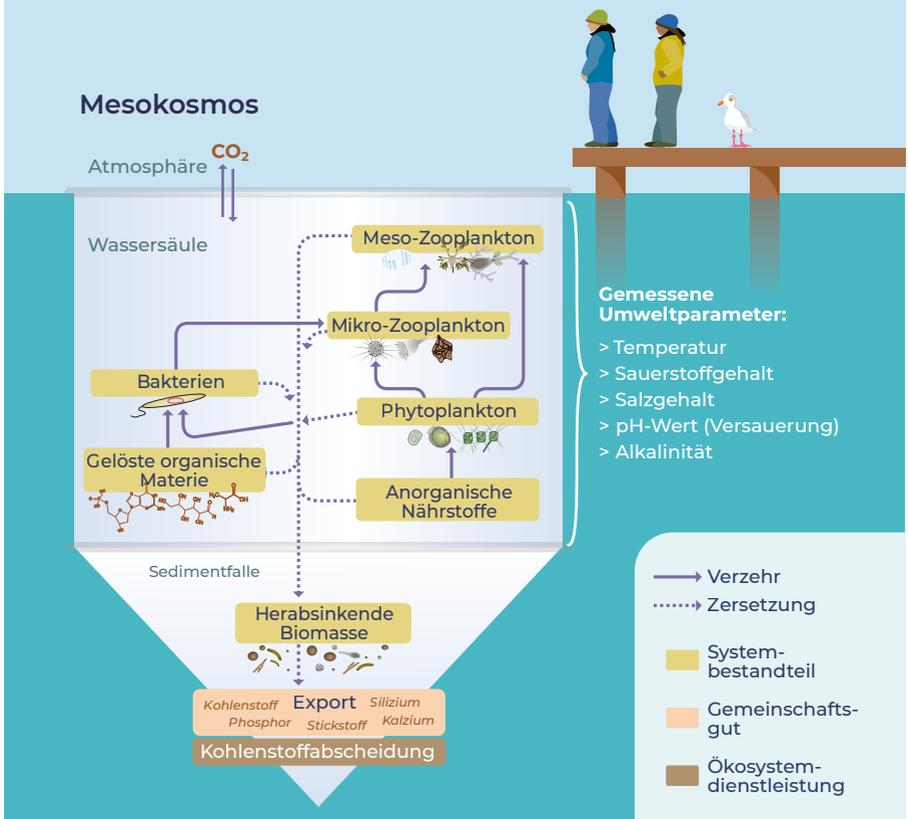


Für die Alkalinitätsexperimente haben die Wissenschaftler\*innen zwölf Mesokosmen im Helgoländer Südhafen installiert. Ein jeder Kosmos besteht aus einer 3,5 Meter langen schlauchähnlichen Röhre aus durchsichtigem Plastik, die am unteren Ende geschlossen ist und mit etwa 6000 Liter Nordseewasser und allen darin lebenden Mikroorganismen (einzellige Algen, Kleinkrebse etc., alle kleiner als 3 Millimeter) gefüllt wird.

Fotos: Michael Sswat/GEOMAR

camp zusammenarbeiten, werben in Nordamerika bereits Startups mit der Aussage für sich, sie könnten mit eben jenem Verfahren Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnehmen – und zwar »sicher«, das heißt ohne negative Nebenwirkungen für Umwelt und Mensch.

Solche Versprechen können nach Ansicht der drei Wissenschaftlerinnen die falsche Hoffnung wecken, schwer vermeidbare Restemissionen der Menschheit ließen sich auf schnelle und einfache Weise ausgleichen. Die gezielte Alkalinitätserhöhung des Ozeans gilt zwar in der Theorie als vielversprechendes meeresbasiertes Verfahren, um die Kohlendioxid-Aufnahme der Meere zu verstärken. Aus diesem Grund untersuchen Forschende sie auch in der Forschungsmission CDRmare . Wie das Leben im Meer allerdings auf einen Einsatz dieses Verfahrens und die damit verbundenen Veränderungen der Meereschemie reagieren würde, ist zum aktuellen Zeitpunkt weitgehend unbekannt. Mit einer Serie aus Alkalinitätsexperimenten in drei unterschiedlichen Meeresregionen (Gran Canaria, Bergen/Norwegen und Helgoland) betreten Expert\*innen aus CDRmare und anderen Forschungsverbänden daher wissenschaftliches Neuland – im Frühjahr 2023 auf Helgoland, wo Amrita Bhaumik, Leila Kittu und Giulia Faucher die wissenschaftlichen Untersuchungen vornehmen.



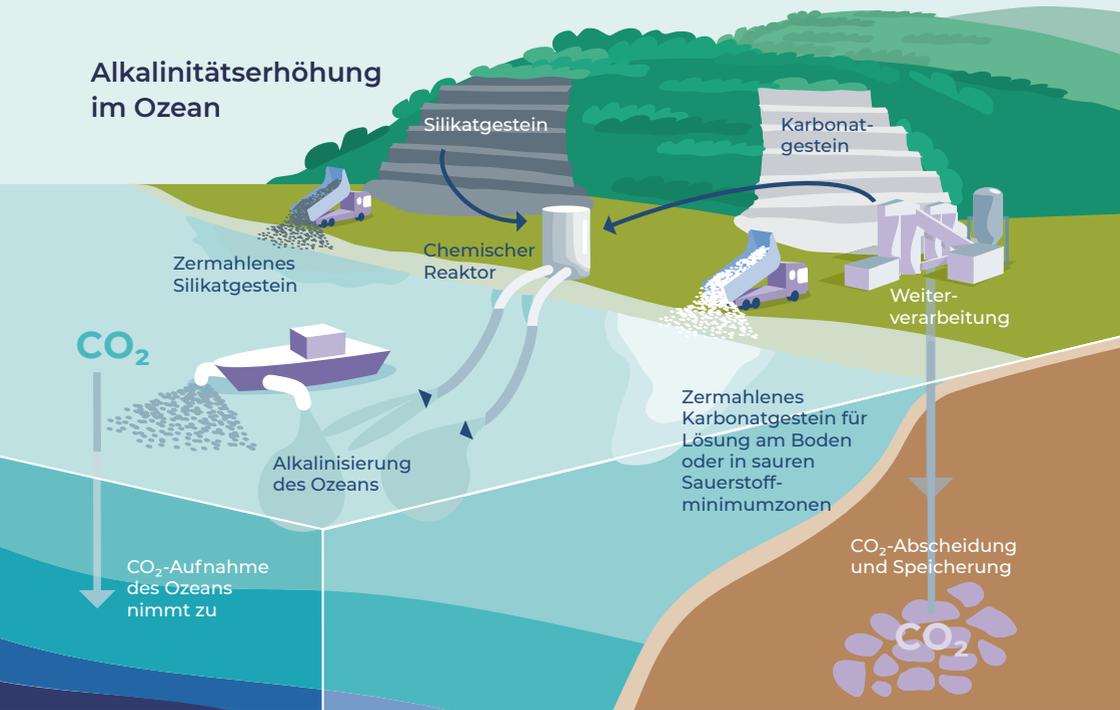
Der Vorteil dieses Versuchsaufbaus: Die Organismen in den Röhren sind den gleichen Umweltbedingungen (Temperatur, Licht etc.) ausgesetzt wie die Organismen im Meer. Sie können nach der Alkalinitäts-erhöhung aber unabhängig vom umliegenden Meer untersucht werden, weil kein Wasseraustausch zwischen Meer und Röhre erfolgt.

Artwork: Rita Erven/GEOMAR nach nach Silvan Goldenberg et al., 2022

## Von Anfang an das ganze Ökosystem im Blick

Dem Zeitdruck ist auch der neue Forschungsansatz geschuldet: »Ich komme aus der Ozeanversauerungsforschung, in der wir damals mit kleinen Laborstudien an einzelnen Arten begonnen haben, uns langsam an das große Thema heranzutasten. Komplexere Experimente mit verschiedenen Organismengruppen folgten erst später«, erzählt Giulia Faucher vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. »So viel Zeit aber haben wir bei der Forschung zur Alkalinitäts-erhöhung des Ozeans nicht: Wir müssen von Anfang an verstehen, wie die Meeresorganismen als Lebensgemeinschaft – das heißt als Ökosystem – reagieren, wenn wir die Alkalinität des Meerwassers erhöhen.«

## Alkalinitätserhöhung im Ozean



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

Skalierbarkeit: Eine **CO<sub>2</sub>-Entnahme im industriellen Maßstab ist theoretisch möglich**.

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

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

In der Forschungsmission CDRmare werden zwei technische Verfahren für eine gezielte Alkalinitätserhöhung des Ozeans erforscht – der direkte Eintrag von Gesteinspulver in das Meer sowie eine kontrollierte Verwitterung und Auflösung des Gesteinspulvers in chemischen Reaktoren. Für beide Ansätze werden jedoch Gesteine oder alkalische Ersatzstoffe (z.B. aus der Zementindustrie) als Ausgangsmaterial benötigt. *Artwork: Rita Erven/GEOMAR*

Zu diesem Zweck arbeiten die Meeresforscherinnen bei ihren Experimenten interdisziplinär: Giulia Faucher untersucht Auswirkungen auf das Mengen- und Größenwachstum mikroskopisch kleiner, einzelliger Meeresalgen – dem sogenannten Phytoplankton, welches als Primärproduzent am Anfang des marinen Nahrungsnetzes steht. Amrita Bhaumik hingegen konzentriert sich auf das Zooplankton. Gemeint sind Ruderfußkrebse (Copepoden) und andere

winzige Tiere, die Jagd auf das Phytoplankton machen und anschließend Fischen als Beute dienen. Leila Kittu analysiert derweil, welche Nährstoffe die Algen dem Meerwasser entziehen und welche Algen- oder Zooplanktonreste in die Tiefe sinken. Aus beiden Parametern lässt sich ableiten, wie effizient die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres funktioniert. Das heißt, wie viele Nährstoffe benötigt werden, um eine bestimmte Menge Kohlendioxid aus dem Meerwasser aufzunehmen, in Biomasse zu binden und in die Tiefe zu transportieren – und das bei unterschiedlichen Alkalitätswerten.

## **Was genau steckt hinter dem Begriff Alkalinitätserhöhung?**

Das Mesokosmen-Experiment auf Helgoland kommt einem tatsächlichen Einsatz von Verfahren zur Alkalinitätserhöhung schon sehr nah. Um den Versuchsaufbau und den Ablauf der Forschungsarbeiten zu verstehen, muss man jedoch wissen, was sich hinter der etwas sperrigen Verfahrensbezeichnung verbirgt. In erster Linie geht es um technische Verfahren, mit denen die natürliche Verwitterung von Gesteinen an Land oder im Küstenbereich beschleunigt werden soll. Der Grund: Bei solchen Verwitterungsprozessen werden Lösungsprodukte freigesetzt, die das Säurebindungsvermögen des Meerwassers – die sogenannte Alkalinität – erhöhen.

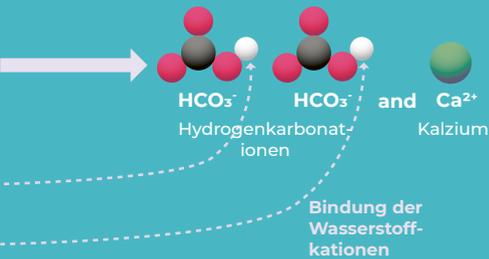
Von Flüssen oder Bächen ins Meer gespült, reagieren die Lösungsprodukte mit den für die Ozeanversauerung verantwortlichen Wasserstoffkationen (auch Protonen genannt) und binden diese. Die Wasserstoffkationen wiederum entstehen, wenn der Ozean Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt, sich das Gas im Meerwasser löst und im Zuge einer Gleichgewichtsreaktion chemisch in Form von Kohlensäure und deren Karbonaten gebunden wird.

Quasi zeitgleich zur Bindung der Wasserstoffkationen laufen chemische und physikalische Ausgleichsreaktionen im Oberflächenwasser ab, die dazu führen, dass der alkalinierte Ozean weiteres Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen und speichern kann. Kurz gesagt: Durch den Eintrag mineralischer Lösungsprodukte kann sowohl die Ozeanversauerung reduziert als auch die Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres gesteigert werden. Das vom Meer aufgenommene Treibhausgas kann dann nicht mehr in der Atmosphäre wirken.

Aktuell werden verschiedene technische Verfahren entwickelt, mit denen das Säurebindungsvermögen des Ozeans gesteigert werden kann. Dazu gehören Überlegungen, Kalkstein oder silikathaltige Gesteine wie Basalte und Olivin



**4** Das Gesteinspulver verwittert im Meerwasser. Dabei werden Lösungsprodukte freigesetzt, welche die freien Wasserstoffkationen binden. Es entstehen zusätzliches Hydrogenkarbonat und Kalzium. Die Versauerung des Oberflächenwassers nimmt ab.



Als Folge der veränderten Hydrogenkarbonat-Konzentration im Oberflächenwasser kann der Ozean wieder neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen.

Versauerung



Löst sich Kohlendioxid aus der Atmosphäre im Oberflächenwasser des Ozeans, beginnt eine komplexe Gleichgewichtsreaktion, infolge derer der enthaltene Kohlenstoff chemisch gebunden wird – u. a. in Form gelöster Hydrogenkarbonationen. Gleichzeitig aber werden Wasserstoffkationen (Protonen,  $H^+$ ) freigesetzt, die das Meerwasser versauern lassen. Durch den Eintrag und die Verwitterung von Gesteinspulver werden diese freien Protonen ( $H^+$ ) eingefangen und gebunden, sodass die Versauerungsrate des Ozeans sinkt. Die hier illustrierten Reaktionen würden in karbonatuntersättigten Gewässern ablaufen, z. B. in sauerstoffarmen Gebieten dicht unter der Meeresoberfläche.

Grafik: Thorben Amann, Uni Hamburg & Artwork: Rita Erven/GEOMAR

mit dessen Wassermassen vermischen und für eine dauerhafte Speicherung von zusätzlichem Kohlendioxid im Ozean sorgen. Die Details sind allerdings so komplex, dass es selbst Chemiker\*innen schwerfällt, die Wirkungsdetails alkalinitätssteigernder Verfahren laienverständlich zu erklären.

## Helgoland: Kontrollierte Experimente fast so realitätsnah wie ein echter Einsatz

Um einen Einsatz alkalinitätserhöhender Verfahren möglichst realistisch zu simulieren, haben Amrita Bhaumik, Leila Kittu, Giulia Faucher und ihr Team die Helgoländer Mesokosmen aufgeteilt. In sechs der schwimmenden



»Spinne« nennen die Forschenden diese Sprühvorrichtung, mit der sie die alkalische Lösung in die Mesokosmen eintragen. Foto: Michael Sswat/GEOMAR

Röhren wird zu Beginn des Experimentes eine Lauge aus Natriumhydroxid und Kalziumchlorid vorsichtig mit einer Sprühvorrichtung in Spinnenform im Oberflächenwasser verteilt und bis in eine Wassertiefe von 1,2 Meter untergemischt – genau so, als würde die Lauge von einem Schiff oder Flugzeug auf der Meeresoberfläche versprüht und von Wind und Wellen im Oberflächenwasser verteilt. »Durch dieses Vorgehen erzeugen wir einen sehr großen Sprung der Alkalinität im Oberflächenwasser. Wir wollen wissen: Wie reagieren die Algen- und Zooplanktongemeinschaften auf diesen Schock und wie schnell können sie sich von den möglichen Auswirkungen erholen, wenn wir nach ein paar Tagen alles Wasser im Mesokosmos durchmischen«, sagt Zooplanktonexpertin Amrita Bhaumik vom Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung.

In den restlichen sechs Mesokosmen verteilen die Forschenden die Lauge sofort bis in größere Tiefe. Auf diese Weise verändert sich die Alkalinität im gesamten Mesokosmos. Der Sprung – und eventuell auch der Schock für die Algen und Kleinkrebse – fallen hierbei jedoch deutlich kleiner aus als im ersten Szenario.

Weil das Forscherteam außerdem herausfinden will, bei welchem Schwellenwert die Algen und Ruderfußkrebse erstmals Reaktionen auf die Alkalinitäts-erhöhung zeigen, setzen sie in beiden Szenarien dieselben Laugenmengen ein. Mit jeder Röhre nimmt diese jedoch zu, sodass die Alkalinisierungsintensität in beiden Versuchsaufbauten von Mesokosmos zu Mesokosmos steigt und das Team am Ende sechs verschiedene Alkalinitätsniveaus testen kann.

## **Ob Regen oder Sturm: An jedem zweiten Tag müssen Wasserproben genommen werden**

Auf die Alkalinisierung des Wassers folgen wochenlange Probennahmen und Messungen – an jedem zweiten Tag der Woche, immer dieselben Arbeitsschritte, strikt nach Protokoll, sodass die Daten am Ende vergleichbar sind: »Zuerst leeren wir die Sedimentfalle am unteren Ende der Mesokosmen und entnehmen alle Partikel, die zu Boden gesunken sind«, sagt GEOMAR-Forscherin Leila Kittu. »Im zweiten Arbeitsschritt messen wir unter anderem die Temperatur, den Salz- und Chlorophyllgehalt profilierend über die gesamte Wassersäule in den Mesokosmen sowie in der Nordsee selbst, um ein Gefühl dafür zu bekommen, wie sich das Wasser jeweils schichtet oder ob eine Algenblüte beginnt«, fügt sie hinzu.

Anschließend führen die Forschenden ein 2,5 Meter langes Rohr von oben senkrecht in den Mesokosmos und schließen mit einem Seilzug das untere Ende. Auf diese Weise beproben sie die Wassersäule von der Oberfläche bis zum Beckenboden und entnehmen circa fünf Liter Wasser. Dieser Schritt wiederholt sich mehrmals, denn die Wasserproben werden für viele Analysen des Forscherteams benötigt, so zum Beispiel für Leila Kittus Chlorophyll- und Nährstoffmessungen sowie für Giulia Fauchers Algenuntersuchungen.

Zum Schluss betritt Amrita Bhaumik den Steg, an dem die Mesokosmen aufgereiht sind, und zieht ein engmaschiges Zooplanktonnetz durch jedes Becken. »So früh im Jahr befinden sich die Ruderfußkrebse der Nordsee noch überwiegend im Larvenstadium, in welchem sie besonders anfällig für Umweltveränderungen sind. Das ist auch der Grund, warum wir unsere Untersuchungen genau jetzt durchführen. Sollten die Ruderfußkrebse negativ auf eine Alkalinitätserhöhung reagieren, dann zuerst im Larvenstadium. Das heißt, wir würden die Veränderungen in unseren Experimenten sehen«, erläutert die 27-jährige Doktorandin.

## **Forschungsergebnisse werden sofort geteilt und gemeinsam diskutiert**

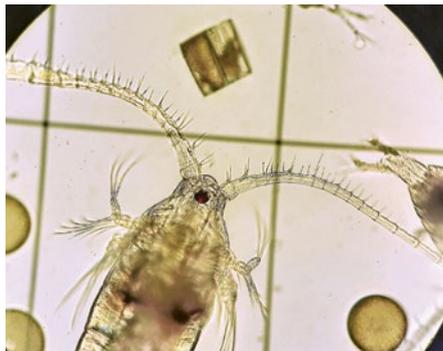
Die meisten Tierchen, die sich in ihrem Netz verfangen, konserviert die Wissenschaftlerin für spätere Zählungen und Analysen in Ethanol. Die restlichen werden im Labor erneut dem alkalinierten Wasser ausgesetzt – jeweils 24 Stunden lang. In dieser Zeit beobachtet Amrita Bhaumik, ob sich ihr Schwimm- und Fressverhalten verändern und damit langfristig ihre Gesundheit.



Nachdem die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die hochkonzentrierte Lauge in vorgeschriebenen Mengen in den Mesokosmen verteilt haben, beproben sie die Röhren sieben Wochen lang. Die dazu notwendigen Arbeitsschritte und Rollen sind klar definiert: Leila Kittu beispielsweise nimmt die Wasserproben für ihre Chlorophyll- und Nährstoffanalysen, Amrita Bhaumik hingegen fischt mit einem Apstein-Netz nach winzigen Ruderfußkrebse. Fotos: Michael Sswat/GEOMAR

Leila Kittu filtert derweil Hunderte Liter Wasserproben, dokumentiert deren Gehalt an organischem Kohlenstoff, Phosphor, Nitrat und Silikat und misst die Chlorophyllkonzentration. Giulia Faucher misst die Zellkonzentration des Phytoplanktons, um herauszufinden, welche Algengruppen zu welchem Anteil vertreten sind und ob die Photosyntheseleistung der Algen abnimmt. Sollte dies der Fall sein, wäre es ein klarer Hinweis darauf, dass die Algen gestresst sind und nicht optimal funktionieren und wachsen. »Diese Analysen kosten viel Zeit und Energie. Das Tolle an unserer gemeinsamen Arbeit hier auf Helgoland ist jedoch: Wann immer ich brauchbare Ergebnisse habe, schicke ich ein Foto davon an Leila und sie teilt die dazugehörigen Nährstoff- und Chlorophylldaten mit mir. Mit Amrita wiederum diskutiere ich, welche Algarten in den Proben vorkommen. Das heißt, wir teilen unsere Forschungsergebnisse und Ideen miteinander und überlegen gemeinsam, wie die einzelnen Puzzleteile zusammenpassen und welche Schlussfolgerungen wir ableiten können«, erzählt Giulia Faucher und lächelt freudestrahlend.

»Ich könnte mir gar nicht vorstellen, diese viele Arbeit hier allein zu machen«, ergänzt Leila Kittu. »Wir lernen an jedem Tag voneinander und entwickeln ein gemeinsames Verständnis dafür, wie sich die Phyto- und Zooplanktongemeinschaften der Nordsee im Zuge einer Alkalinitätserhöhung verändern würden und welchen Einfluss diese Veränderungen beispielsweise auf die Fischbestände haben könnten.«



Amrita Bhaumik (r.) und Merle Henning filtern und konservieren die Zooplankton-Proben im Labor der Helgoländer Außenstelle des Alfred-Wegener-Institutes, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. Unter dem Mikroskop kann Amrita Bhaumik später die Ruderfußkrebse im Detail betrachten und ihre Art bestimmen.

Fotos: Michael Sswat/GEOMAR, Amrita Bhaumik/Alfred-Wegener-Institut

## Im Falle eines Einsatzes wird es vermutlich Sieger und Verlierer geben

Für konkrete Aussagen über mögliche Umweltgefahren einer Alkalinitäts-erhöhung des Ozeans ist es jetzt noch zu früh. Viele Proben und Datensätze müssen erst noch ausgewertet werden. Außerdem ist besondere Sorgfalt gefordert, weil die getesteten Szenarien einem echten Einsatzszenario so nahe kommen. Jede Schlussfolgerung will da mehrmals überprüft und diskutiert sein, bevor sie kommuniziert wird. Wahrscheinlich ist jedoch, dass ein großflächiger Eingriff in die Meereschemie sowohl Gewinner als auch Verlierer nach sich ziehen würde. »Einige Meeresorganismen werden vermutlich von der Alkalinitäts-erhöhung profitieren, zum Beispiel weil der Versauerungs-grad des Oberflächenwassers abnimmt. Andere werden anfälliger sein und durch den Mineraleintrag Nachteile erfahren. Beides würde langfristige Ver-änderungen der Artenzusammensetzung nach sich ziehen«, erklärt Giulia Faucher.

Welche Auswirkungen diese wiederum auf die Ökosysteme des Ozeans hätten, ist schwer vorherzusagen – gerade, weil sich die Organismengemein-schaften ständig gegeneinander ausbalancieren und so Veränderungen teil-weise kompensieren. »Viele Zooplanktonarten zum Beispiel sind erstaunlich robust und können Umweltveränderungen ziemlich gut tolerieren. Bis zu wel-cher Alkalinisierungsintensität ihre Toleranz jedoch tatsächlich reicht, werden unsere Forschungsergebnisse hoffentlich zeigen«, sagt Amrita Bhaumik.



Algenexpertin Giulia Faucher misst die Konzentrationen der verschiedenen Algengruppen. Das Messgerät im Bildhintergrund überträgt dabei seine Messergebnisse direkt auf den Computer der Wissenschaftlerin (links). Um ihre Chlorophyll- und Biomasseanalysen durchführen zu können, muss Leila Kittu zunächst ihre Wasserproben durch feine Filter pumpen, sodass alle enthaltenen Partikel darin hängen bleiben (rechts).

Fotos: Michael Sswat/GEOMAR

Leila Kittu gibt zu bedenken: »Welche Umweltrisiken eine Alkalinitäts­erhöhung mit sich bringt, hängt auch von den lokalen Meereseigenschaften ab. Deshalb haben wir unsere Experimente in drei Regionen mit sehr unterschiedlichen Ausgangsbedingungen durchgeführt – in den nährstoffarmen subtropischen Gewässern Gran Canarias sowie in den nährstoffreicheren Gewässern Bergens und Helgolands. Hier auf Helgoland wollten wir testen, bis zu welchen Schwellenwerten ein Einsatz alkalinitäts­erhöhender Verfahren ohne erkennbare Folgen für die Meeresorganismen wäre. Ob uns das gelungen ist, werden wir in einigen Monaten wissen.«

Den drei Wissenschaftlerinnen ist dabei vollends bewusst, dass Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft eher morgen als übermorgen wissenschaftliche Handlungsempfehlungen erwarten. Leila Kittu: »Die Wissenschaft muss schnell Resultate liefern: Zum einen, weil wir Forschenden selbst wissen wollen, welche Gefahren drohen, wenn Verfahren zur Alkalinitäts­erhöhung des Ozeans als Klimaschutzmaßnahme eingesetzt werden und wie Risiken vermieden werden können. Zum anderen, um politische Gremien und Entscheidungsträger\*innen über diese Erkenntnisse zu informieren, denn sie werden am Ende über einen möglichen Einsatz entscheiden.« Die Zeit läuft!

---

**Alle beschriebenen Forschungsarbeiten wurden im CDRmare-Forschungsverbund »RETAKE – CO<sub>2</sub>-Entnahme durch Alkalinitäts­erhöhung: Potenzial, Nutzen und Risiken« durchgeführt.**

# Ein Forschungsduo trotz dem Druck

Foto: Fahrtbericht des FS METEOR,  
Expedition M183/MARUM, Universität Bremen

## Kohlendioxid-Speicherung in der Tiefsee

Auf Island wird seit Jahren 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, untersucht das Tiefsee-Konsortium der Forschungsmission CDRmare derzeit die Option, Kohlendioxid in geeigneter Basaltkruste in mittlerer bis großer Wassertiefe zu verpressen. Zwei der wichtigsten Forschungsprojekte liegen dabei in den Händen von Materialchemikerin Isabel Lange und Strömungsmodelliererinnen Isabel Kremin – ein Wissenschaftsduo, das sich sehr ehrgeizige Ziele gesetzt hat und kaum unter Druck setzen lässt.

Druck wird als Kraft definiert, die auf eine Fläche wirkt. Isabel Lange und Isabel Kremin kennen diese physikalische Größe nur zu gut. Schließlich gehören extremer Wasserdruck und andere im Ozeanboden wirkenden Kräfte im Tiefsee-Konsortium der Forschungsmission CDRmare zur Arbeitsplatzbeschreibung. Täglich stellen sie die Wissenschaftler\*innen vor Herausforderungen: Materialchemikerin Isabel Lange bei ihren Reaktionsexperimenten im Labor,



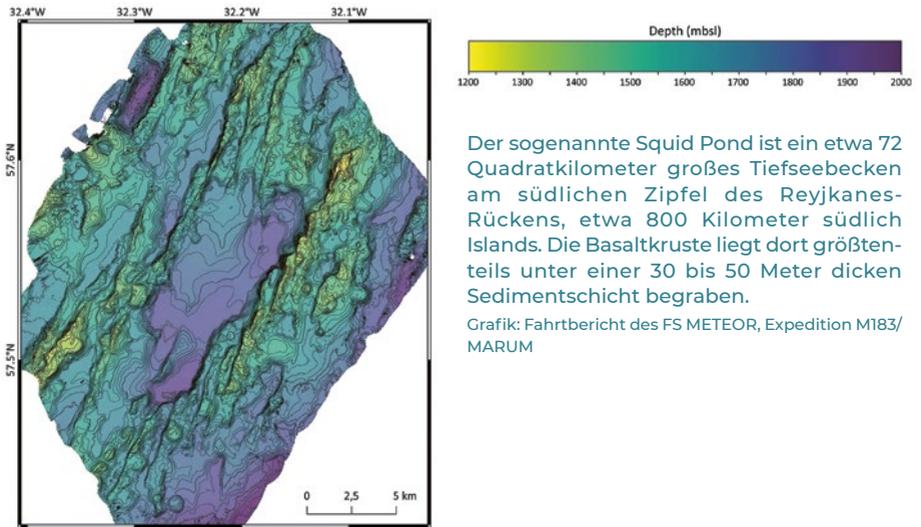
Das CDRmare-Tiefsee-Forschungsteam – Materialchemikerin Isabel Lange von der Universität Bremen (links) und Geophysikerin und Modelliererin Isabel Kremin vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (rechts).

Fotos: Volker Diekamp/MARUM Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen, privat

wo es gilt, die extremen Druckverhältnisse im Tiefseeuntergrund realitätsnah nachzustellen; Geophysikerin Isabel Kremin bei ihren Modellierungen der Meer- und Porenwasserzirkulation und aller enthaltenen Gase in der oberen Schicht der Ozeankruste, die – wie soll es auch anders sein – von Druckunterschieden angetrieben wird, allerdings von winzig kleinen.

Was beide Wissenschaftlerinnen eint, ist das Ziel ihrer Arbeit. In zwei Jahren wollen sie sagen können, ob sich das Basaltgestein der oberen ozeanischen Erdkruste als geologischer Kohlendioxid-Speicher eignet und wenn ja, wie sich eingelagertes Kohlendioxid im Gestein räumlich verteilt und wie schnell es mineralisieren würde und damit fest im Tiefseeuntergrund gebunden wäre. Materialchemikerin Isabel Lange von der Universität Bremen untersucht dazu, wie und unter welchen Bedingungen Kohlendioxid im Basaltgestein am umfänglichsten chemisch reagiert. Modelliererin Isabel Kremin erstellt derweil am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel das Zirkulationsmodell eines ausgewählten Tiefseebeckens und simuliert, wie sich eingeleitetes Kohlendioxid in den oberen 100 bis 400 Metern der Ozeankruste verteilen würde – oder vereinfacht gesagt: Wie viel Kohlendioxid in den Speicher passen würde, wenn man die Mineralisierungsprozesse mit einkalkuliert.

Ihre Zusammenarbeit ist dabei essentiell: »Um die natürlichen Prozesse der Kohlendioxid-Bindung und -Speicherung in der oberen Ozeankruste zu verstehen, untersuche ich sie in Laborexperimenten auf sehr kleiner Skala und selbst das ist nicht einfach, weil die Prozesse so langsam ablaufen«, sagt Isabel



Der sogenannte Squid Pond ist ein etwa 72 Quadratkilometer großes Tiefseebecken am südlichen Zipfel des Reykjanes-Rückens, etwa 800 Kilometer südlich Islands. Die Basaltkruste liegt dort größtenteils unter einer 30 bis 50 Meter dicken Sedimentschicht begraben.

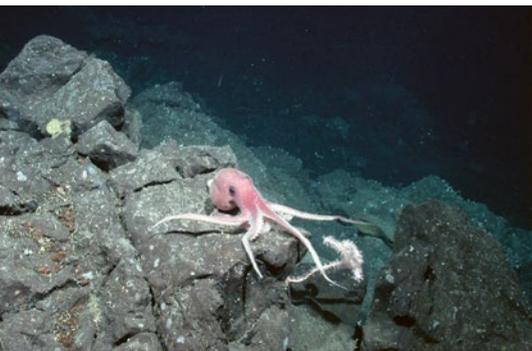
Grafik: Fahrtbericht des FS METEOR, Expedition M183/MARUM

Lange. »Wenn wir anschließend Aussagen über die potentielle Speichergröße machen wollen, brauchen wir Isabels Computermodellierung, um die von mir untersuchten Prozesse und Effekte auf das gesamte Tiefseebecken hochzurechnen.«

## Die Idee von der Kohlendioxid-Speicherung im Tiefsee-Untergrund

Das Tiefseebecken, welches die beiden Wissenschaftlerinnen vor Augen haben, liegt in den Gewässern rund 800 Kilometer südlich Islands, an der Ostflanke des Reykjanes-Rückens, einem langesozogenen unterseeischen Gebirge, welches zu den Ausläufern des Mittelatlantischen Rückens gehört. Die CDRmare-Forschenden nennen das etwa zwölf Kilometer lange und sechs Kilometer breite Becken »Squid Pond« (Tintenfisch-Teich), weil die ersten Erkundungstauchfahrten mit einem Unterwasserroboter namens »MARUM Squid« gemacht wurden und auf den Videoaufnahmen aus der Tiefsee tatsächlich auch Tintenfische zu sehen sind.

In 1800 Metern Wassertiefe bedeckt im Squid Pond eine gerade mal 30 bis 50 Meter dicke Sedimentschicht die Ozeankruste aus Basalt. Den oberen Teil dieser Gesteinsschicht muss man sich wie einen löchrigen Käse vorstellen. Ein Netzwerk aus Poren und Blasen durchzieht das Gestein. Mal sind sie mit bloßem Auge kaum zu erkennen, an anderer Stelle wiederum messen sie einen Zentimeter im Durchmesser.



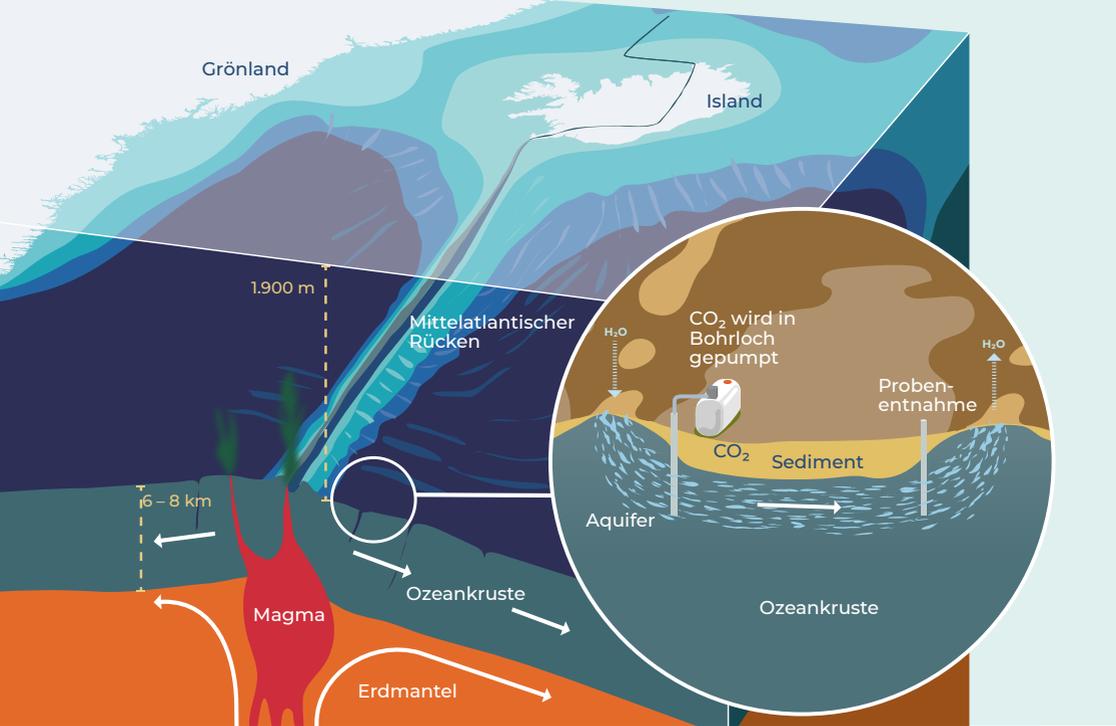
An anderen Stellen entlang des Mittelatlantischen Rückens ragt das poröse Basaltgestein auch aus dem Sediment empor und bietet Tiefseebewohnern einen willkommenen festen Untergrund zum Rasten oder Siedeln (links).

Rechts: Ein Tiefseeschwamm wächst auf der dunklen Basaltgesteinsschicht, die an dieser Stelle des Tiefseebeckens »Squid Pond« kaum von Sedimenten bedeckt wird. Das poröse Gestein steht im Mittelpunkt der CDRmare-Forschung zu einer möglichen Kohlendioxid-Speicherung in der oberen Ozeankruste.

Fotos: MARUM Fahrtbericht des FS METEOR/Expedition M183 (links), MARUM Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

Diese charakteristische Poren- und Blasenstruktur der oberen Gesteinsschicht 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. Es bildet ein riesiges Leitungssystem für Flüssigkeiten und Gase und bietet theoretisch perfekte Voraussetzungen, um als Kohlendioxid-Speicher zu fungieren: Zum einen, weil in dem Porenraum ausreichend Platz wäre, um große Mengen verflüssigtes Kohlendioxid oder aber mit Kohlendioxid angereichertes Wasser einzuleiten. Zum anderen stünde im Porenraum viel Gesteinsoberfläche zur Verfügung, die reaktionsfreudige Bestandteile wie Kalzium, Magnesium und Eisen enthält und das Kohlendioxid gewissermaßen einlädt, chemisch zu reagieren und anschließend zu mineralisieren.



Kosten: auf Island etwa 25 bis 45 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>, aber für **größere Meerestiefen bislang unklar**.

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

Dauer der Speicherung: Nach seiner Mineralisierung ist das Kohlendioxid für **viele Jahrtausende** fest gebunden.

Technischer Entwicklungsstand: Auf Island wird mit Kohlendioxid angereichertes Meerwasser seit dem Jahr 2014 erfolgreich in die obere Ozeankruste verpresst. **In größeren Wassertiefen ist dieses Verfahren bisher nur unzureichend getestet worden.**

Diese Grafik erklärt die grundlegenden Prinzipien zur Kohlendioxid-Speicherung in der oberen Ozeankruste. Grafik: Rita Erven/GEOMAR

## Island: Ein Pilotprojekt weckt weltweit Hoffnungen

Auf Island, wo die obere Ozeankruste aus dem Meer emporragt, wird bereits seit dem Jahr 2014 abgeschiedenes und in Süßwasser gelöstes Kohlendioxid im Untergrund verpresst. Die Vulkaninsel liegt direkt auf dem Mittelatlantischen Rücken. Das Basaltgestein im Untergrund der Insel ist deshalb noch vergleichsweise jung und warm, dazu noch sehr reaktionsfreudig und durch kurze Bohrungen zu erreichen. Dementsprechend hoch sind die Mineralisierungsraten: Innerhalb von zwei Jahren mineralisieren auf Island circa 98 Prozent des injizierten Kohlendioxids.



Die Grundidee funktioniert: Im Jahr 2013 injizierten US-Amerikanische Wissenschaftler\*innen 1000 Tonnen verflüssigtes Kohlendioxid in eine Basaltsteinformation rund 850 Meter tief unter dem östlichen Teil des US-Bundesstaates Washington. Spätere Kontrollbohrungen ergaben: Nach zwei Jahren war das eingelagerte Kohlendioxid vollständig mineralisiert und in einem neu gebildeten Gestein gebunden, was man auf diesem Bild an den hellen Mineralablagerungen in den Gesteinsporen erkennen kann.

Foto: Pacific Northwest National Laboratory

Dieser Erfolg weckt in Wissenschaft und Politik die Hoffnung, dass sich noch viel mehr Kohlendioxid im Basaltgestein der oberen Ozeankruste speichern ließe – vor allem in mittleren und großen Wassertiefen, wo viel poröses Basaltgestein zur Verfügung steht und der hohe Druck ein Entweichen des Kohlendioxids aus dem Untergrund so gut wie ausschließen würde. Die Wissenschaftler\*innen im Tiefsee-Konsortium der Forschungsmission CDRmare untersuchen nun, ob diese Annahmen stimmen und unter welchen Bedingungen eine Kohlendioxid-Einlagerung in der oberen Ozeankruste sicher und umweltverträglich durchgeführt werden könnte. Sollten sie zu einem positiven Ergebnis kommen, stünde es der Menschheit offen, große Mengen abgeschiedenen Kohlendioxids in die Ozeankruste zu verpressen und so ein Entweichen des Treibhausgases in die Atmosphäre zu verhindern.

### **Labor-Experimente: Das tägliche Ringen mit flüchtigen Gasen und hohem Druck**

Doch würde Kohlendioxid im Tiefseeuntergrund genauso schnell mit dem Basaltgestein reagieren, wie im Pilotprojekt auf Island? Materialchemikerin Isabel Lange versucht diese Frage mithilfe verschiedener Experimente zu beantworten. Im ersten Versuchsaufbau lässt sie Kohlendioxid, Wasser und Basalt-Granulat unter verschiedenen Druck- und Temperaturbedingungen in einem geschlossenen Behälter aus Gold reagieren und misst, wie sich die Kohlendioxid-Konzentration in dem Wasser-Gas-Gemisch verändert. Kleine Mineralneubildungen auf dem Basaltgestein untersucht sie im Anschluss unter dem Elektronenmikroskop.

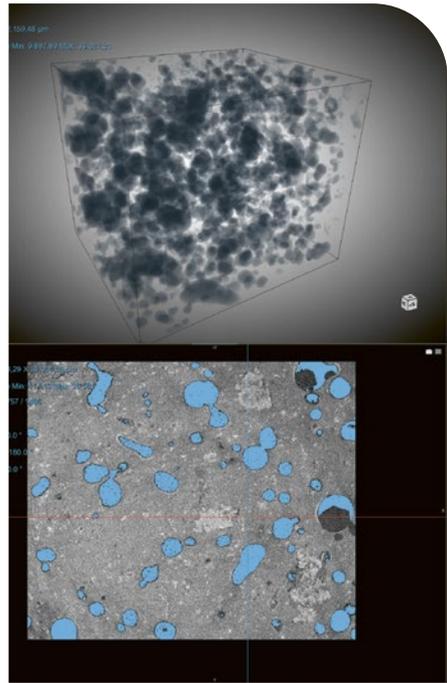
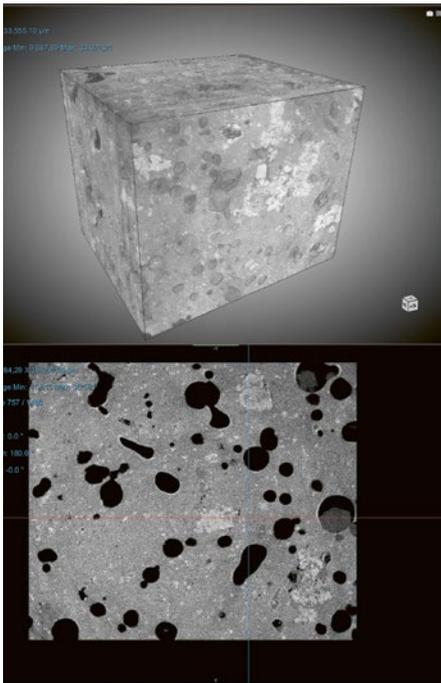


Isabel Lange bereitet eine kleine Menge gemahlenes Basaltgestein vor, welches die 28-Jährige für ihr Experiment in den kleinen goldenen Behälter füllt. Anschließend gibt sie Kohlendioxid und Wasser hinzu, setzt die Probe unter Druck und erwärmt sie, sodass die Laborbedingungen den Bedingungen in der Tiefsee möglichst nah kommen.

Fotos: Volker Diekamp/MARUM Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen

Im zweiten Laborexperiment leitet Isabel Lange das kohlendioxidreiche Wasser über ein spiegelglatt poliertes Basaltstück. Dessen Oberfläche untersucht sie anschließend mit einem sogenannten Interferometer. Dieses erfasst die Gesteinsoberfläche so hochauflösend, dass die Wissenschaftlerin erkennen kann, wo auf der Basaltoberfläche Minerale herausgelöst oder aber ausgefällt wurden. Im zweiten Schritt analysiert Isabel Lange Veränderungen im Gesteinsinneren. Dafür legt sie das Basaltstück in ein 3D-Röntgenstrahl-Mikroskop. Dessen Aufnahmen zeigen mögliche Kalzitablagerungen im Porenraum des Gesteins, welche durch die chemische Reaktion des Kohlendioxids mit dem Basaltgestein entstanden sind.

»Wenn sich Kohlendioxid in Meerwasser löst, versauert dieses Wasser«, erklärt die 28-jährige Materialchemikerin. »Die Säure im Wasser wiederum greift die Basaltoberfläche an und löst deren Eisen-, Magnesium- und Kalzium-Bestandteile heraus. Diese reagieren anschließend mit dem im Was-



Das 3D-Röntgenstrahl-Mikroskop ermöglicht Isabel Lange einen detaillierten Blick ins Innere ihrer Basaltgesteinsproben: Auf dem linken Bild die unbearbeitete Aufnahme des Basalts; rechts dagegen der Porenraum in blau markiert und als 3D-Ansicht dargestellt. Abbildungen: Isabel Lange/MARUM, Universität Bremen

ser gelösten Kohlendioxid und bilden im Wasser gelöste Karbonate – so lange, bis das Wasser übersättigt und die Karbonate ausfällen. Das heißt, es bilden sich erste winzige Kalzitpartikel. Wo diese Ausfällung aber genau stattfindet, was sie begünstigt und wie sich der Porenraum im Zuge der Mineralisierung verändert, versuche ich in meinen Experimenten herauszufinden.«

Was im Gespräch noch vergleichsweise einfach klingt, stellt im Labor eine enorme technische Herausforderung dar. Am Reykjanes-Rücken herrscht ein Druck von bis zu 180 bar im Untergrund. Zum Vergleich: Ein normaler Autoreifen wird in der Regel auf 2 bar Luftdruck aufgepumpt. Der Druck in der Basaltschicht ist also um das 90-Fache höher. Die Ventile und Leitungen im Labor an der Universität Bremen aber sind nur auf einen Maximaldruck von 10 bar ausgelegt – zu wenig, um flüssiges Kohlendioxid einzuleiten. Isabel Lange musste sich daher erst einmal stärker belastbare Leitungskomponenten bestellen.

Herausforderung Nummer zwei: Der gesamte Versuchsaufbau muss absolut dicht sein – entweicht Kohlendioxid irgendwo unentdeckt, sind die Messungen verfälscht und nicht zu gebrauchen. Hinzu kommt, dass in der internationalen Tiefseeforschung bislang nur wenige experimentelle Studien unter Bedingungen gemacht wurden, die auf die Kohlendioxid-Speicherung in Basaltschichten des Meeresbodens abzielen. Zu berücksichtigen gilt es dabei zum einen die Druck- und Temperaturbedingungen. Zum anderen beeinflussen die chemische Zusammensetzung des Meerwassers und dessen Zirkulationseigenschaften die Mineralisierungsreaktionen im Basaltgestein. Außerdem kann das zu speichernde Kohlendioxid auf unterschiedliche Weise in die porösen Basaltschichten eingeleitet werden: in Form von reinem, flüssigen Kohlendioxid oder aber als kohlendioxid-angereichertes Meerwasser. Isabel Lange muss deshalb sehr viele Versuche durchführen, um das gesamte Spektrum der Einflussfaktoren und Möglichkeiten abzudecken. Ohne stoische Ruhe, Ausdauer und einem intrinsischen Streben nach Präzision und Perfektion wären solche monatelangen Forschungsarbeiten nicht durchzuhalten.

### **Zirkulationsmodellierung: Mit jedem Schritt ein bisschen komplexer**

Geduld braucht auch Geophysikerin Isabel Kremin bei ihren Modellierungen der Meer- und Porenwasserzirkulation durch die Basaltschicht. Meist dauert es einen Tag oder länger, bis der Hochleistungsrechner an der Universität Kiel ihre Zirkulationssimulationen komplett durchgerechnet hat – jede Simulation will daher gut überlegt sein.

Isabel Kremins Aufgabe lautet, ein Modell zu entwickeln, welches die Gas- und Flüssigkeitsbewegungen in der Basaltschicht des SQUID-Ponds realitätsgetreu darstellt und den Wissenschaftlern verrät, welche Temperaturen in welcher Tiefe herrschen und wie die Wärme aus dem Erdinneren die Zirkulationsgeschwindigkeit und -richtung in der oberen Basaltschicht beeinflusst. Alle diese Fakten werden benötigt, um ein Kohlendioxid-Einleitungsexperiment vorzubereiten, das im Sommer 2025 durchgeführt werden soll. Mithilfe des Computermodells können die Wissenschaftler\*innen nämlich vorherzusagen, wie sich das eingeleitete Kohlendioxid in der Basaltschicht verteilen wird, wo es eventuell austreten könnte und an welchen Stellen sie demzufolge Sensoren und Überwachungstechnik im und auf dem Meeresboden installieren sollten, um alle relevanten Messdaten zu erheben und mögliche Leckagen zu detektieren.

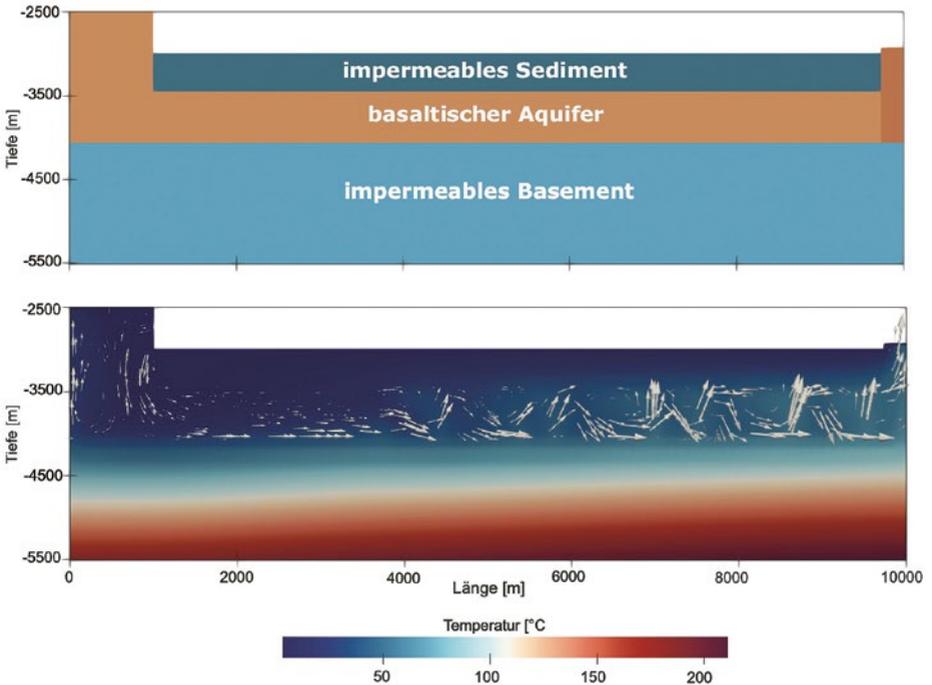


GEOMAR-Forscherin Isabel Kremin entwickelt ein Modell der Gas- und Wasserzirkulation in der oberen Basaltschicht des Squid Ponds. Eine Aufgabe, die ausschließlich am Schreibtisch erledigt wird. Foto: Sibiao Liu/GEOMAR

Die ersten Simulationsversuche hat Isabel Kremin noch in einem vereinfachten zweidimensionalen Tiefsee-Modell gerechnet. »Ich arbeite mit einer Open-Source-Modellierungssoftware, die ursprünglich aus den Ingenieurwissenschaften stammt und von einem Kollegen aus meiner Arbeitsgruppe erweitert wurde, um damit Hydrothermalsysteme, wie zum Beispiel schwarze Raucher, zu modellieren. In der Software sind die physikalischen Gesetze, denen Gase und Flüssigkeiten folgen, bereits in Gleichungen hinterlegt«, erläutert die 27-jährige ModelliererIn.

Sie selbst gibt dem Modell die Wassertiefe und Meeresboden-Gestalt vor: So zum Beispiel, ob in dem Tiefseebecken unterseeische Berge existieren und wie groß diese sind oder aber wie viel Wärme aus dem Erdinnern in die Basaltschicht dringt. »Die Software berechnet dann die Temperaturverteilung in der Basaltschicht und in welche Richtung das Meerwasser im Porenraum zirkuliert. Aus den ersten Versuchen wissen wir zum Beispiel, dass das Porenwasser in der Regel vom großen Berg zum kleinen strömt, wenn die Berge ähnliche Materialeigenschaften wie die Basaltschicht haben. Die Ursache dafür sind kleine Druckunterschiede in der Horizontalen zwischen beiden Erhebungen. Sie lassen einen Sog entstehen, der dann das Porenwasser zum kleinen Berg zieht – mit einer Geschwindigkeit von einigen Dezimetern pro Jahr«, erklärt Isabel Kremin.

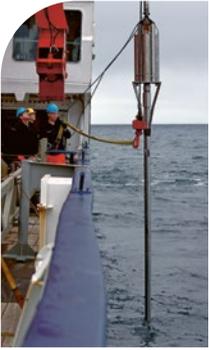
Im nächsten Entwicklungsschritt wird sie das zweidimensionale Modell auf drei Dimensionen erweitern und eine bathymetrische Karte des Squid Ponds (Oberflächenstruktur) integrieren. Die vom Modell berechnete Tempera-



Diese beiden Abbildungen zeigen den logischen Aufbau (oben) und die Ergebnisse einer Strömungssimulation in basaltischer Oberkruste als vereinfachtes 2D-Modell (unten), mit welchem Isabel Kremin die ersten Simulationsversuche unternommen hat. Die weißen Pfeile im unteren Bild markieren die Wanderung des Porenwassers. Sein Pfad verläuft in der rechten Bildhälfte in Kurven, weil das Wasser durch die Wärme aus dem Erdinneren erhitzt wird und infolgedessen aufsteigt – so lange, bis es abkühlt und wieder absinkt.

Grafik: Isabel Kremin/GEOMAR

turverteilung wenige Meter unterhalb des Meeresbodens will sie dann mit Messdaten von einer Schiffsexpedition aus dem Sommer 2022 vergleichen. »Dass ich auf der Expedition dabei sein durfte und sowohl die Kartierung des Beckens als auch die Wärmestrommessungen miterleben konnte, hat mir nicht nur sehr viel Spaß bereitet. Solche Erfahrungen helfen auch enorm bei der Arbeit mit den Daten. Als Modelliererin sitze ich ja sonst nur vor dem Computer und arbeite mit Datensätzen und viel Theorie. Mit anzusehen, wie zum Beispiel die Temperaturdaten erhoben werden, erleichtert das Verständnis für die vielen Prozesse in der Tiefsee immens«, sagt die Forscherin.



Als das deutsche Forschungsschiff METEOR im Sommer 2022 zu einer geologischen Expedition in ein Seegebiet südlich Islands aufbrach, waren Isabel Lange und Isabel Kremin beide als Wissenschaftlerinnen mit an Bord. Sie halfen, das Tiefseebecken umfassend zu kartieren, die Temperaturen im Sediment mithilfe einer Lanze zu messen und erste Bodenproben zu nehmen und zu analysieren. Fotos: Aaron Röhler, Universität Bremen

## Das große Finale: Wenn das Zirkulationsmodell auch die Chemie versteht

Wenn das Zirkulationsmodell des Squid Ponds fertiggestellt ist, beginnt für Isabel Kremin das Finale ihrer Modellierungsarbeit. Gemeint ist die Integration der Kohlendioxid-Basaltreaktion in das Computermodell. »Für diesen letzten Schritt müssen Isabel und ich eng zusammenarbeiten, denn es gilt, die Ergebnisse ihrer kleinskaligen Laborexperimente in mein großes Modell einfließen zu lassen«, sagt Isabel Kremin. »Anschließend wollen wir simulieren, was mit den Zirkulationsmustern passiert, wenn wir Kohlendioxid in die Basaltschicht einleiten. Gelingt es uns wirklich, die Verteilung des Kohlendioxids im Basalt zu modellieren? Welcher Anteil des Kohlendioxids wird in welchem Zeitraum mineralisieren und welchen Einfluss hat das wiederum auf die Flüsse im gesamten Tiefseebecken? Ich bin wirklich sehr gespannt, wie weit wir gemeinsam kommen und freue mich auf die Zusammenarbeit.«

Dass bis dahin gar nicht mehr so viele Monate verbleiben, nehmen die beiden Wissenschaftlerinnen mit einem Lächeln und kurzem Schulterzucken hin. Zeitdruck ist für Tiefseeforscherinnen auch nichts Ungewöhnliches.

---

**Alle beschriebenen Forschungsarbeiten wurden im CDRmare-Forschungsverbund »AIMS<sup>3</sup> – Alternative Szenarien, innovative Technologien und Monitoringansätze für die Speicherung von Kohlendioxid in ozeanischer Kruste« durchgeführt.**



# Alle Hoffnung auf die neongrüne Wolke

Der Test einer neu entwickelten Auftriebspumpe vor der Küste Gran Canarias soll das große Finale für Jost Kemper werden. Endlich würde der 30-jährige Wissenschaftler aus dem CDRmare -Forschungsverbund zu künstlichem Auftrieb jene Messdaten erheben können, die er für die Qualitätskontrolle seines Strömungsmodells benötigt. Helfen soll ihm dabei ein neongrüner Farbstoff. Auf dem Meer aber kommt alles anders als geplant.

Das Meer grollt in dieser Novembernacht 2022. Drei Meter hohe Wellen werfen sich aus nordwestlicher Richtung kommend gegen den Rumpf der Segelyacht PANDORA V. Der Wind fegt mit Windstärke 8 über das Deck. Er hat schon eines der Großsegel zerrissen, sodass Jost Kemper in seiner Koje unter Deck kein Auge zumacht. Vor dieser Schlechtwetter-Front hatte der Kapitän der PANDORA V Jost Kemper und seine Kollegen gewarnt. Wegen ihr musste alles so schnell gehen. Und irgendwie fühlt es sich an, als würde der Atlantische Ozean Jost Kemper ein weiteres Mal beweisen wollen, wer hier der Stärkere ist.

Blick zurück: Der 30-jährige Strömungsmodellierer aus dem CDRmare-Forschungsverbund zu künstlichem Auftrieb war mit einem detaillierten Arbeitsplan im Gepäck von Kiel auf die kanarische Insel Gran Canaria gereist und hatte gemeinsam mit fünf Kollegen vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum



Jost Kemper forscht als Modellierer an der Fachhochschule Kiel. In der Forschungsmission CDRmare geht der 30-Jährige der Frage nach, was mit dem kalten und nährstoffreichen Tiefenwasser geschieht, nachdem es an die Meeresoberfläche gepumpt wurde. Der Wellenpumpentest vor Gran Canaria sollte zeigen, wie realitätsnah sein Computermodell die Wasserströmungen in und rund um die Auftriebspumpe abbildet.

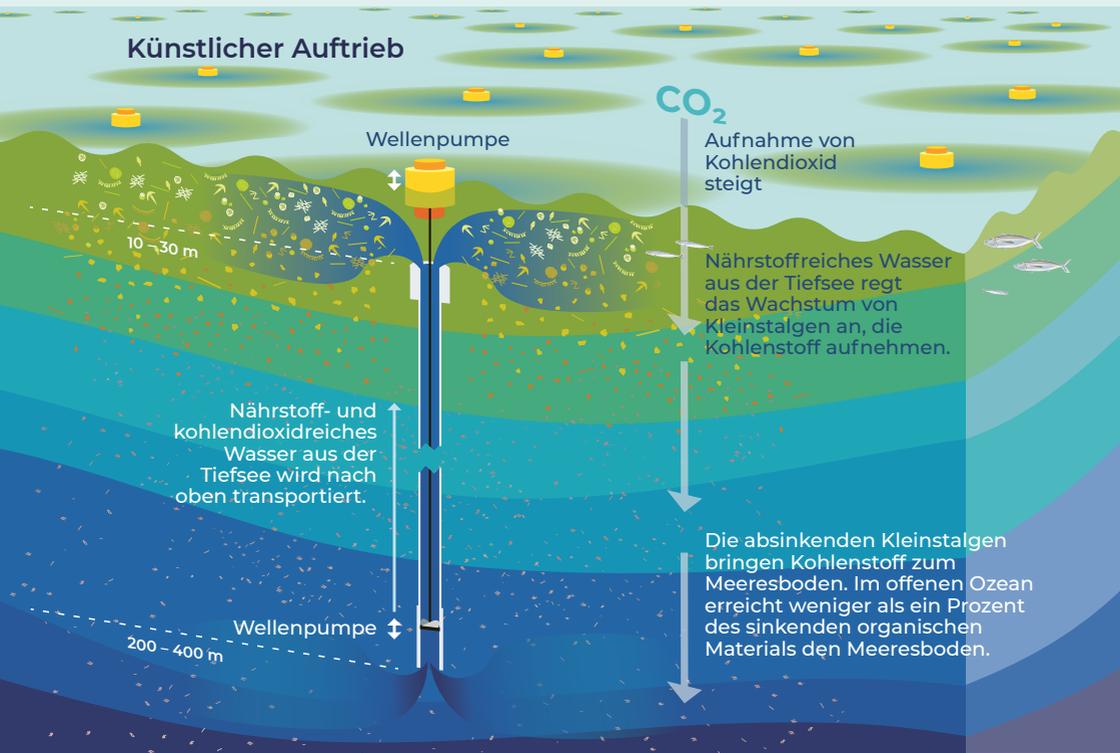
Foto: Michael Sswat/GEOMAR

für Ozeanforschung Kiel auf der PANDORA V eingeeckelt. Das 20 Meter lange Segelboot fuhr von Gran Canaria aus etwa 140 Seemeilen weit Richtung Süden, in ein Meeresgebiet beliebt bei Meeresforschenden, weil die Wassermassen des Atlantiks hier in geschlossenen kilometerweiten Wirbeln wandern. Am Ziel traf das deutsche Forscherteam das spanische Forschungsschiff SAMIENTO DE GAMBOA. Dessen wissenschaftliche Crew hatte bereits einen Wasserwirbel auserkoren und war seit Tagen dabei, alle Wassereigenschaften zu untersuchen.

## Die Idee vom begrünten Ozean

Dieser Wirbel sollte es sein. In ihn würde das deutsch-spanische Forscherteam die neu entwickelte Wellenpumpe aussetzen, welche zu diesem Zeitpunkt an Bord der SAMIENTO DE GAMBOA lagert. Die Pumpe besteht aus einem 200 Meter langen Schlauch mit einem integrierten Wasserheber. Sie soll für künstlichen Auftrieb sorgen: Das heißt, sie soll nährstoffreiches Wasser aus rund 200 Metern Tiefe an die Meeresoberfläche pumpen und damit das glasklare nährstoffarme Oberflächenwasser düngen. Ob dieses technische Konzept auch auf hoher See aufgeht, wollen Jost Kemper und seine Kollegen auf dieser Schiffsexpedition testen.

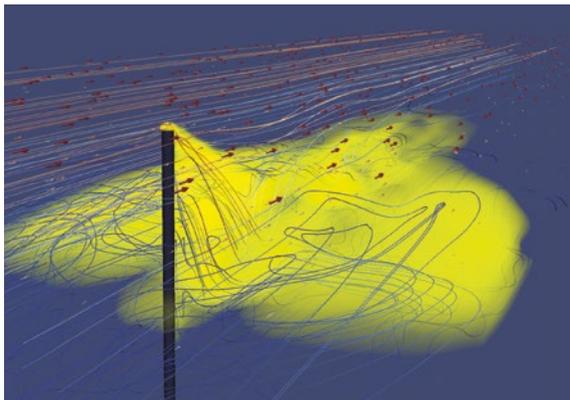
Langfristig besteht nämlich die Hoffnung, durch den Einsatz zehntausender solcher Auftriebspumpen das Algenwachstum in nährstoffarmen Meeresgebieten anzuregen. Die Algen sollen Photosynthese betreiben, dabei viel Kohlendioxid aus dem Meer aufnehmen und den enthaltenen Kohlenstoff in Millionen Tonnen Algenmasse binden. Anschließend würden die Algen entweder absterben und größtenteils absinken oder aber von Zooplankton und Fischen gefressen werden und als Kotballen oder Kadaver in die Tiefe



Darstellung der Idee des künstlichen Auftriebs erzeugt durch den Einsatz einer Wellenpumpe. Grafik: Rita Erven/GEOMAR

wandern. Egal in welcher Form, in Wassertiefen von mehr als 1000 Metern wären das kohlenstoffreiche Material und mögliche Abbauprodukte für Jahrzehnte bis Jahrhunderte weggeschlossen. Das heißt, sie könnten vorerst nicht mehr in Form gasförmiger Kohlenstoffverbindungen wie Kohlendioxid oder Methan in die Atmosphäre entweichen und den Klimawandel vorantreiben.

Biologische Kohlenstoffpumpe nennen Fachleute diesen Weg des Ozeans, Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen und als organisches Material in seinen Tiefen einzulagern. Ließe sich diese Kohlenstoffpumpe durch künstlichen Auftrieb verstärken, könnte es gelingen, den Ozean so viel zusätzliches Kohlendioxid aufnehmen zu lassen, dass Treibhausgas-Rest-Emissionen der Menschheit kompensiert werden könnten. Noch aber steht die Forschung zu künstlichem Auftrieb am Anfang und es fehlen Antworten auf viele Fragen.



Diese Abbildungen zeigen, wie sich das Tiefenwasser in zwei Auftriebssituationen verhält, die Jost Kemper in seinem Strömungsmodell simuliert hat. Das kalte Wasser würde demnach zunächst absinken und sich dann in mittlerer Tiefe verteilen.

Grafiken: Jost Kemper/FH Kiel

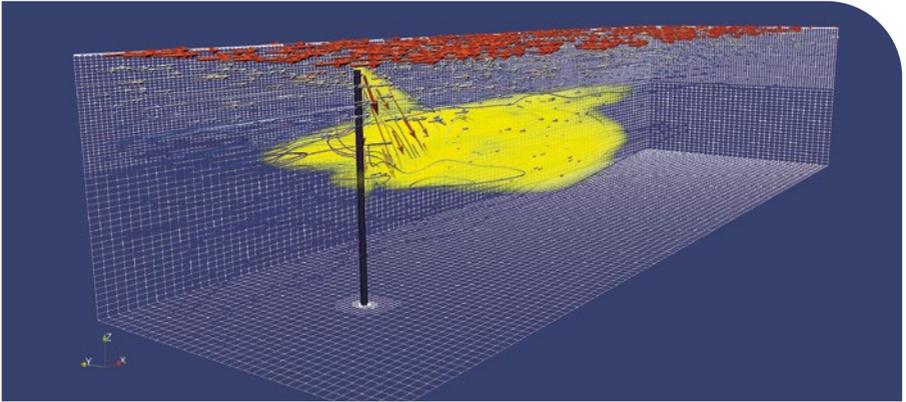
## Die Probe aufs Exempel: Stellt das Modell die Tiefenwasser-Verteilung richtig dar?

Eine Frage lautet: Was passiert mit dem kalten, nährstoffreichen Tiefenwasser, wenn es an die Oberfläche gepumpt wird? Vermischt es sich mit dem warmen und somit physikalisch leichteren Oberflächenwasser oder aber sinkt das kalte, schwerere Tiefenwasser ab und schichtet sich in mittlerer Tiefe ein, wo den Algen nur ungenügend Sonnenlicht zur Verfügung stünde?

Jost Kemper hat das Aufsteigen des Tiefenwassers in einer Wellenpumpe schon hunderte Male in einem Strömungsmodell simuliert. »Stimmen die Berechnungen unseres Modells, bildet das Tiefenwasser eine ähnliche Wolke wie Rauchschwaden, die aus einem Fabrikschornstein aufsteigen – mit dem Unterschied, dass die Tiefenwasserwolke anschließend langsam im Meer absinkt und nicht wie Rauch in die Höhe steigt«, erläutert der Strömungsexperte. Doch bildet das Modell die Realität treffend ab? Der Wellenpumpentest vor der Küste Gran Canarias soll Gewissheit bringen. Der Atlantik hat jedoch andere Pläne.

## Wellenpumpe erfolgreich im Meer ausgesetzt

Das Aussetzen der Wellenpumpe klappt am Abend des 15. Novembers 2022 noch reibungsfrei. Kurz vor Sonnenuntergang lässt die Crew der SAMIENTO DE GAMBOA zunächst den drei Meter langen, Schwimmkörper der Wellenpumpe am Schiffsheck zu Wasser. Der gelbe Zylinder aus Metall wird später als Boje und Wellenheber fungieren. Um den Schwimmkörper ist der 200 Meter lange Schlauch gewickelt, durch den das Tiefenwasser aufsteigen



soll. Er misst 1,9 Meter im Durchmesser, sodass die Pumpe in der Lage sein müsste, pro Stunde 400 Kubikmeter Tiefenwasser an die Meeresoberfläche zu transportieren. Zum Schluss hievt der Schiffskran das Bodengewicht über Bord. Es ist am unteren Ende des Schlauches befestigt und soll die Pumpe senkrecht in der Strömung halten. Als das Bodengewicht auf Knopfdruck ausklinkt und in der Tiefe verschwindet, rollt sich der Schlauch in Sekundenschnelle ab. Die Pumpe stellt sich in der Wassersäule senkrecht auf; das obere Schlauchende wie geplant etwa fünf Meter unter der Wasseroberfläche hängend.

Jost Kemper applaudiert wie alle anderen Besatzungsmitglieder der beiden Schiffe. Innerlich aber plagt ihn bereits die Ungeduld. Wegen der Dunkelheit wurden seine wissenschaftlichen Messungen auf den nächsten Morgen verschoben – wohlwissentlich, dass der Wetterbericht für den nächsten Tag Starkwind ankündigt.

Für den Kieler Wissenschaftler steht viel auf dem Spiel. Seit mehreren Jahren tüftelt er an seinem Strömungsmodell, welches ursprünglich aus dem Schiffsbau stammt und für Schiffswiderstandsberechnungen benutzt wurde. Jost Kemper baut es in ein hochauflösendes Ozeanmodell um. »Die Wasserströmungen an der Wand der Wellenpumpe kann das Modell mittlerweile bis auf drei Millimeter genau darstellen. Außerdem berücksichtigt es die Temperatur und den Salzgehalt der Wassermassen«, erzählt der Forscher mit Stolz in der Stimme. Was fehlt, ist einzig und allein der Qualitätstest; das Validieren der Modelldaten mithilfe von Strömungsdaten aus einem Wellenpumpen-Einsatz im Meer. Sowie Jost Kemper diese Echtdateen gesammelt hat, muss er seine Doktorarbeit nur noch schreiben.



Auf der Fahrt Richtung Süden bereiten Jost Kemper und Ingenieur Anton Theileis die geplanten Messungen vor. Gemeinsam überprüfen sie den Farbstoff-Kanister, der später an der Wellenpumpe befestigt werden soll (links). Anschließend befestigen sie den Fluoreszenz-Sensor am Temperatur- und Salzgehaltsmessgerät, sodass beide Geräte zusammen eingesetzt werden können. Fotos: Michael Sswat/GEOMAR

## Ein Tag der schlechten Nachrichten

Der nächste Tag beginnt jedoch mit Planänderungen. Wegen welliger See entscheiden die Forschungstaucher Michael Sswat und Daniel Brüggemann, ihr schweres Atemgerät an Bord zu lassen und stattdessen nur zu schnorcheln. Auf diese Weise muss die Ausrüstung nicht umständlich aus dem Wasser gehievt werden, wenn die Männer nach ihrem Einsatz im Meer über eine Strickleiter zurück an Bord klettern.

Die Arbeiten im Wasser sind jedoch unverzichtbar für das Gelingen der Strömungsmessungen. Aufgabe der Schnorchler ist es, einen schwimmenden 30-Liter-Kanister an der Wellenpumpe zu befestigen. Dieser Kanister ist mit einem Gemisch aus Meerwasser und Uranin-Farbstoff gefüllt – eine grüllüne Flüssigkeit, die über einen fingerdicken Schlauch von oben in die Wellenpumpe eingeleitet werden soll. »Uranin ist ungiftig aber weithin sichtbar. Mit ihm wollten wir das emporsteigende Tiefenwasser in der Wellenpumpe markieren. Die neongrüne Flüssigkeit soll sich im Tiefenwasser lösen und dann mit ihm zur Meeresoberfläche aufsteigen, sodass unsere Taucher anschließend seine Verteilung mit der Videokamera filmen können«, erläutert Jost Kemper.



Die Crew des spanischen Forschungsschiffes SAMIENTO DE GAMBOA setzt die Wellenpumpe aus. Foto: Diego Gutierrez

Der Strömungsmodellierer will derweil rund um die Wellenpumpe Sensoren in der Wassersäule auf- und absteigen lassen, um den Nährstoffgehalt, die Farbstoffkonzentration sowie die Wassertemperatur und den Salzgehalt in verschiedenen Wassertiefen zu messen. Die Crew der SAMIENTO DE GAMBOA würde Messbojen und sogenannte Unterwasser-Glider aussetzen, um großflächige Veränderungen der Chemie und Biologie des Oberflächenwassers zu dokumentieren. Videoaufnahmen und Messdaten zusammen sollen am Ende ein klares Bild über den Verbleib des Tiefenwassers zeichnen und als Grundlage für den Modellabgleich dienen.

### **Eine schleichende Vorahnung**

Michael Sswat ist der Erste, den ein ungutes Gefühl beschleicht. »Als wir uns der Wellenpumpe näherten, wunderte ich mich, dass sie schräg in der Wassersäule stand – und nicht kerzengerade, wie ich es erwartet hatte«, erzählt er.

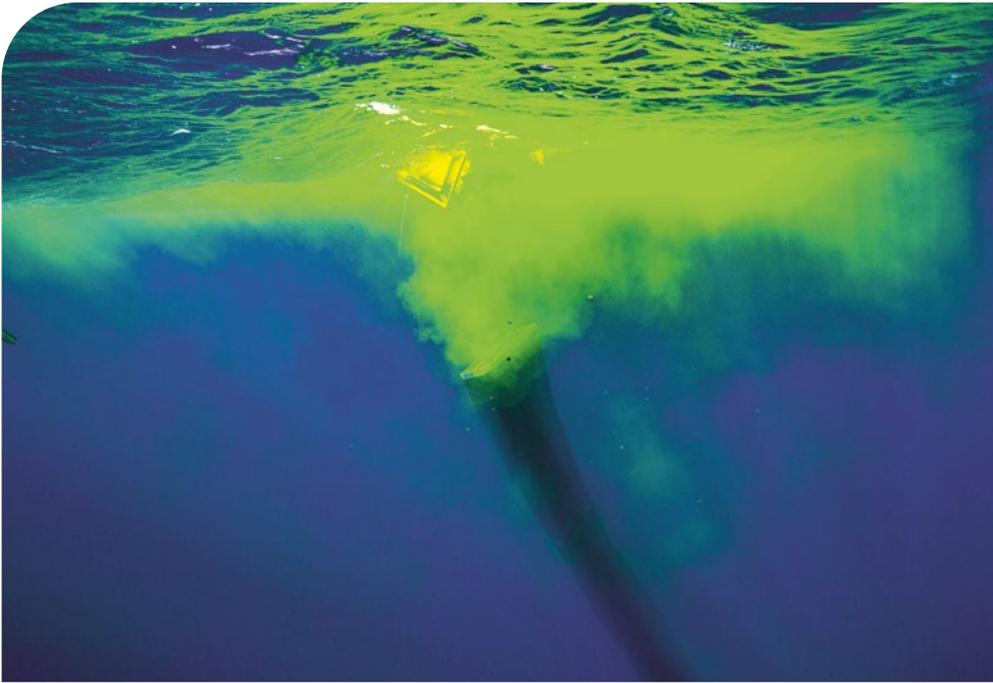
Das Befestigen des Kanisters an der Auftriebsleine der Wellenpumpe gelingt. Michael Sswat holt einmal tief Luft, taucht zum oberen Ende der Pumpe hinab und platziert den Farbstoffschlauch tief im Pumpenschlauch. Auf sein Handzeichen hin schaltet Daniel Brüggemann an der Meeresoberfläche die Farbstoffpumpe am Kanister an. Grellgrüne Farbwolken steigen aus dem Schlund



Eine etwa drei Meter lange Boje aus Metall hält die Auftriebspumpe knapp fünf Meter unter der Wasseroberfläche. Ihre Auf- und Abwärtsbewegung in den Wellen wird auf einen Wasserheber im Pumpenschlauch übertragen, der das Tiefenwasser dann in die Höhe hievt. Foto: Michael Sswat/GEOMAR

der Wellenpumpe auf, allerdings bei Weitem nicht so viele wie die Wissenschaftler erhofft haben und irgendwie scheint der Kanister zu lecken.

Über Wasser ruft Jost Kemper dem Steuermann der PANDORA V Kommandos zu. Das Segelboot lässt sich wegen Wind und Wellengang nur schwerlich auf einer Stelle halten. Nach jedem Sensor-Tauchgang muss das Schiff eine Runde drehen, um zur Wellenpumpe zurückzukehren. Und zum großen Ärger des Wissenschaftlers können sie die Pumpe nur von einer Seite aus anfahren. Anderenfalls liefe das Segelschiff Gefahr, auf die Pumpe zu treiben. Ein Schlauchboot wäre in diesem Moment die deutlich bessere Wahl gewesen, denn natürlich treibt der Farbstoff auf jene Seite der Pumpe, die das Segelschiff nicht ansteuern kann. Wenn schon Pech, dann richtig.



Auf diesem Bild steigt grüner Farbstoff aus der schrägstehenden Auftriebspumpe auf, sodass die Wissenschaftler einen Moment lang glauben, es liefе alles nach Plan.

Foto: Michael Sswat/GEOMAR

## Zuerst stürmischer Wind, dann die Ernüchterung

Elfmal gelingt es Jost Kemper in den nächsten 30 Minuten, seinen Fluoreszenz-Sensor in die Tiefe hinabzulassen. Nicht viel, aber wenigstens etwas. Dann drängt der Kapitän der PANDORA V zur Eile. Die Schlechtwetterfront naht. Alle Mann an Bord. In Windeseile packen die Kieler Wissenschaftler ihre Messgeräte und Ausrüstung zusammen und verstauen sie unter Deck.

Eine Stunde später, das Segelschiff arbeitet bereits mit voller Motorleistung gegen Wind und Wellen an, kommen Jost Kemper und seine Kollegen das erste Mal wieder zusammen. Die Schnorchler berichten, dass sie in Pumpennähe keinen Temperaturunterschied gespürt hätten. »Das Oberflächenwasser war 24 Grad Celsius warm, das Tiefenwasser nach Auskunft unserer spanischen Kollegen etwa 6 Grad Celsius kälter. Hätte die Pumpe tatsächlich kaltes Tiefenwasser an die Oberfläche transportiert, wäre dieser Temperatursprung spürbar gewesen«, sagt Michael Sswat.

Jost Kempers Hoffnungen auf brauchbare Daten schwinden – doch erst einmal müssen sie die Rückfahrt nach El Hierro ohne Übelkeitsattacken überstehen. Alles und jeder an Bord wird stundenlang kräftig von Wind und Wellen durchgerüttelt.

Traurige Gewissheit stellt sich zwei Tage später ein. Der Hersteller der Wellenpumpe hat Funktionsdaten ausgewertet, welche die Pumpe regelmäßig per Satellit versendet. Die Daten lassen die Schlussfolgerung zu, dass sich nur drei Stunden nach dem Aussetzen der Wellenpumpe das Bodengewicht gelöst hat. »Die Wellenpumpe hat in diesem Moment aufgehört zu pumpen. Ein Desaster für unsere Arbeit«, sagt Jost Kemper kurz nach seiner Rückkehr auf die Kanaren.

Drei Wochen später klingt er schon wieder hoffnungsvoller: »Schlechtes Wetter und technisches Versagen können jede Expedition treffen. Davor ist niemand gefeit. Wir analysieren jetzt, was wir mit den gewonnenen Daten anfangen können. Für die Validierung meines Strömungsmodells greife ich auf Messungen zurück, die wir im Umlauftank der Kieler Fachhochschule gemacht haben. Die Forschung muss schließlich weitergehen«, sagt er.

Dennoch haben die Expeditionserfahrungen das Wissenschaftlerteam auch ein Stück weit geerdet. Jost Kemper: »Sollten Auftriebspumpen eines Tages tatsächlich als wirksames Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme eingestuft werden, sehen wir, dass es mit dem Aussetzen der Pumpen bei Weitem nicht getan ist. Sie müssen auch laufen – zu Tausenden und über viele Jahre hinweg. Das wiederum wäre eine riesige technische Herausforderung und vermutlich viel schwerer, als man es sich aus heutiger Sicht vorstellt.«

---

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

# Auf den Aha-Moment kommt es an

Dimitris Poursanis/Ocean Image Bank

## Mehr lokale Unterstützung für Projekte zur Wiederherstellung und Erweiterung von Seegras- wiesen und Salzmarschen an deutschen Küsten

Wie CDRmare-Forschende mehr lokale Unterstützung für Projekte zur Wiederherstellung und Erweiterung von Seegraswiesen und Salzmarschen an deutschen Küsten generieren wollen

Sollte sich Deutschland entschließen, seine Salzmarschen, Seegraswiesen und Tangwälder zu erweitern, um durch eine verstärkte Kohlendioxidaufnahme dieser Ökosysteme einen Teil seiner Restemissionen zu kompensieren, braucht es dafür die Unterstützung der Küstenbevölkerung. Unter welchen Voraussetzungen diese gewillt ist, entsprechende Projekte mitzutragen, und welche wirtschaftlichen Perspektiven sich daraus ergeben könnten, erforschen die Geographen Michael Fink, Sarah Rabe und Kremena Burkhard im Rahmen von CDRmare. Erste Ergebnisse einer Befragung in 12 deutschen Küstenstädten zeigen: Die Küstenbewohner schätzen Seegraswiesen und Salzmarschen aus vielerlei Gründen, wissen aber kaum etwas über deren Klimaschutzpotenzial. Eine Erkenntnis, auf deren Grundlage die Wissenschaftler\*innen nun Aufklärungs- und Vernetzungsstrategien entwickeln.



Rund 50 Fragen stellten Geograph Michael Fink und sein Team mehr als 220 Küstenbewohnern in Niedersachsen und Schleswig-Holstein.

Foto: Jasper Wittenburg/Universität Hamburg

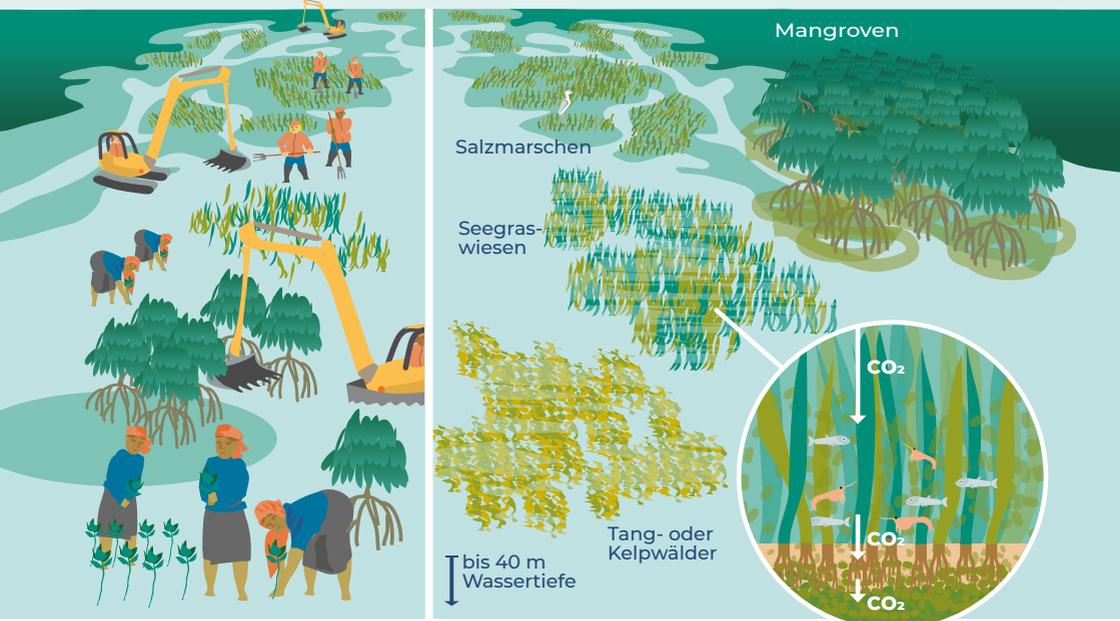
Sarah Rabe legt es mittlerweile darauf an: Wann immer die 30-jährige Geografin mit Menschen über ihre Forschung zu Seegraswiesen und Salzmarschen entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste spricht, bringt sie den Waldvergleich ins Spiel. »Seegraswiesen und Salzmarschen an den deutschen Küsten sind um 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. Wenn ich diesen Fakt erläutere, merke ich, wie sich bei meinen Zuhörern dieser Aha-Moment einstellt. Ihre Aufmerksamkeit steigt und die meisten beginnen, genauer zuzuhören. Das ist der Zeitpunkt, an dem ich nicht nur über das Klimaschutzpotenzial der Küsten-Naturräume spreche, sondern auch über ihre vielen anderen Vorteile, die sich im besten Fall mit dem Klimaschutzaspekt verbinden ließen«, erzählt die Wissenschaftlerin von der Universität Hamburg.

## **Die unterschätzte Klimarolle der Seegraswiesen, Salzmarschen und Tangwälder**

Ihr Kollege Michael Fink nickt zustimmend, denn Sarah Rabes Erfahrungen aus persönlichen Gesprächen decken sich mit den Ergebnissen von 222 Straßeninterviews, die der 38-jährige Geograph und sein Team als Teilprojekt im CDRmare-Verbund sea4soCiety im März und Juli 2022 in zwölf Küstenstädten in Schleswig-Holstein und Niedersachsen durchgeführt haben. »Die Menschen kennen und schätzen die Bedeutung der Seegraswiesen und Salzmarschen für den Küstenschutz, als Lebensraum für Fische und andere Meeresorganismen sowie als integralen Bestandteil ihrer Definition von Heimat, um nur einige Beispiele zu nennen. Wie viel Kohlendioxid die Küstenökosys-



## Küstenökosysteme als Kohlenstoffspeicher



Durch die Wiederherstellung und großräumige Ausweitung vegetationsreicher Küstenökosysteme im Gezeiten- und Flachwasserbereich könnte es gelingen, die Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres zu verstärken. Welche Flächen in Deutschland für entsprechende Projekte zur Verfügung stünden und ob die Küstenbevölkerung die Maßnahmen unterstützen würde, ist Gegenstand der Forschung im CDRmare-Verbund sea4soCieTy.

Grafik: Rita Erven/GEOMAR

## Erfolgsfaktor lokale Bevölkerung

Die Bereitschaft der Menschen, sich für ihre Heimat zu engagieren, kann Projekten zur Erweiterung der Seegraswiesen, Salzmarschen und Kelpwälder entlang der deutschen Küste zum Erfolg verhelfen oder aber sie von Anfang an durch Proteste behindern. »Wie die Menschen vor Ort über mögliche Eingriffe in den Küstenraum denken, ist deshalb ganz entscheidend. Schließlich könnten Erweiterungsprojekte ihre Heimat oder Lebensgewohnheiten verändern«, sagt Michael Fink. »Aus diesem Grund ist es uns so wichtig herauszufinden, wie die Küstenbevölkerung zum Klimaschutz steht, welche Bedeutung die lokalen Küstenökosysteme für die Menschen haben und welche Werte die Bürger\*innen vertreten. Alle drei Faktoren bilden nämlich die Ausgangsbasis für jegliche Kommunikation zu möglichen ökosystem-basierenden Kohlendioxid-Entnahme-Projekten.«



Geografin Sarah Rabe untersucht, welche Akteure in Norddeutschland Interesse an einer kommerziellen Nutzung von Seegräsern, Salzmarschpflanzen oder aber Großalgen haben und welche Hürden sie bislang daran hindern, das Wertschöpfungspotenzial der lokalen Ökosysteme auszuschöpfen. Dazu lädt die Wissenschaftlerin interessierte Unternehmer\*innen sowie Vertreter\*innen aus Politik und Wirtschaftsförderung zu Workshops ein, in denen sie gemeinsam Probleme und mögliche Lösungen diskutieren.

Fotos: Sarah Rabe. Michael Fink/Universität Hamburg

## Die Strategie: Wissen, Teilhabe und neue Wertschöpfungsoptionen

Wissenschaftliche Studien belegen: Werden die Sorgen und Bedürfnisse der Menschen vor Ort nicht von Anfang an ernst genommen und lokale Vertreter\*innen in Entscheidungsprozesse mit eingebunden, fehlt am Ende häufig die so wichtige lokale Unterstützung für Neuerungen oder Veränderungen. Aus diesem Grund entwickeln Michael Fink und seine Kolleginnen Sarah Rabe und Kremena Burkhard im Rahmen der Forschungsmission CDRmare Aufklärungs- und Vernetzungsstrategien für künftige Projekte zur verstärkten Kohlendioxid-Entnahme lokaler Seegraswiesen, Salzmarschen und Tangwälder. Dabei setzen sie auf Wissen, Teilhabe und neue wirtschaftliche Perspektiven für die Menschen vor Ort, die sich durch größere, gesunde Küstenökosysteme ergeben und einen zusätzlichen Mehrwert zur Kohlendioxid-Aufnahme und -speicherung generieren würden.

»Was heutzutage kaum noch jemand weiß: Das Gras der Seegraswiesen ist eine unglaublich wertvolle Ressource. Einmal getrocknet, schimmelt und verrottet es nicht und kann daher für viele verschiedene Zwecke eingesetzt werden, so zum Beispiel als umweltfreundliches Dämmmaterial, als nachhaltiger Ausgangsstoff für Verpackungsmaterial oder aber als Bodenverbesserer auf Feldern. Noch bis in die 1960er Jahre haben die Menschen an Nord- und Ostsee Seegräser vielseitig genutzt. Heute aber werden an den Strand gespülte

Gräser von der Stadtreinigung eingesammelt, als Garten- und Parkabfall deklariert und entsprechend entsorgt, sodass eine Weiterverarbeitung schon von Gesetzes wegen erheblich erschwert wird und mit sehr viel bürokratischem Aufwand verbunden ist«, sagt Sarah Rabe.

Mithilfe von Expert\*innen-Interviews versucht sie herauszufinden, welche Akteure in Norddeutschland Interesse an einer kommerziellen Nutzung von Seegräsern, Salzmarschpflanzen oder aber Großalgen haben, wie deren Verwertungsideen aussehen und welche institutionellen Hürden Einzelpersonen oder Unternehmen bislang daran hindern, das Wertschöpfungspotenzial der lokalen Ökosysteme auszunutzen – beispielsweise indem die kohlenstoffreiche Biomasse zu langlebigen Produkten weiterverarbeitet wird. Ein solcher Schritt wäre auf jeden Fall im Sinne des Klimaschutzes, weil der in der Vegetation gebundene Kohlenstoff so vergleichsweise sicher gespeichert wäre und im Idealfall mehrere Jahrzehnte lang nicht wieder in die Atmosphäre entweichen könnte. Dass allerdings an den Strand gespültes Seegrass in Deutschland als Gartenabfall deklariert wird und deshalb von vielen potentiellen Nutzern nicht verwertet werden kann, stellt eine der vielen Herausforderungen dar, für die Wissenschaft, Politik und Wirtschaft gemeinsam Lösungen finden müssen.

## **Den Nutzen der Ökosystemerweiterungen für Natur und Mensch herausstellen**

Während Sarah Rabe die Vorreiter in Sachen nachhaltiger Ökosystem-Nutzung befragt, recherchiert ihre Kollegin Kremena Burkhard von der Leibniz Universität Hannover wissenschaftliche Fachliteratur über die vielen Leistungen, die Seegrasswiesen, Salzmarschen und Tangwälder rund um den Globus für Mensch und Natur erbringen. Mit ihrer Faktensammlung will sie zum einen Wissenslücken aufdecken. Zum anderen möchte sie eine Argumentationsbasis schaffen, mit der Forschende künftig eine gemeinschaftliche Aufklärungsarbeit zur Rolle und Bedeutung der Küstenökosysteme leisten können. Wissenschaftliche Expertise wird vielerorts benötigt: Sei es, um Entscheidungsträger zu beraten oder aber, um gemeinsam mit der Küstenbevölkerung Lösungen für einen kombinierten, lokal angepassten Klima-, Küsten- und Naturschutz zu erarbeiten.

»Michaels Umfrage hat gezeigt, dass den meisten Menschen in Norddeutschland der Schutz und Erhalt ihrer lokalen Küstenökosysteme eine Herzenssache ist. Diese Erkenntnis sagt jedoch wenig darüber aus, wie die Küstenbevölkerung reagieren wird, wenn tatsächlich aufwendige Schutz-, Wiederherstel-



Seegraswiesen bieten Tausenden Arten eine Heimat – in der Ostsee zum Beispiel Fischen wie dem Stichling. Foto: Marvin Lehmann/GEOMAR

lungs- oder Erweiterungsprojekte geplant werden. Ratsam wäre es in diesem Fall darzulegen, auf wie vielfältige Weise zunächst die Ökosysteme selbst und anschließend auch die Menschen vor Ort von solchen Schutz- und Erweiterungsmaßnahmen profitieren würden«, sagt die 37-jährige Geografin und Ökologin. Der Küstenbevölkerung sei nämlich durchaus bewusst, in welchem Ausmaß die Naturräume unter den Folgen des Klimawandels leiden. Geschwächt wird die Widerstandskraft der Ökosystems außerdem durch andere menschengemachten Stressfaktoren oder Störungen – zum Beispiel durch die Verschmutzung der Meere und eine Verbauung der Küstenzonen.

»Im Ostseeraum befürchten Fachleute, dass künftige Meereshitzewellen zum Absterben der noch existierenden Wiesen des Gewöhnlichen Seegrases *Zostera marina* führen könnten. Sowohl die Seegräser der gemäßigten Breiten als auch Großalgen wie der Zuckertang gelten als wenig hitzebeständig«, sagt Sarah Rabe. »Maßnahmen, mit denen die Widerstandskraft der Küstenökosysteme gestärkt würde, dürften demzufolge von der Bevölkerung als unterstützenswert empfunden werden«, ergänzt Michael Fink.

### **Von Anfang an mit den Menschen vor Ort – und niemals ohne sie**

Ihn persönlich motivieren vor allem die individuellen Reaktionen der Umfrageteilnehmenden auf das 50 Fragen lange Interview, weiter daran zu arbeiten, Wissenschaftler\*innen, lokale Bevölkerung und Vertreter\*innen aus Wirtschaft, Politik und Verwaltung zusammenzuführen. »Ich war wirklich überrascht, wie viele Teilnehmende sich bei uns bedankt haben, dass wir nach ihrer Meinung gefragt haben und sie Gelegenheit hatten, sich zu diesem auch



Die Gesichter hinter der Forschung: Kremena Burkhard und Michael Fink.

Fotos: Jan-Michael Schönebeck/Universität Hannover, Michael Fink/Universität Hamburg

aus Ihrer Sicht so wichtigen Thema zu äußern. Die Menschen sorgen sich um ihre lokalen Seegraswiesen und Salzmarschen. Sie wollen, dass mehr für deren Schutz und gegen den Klimawandel getan wird, und beides stimmt mich hoffnungsvoll, dass Maßnahmen zur Wiederherstellung oder aber zur Erweiterung dieser Ökosysteme lokal Unterstützung finden werden«, sagt der Studienleiter.

Kremena Burkhard fühlt sich dadurch bestärkt, dass die Forschung ihres Teams zu den Wechselwirkungen zwischen Menschen und Natur Hand in Hand geht mit den parallel stattfindenden naturwissenschaftlichen Untersuchungen in Salzmarschen, Seegraswiesen und Tangwäldern: »Diese disziplinenübergreifende Zusammenarbeit im CDRmare-Verbund sea4soCiety ermöglicht es uns, problemorientiert zu forschen und gemeinsam Lösungen zu entwickeln, die uns am Ende hoffentlich als Gesellschaft helfen werden, den Klimawandel einzudämmen und unsere in vielerlei Hinsicht so wertvollen Küstenökosysteme zu erhalten«, so die Wissenschaftlerin. Sorgen bereite ihr hingegen, wie viele Veränderungen innerhalb kurzer Zeit vorangetrieben werden müssen. »Wir Forschende spielen als Wissensvermittler eine ganz zentrale Rolle in diesem Transformationsprozess. Doch manchmal frage ich mich, ob es uns als Gesellschaft gelingen wird, alle anstehenden Aufgaben noch rechtzeitig zu erledigen. Viel Zeit bleibt uns nicht mehr.«

---

**Alle beschriebenen Forschungsarbeiten wurden im CDRmare-Forschungsverbund »Sea4soCiety – Innovative Ansätze zur Verbesserung des Kohlenstoffspeicherpotenzials von Vegetationsküstenökosystemen« durchgeführt.**

A portrait of Lennart Westmark, a man with short brown hair, glasses, and a beard, wearing a grey sweater over a maroon collared shirt. He is smiling and looking slightly to the right. The background is a blurred indoor setting with teal-colored window frames.

## Ein Wegbereiter aus Überzeugung

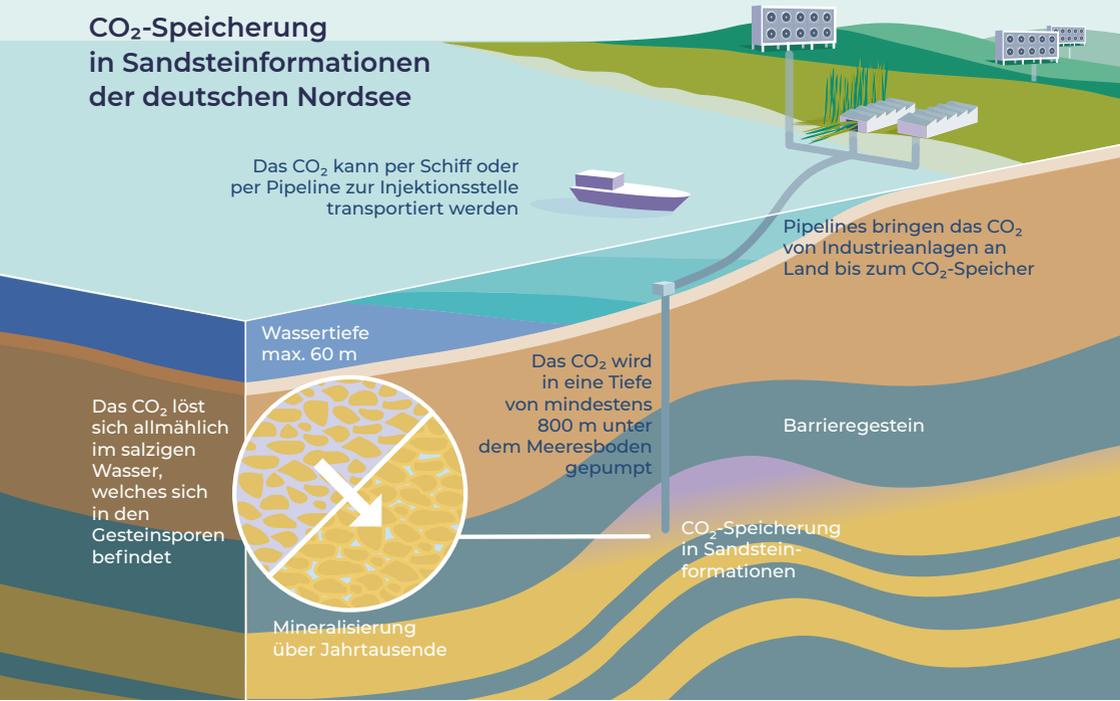
Foto: Sina Löschke/CAU

### Wie eine Gesetzesreform die Kohlendioxid-Abscheidung und unterirdische Speicherung in Deutschland voranbringen könnte

Obwohl auf internationaler Ebene alle Weichen gestellt sind, ist es aufgrund rechtlicher Hürden in Deutschland bislang nicht möglich, abgeschiedenes Kohlendioxid tief unter dem Meeresboden der deutschen Nord- und Ostsee zu verpressen. Rechtswissenschaftler Lennart Westmark von der Universität Hamburg hat deshalb die Aufgabe übernommen, juristische Lösungsvorschläge zu erarbeiten. Sein Ziel: Mehr Klarheit und Rechtssicherheit für den Fall, dass die Politik den Startschuss gibt für unterirdische CO<sub>2</sub>-Speicherprojekte in deutschen Gewässern.

Wenn Lennart Westmark über die unterirdische Speicherung von abgeschiedenem Kohlendioxid als Klimaschutzmaßnahme spricht, springt er in sein »juristisches, emotionsloses Ich«, wie er sagt. Wissenschaftler\*innen, so erinnert ihn sein Promotionsbetreuer Prof. Dr. Alexander Proelß immer wieder, machen weder Politik, noch treten sie als Aktivisten auf. Wissenschaftler\*innen orientieren sich an Fakten. Und Fakt ist, dass die Bundesrepublik

## CO<sub>2</sub>-Speicherung in Sandsteinformationen der deutschen Nordsee



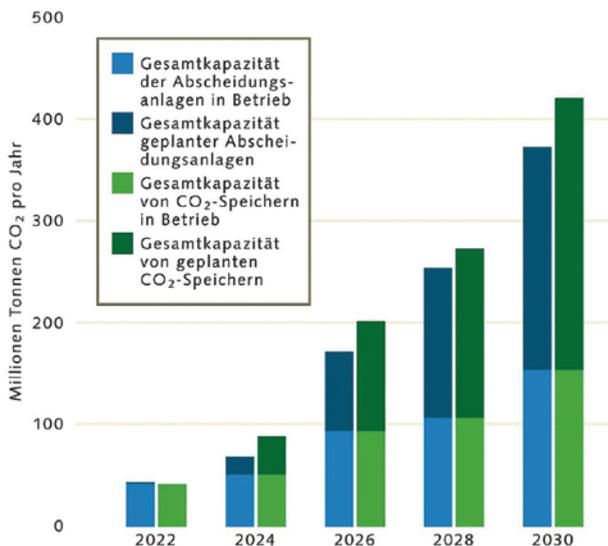
Im Untergrund der deutschen Nordsee liegt eine Vielzahl von Sandsteinformationen, in denen abgeschiedenes und komprimiertes Kohlendioxid verpresst werden könnte.

Grafik: Rita Erven/GEOMAR

Deutschland ihr politisches Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 nur dann erreichen wird, wenn Zementwerke, Müllverbrennungsanlagen und andere Unternehmen mit schwer vermeidbaren Treibhausgasemissionen freiwerdendes Kohlendioxid abtrennen, es auffangen, komprimieren und an einem sicheren Ort tief im Untergrund einlagern. Diese unterirdischen Speicherstätten können sich sowohl an Land als auch im Meeresuntergrund befinden. In jedem Fall aber wäre die Verpressung für die Ewigkeit gedacht.

Kohlendioxid-Abscheidung und unterirdische Speicherung heißt dieses technische Verfahren. Es wird auch CCS genannt, was als Abkürzung für die englische Bezeichnung »Carbon Capture and (geological) Storage« steht. Die dazugehörigen Technologien sind schon seit mehr als 30 Jahren bekannt. Zum Einsatz gekommen sind sie seither jedoch nur in wenigen Industriesektoren, so zum Beispiel bei der verstärkten Ölförderung (englisch: Enhanced Oil Recovery) in Nordafrika und Nordamerika sowie bei der Erdgasaufbereitung vor der Küste Norwegens und Australiens.

Vergleich der aktuellen und geplanten CO<sub>2</sub>-Abscheidungs- und -Speicherkapazitäten für die Jahre 2022 bis 2030 (Stand: September 2023)



Die aktuell geplanten Kohlendioxid-Speicherprojekte weltweit würden nach Berechnungen der IEA ausreichen, um die im Jahr 2030 anfallende Menge abgedehnten Kohlendioxids aufzunehmen.

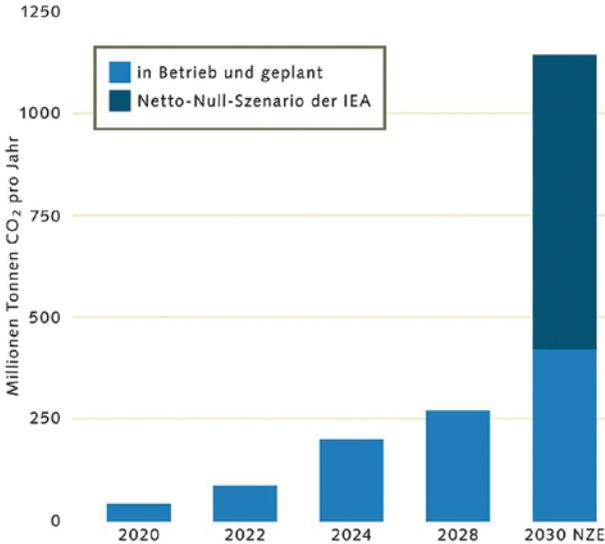
Abbildung: World Ocean Review nach IEA // CC-BY 4.0

## CO<sub>2</sub>-Speicherung: Ein Verfahren im Aufwind

Dieses Schattendasein endete spätestens mit der Veröffentlichung des sechsten Weltklimaberichtes. Angesichts der rasant voranschreitenden Erwärmung und der immer größeren Schäden durch den Klimawandel, steigen derzeit das Interesse und die Investitionen in CCS-Projekte exponentiell. Neue Abscheideverfahren werden getestet, geeignete Speicher-Gesteinsformation gesucht und erkundet, Pipelines für den Kohlendioxid-Transport geplant und errichtet, Technologien für ein Monitoring der unterirdischen CO<sub>2</sub>-Lagerstätten entwickelt.

Die Zahl der weltweit in Planung befindlichen CO<sub>2</sub>-Speicherprojekte ist seit Anfang 2022 derart in die Höhe geschneit, dass die Internationale Energieagentur IEA im Sommer 2023 ihre CCS-Zukunftsprognose für das Jahr 2030 revidierte. Gestrichen wurde die Sorge, dass die bis dato erschlossenen Speicherkapazitäten nicht ausreichen würden, um den Bedarf zu decken. Stattdessen sprechen die IEA-Fachleute neuerdings von einem positiven Ausblick: Die globalen Ausbaupläne für CO<sub>2</sub>-Lagerstätten versprechen ein Speichervolumen, das den Berechnungen zufolge in etwa so viel Kohlendioxid aufnehmen kann, wie im Jahr 2030 durch Abscheidungen anfallen sollte.

Aktuelle und geplante CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität in den Jahren 2020 bis 2030 im Vergleich zum Netto-Null-Szenario (NZE) der Weltenergieagentur (IEA) (Stand: September 2023)



Allerdings hinkt der Ausbau von CCS-Projekten noch weit hinter dem zurück, was notwendig wäre, um bis zum Jahr 2050 das Ziel der Treibhausgasneutralität zu erreichen. Zu erkennen ist dies an der großen CCS-Kapazitätslücke in der Abbildung (dunkelblau), welche sich ergibt, wenn man die Speicher-Ausbaupläne bis 2030 mit dem Netto-Null-Entwicklungspfad der IEA vergleicht.

Abbildung: World Ocean Review nach IEA // CC-BY 4.0

In Deutschland diskutieren Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft die Möglichkeiten einer geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung im Rahmen der sogenannten Carbon Management-Strategie. Deren erster Entwurf wird aktuell vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz erarbeitet. Sollte CCS darin empfohlen werden, käme dies einem Paradigmen-Wechsel gleich. Vor mehr als zehn Jahren noch lehnte die deutsche Öffentlichkeit CCS so grundlegend ab, dass Bund und Länder bei der Gesetzgebung im Jahr 2012 einen Kompromiss eingingen. Sie einigten sich auf eine sogenannte »Länderklausel«, mit deren Hilfe zum Beispiel die Küstenländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern eine unterirdische CO<sub>2</sub>-Speicherung auf ihrem Territorium verbieten konnten – und dieses Verbot auch auf das zwölf Seemeilen breite Küstenmeer ausweiteten.

### Der Schritt in die Wissenschaft: Lust auf ergebnisoffenes Arbeiten

Das Gesetz, welches 2012 von Bundestag und Bundesrat verabschiedet wurde, war das sogenannte Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG). Lennart Westmark ging damals noch zur Schule und ahnte zu diesem Zeitpunkt noch nicht einmal, dass er eines Tages Jura studieren würde. »Ich wusste lange nicht, was



Als angehender Rechtsexperte für CCS-Fragen beteiligt sich Lennart Westmark auch an Workshops mit Wirtschaftsvertretern und Expert\*innen aus Umweltverbänden und den zuständigen deutschen Behörden. Fotos: Sina Löschke/CAU

ich beruflich machen wollte und habe mich für das Jurastudium entschieden, weil es mir so viele Berufsoptionen offen ließ und ich mich nicht schon direkt nach dem Abitur auf ein bestimmtes Aufgabenfeld festlegen musste«, erzählt der 28-Jährige heute.

Vergleichsweise spät entschied er sich dann auch, nach dem ersten juristischen Staatsexamen an der Universität Hamburg in die Forschung zu gehen und nicht sofort das zweite Examen abzulegen und eine Karriere als Richter oder Anwalt anzustreben. »In meiner Examensphase merkte ich, wie ergebnisoffen und auf Augenhöhe in der Rechtswissenschaft miteinander diskutiert wird. Im Gegensatz zu einigen meiner Freunde, die heute als Anwälte arbeiteten, kann ich als Wissenschaftler Fragestellungen bearbeiten und mit Kolleg\*innen, Professor\*innen und vielen anderen spannenden Menschen diskutieren, ohne bestimmte Mandatsinteressen vertreten zu müssen. Auf diese Art zu arbeiten, hatte ich richtig Lust«, sagt Lennart Westmark.

Als am Tag seiner letzten Examensprüfung am Lehrstuhl für internationales Seerecht und Umweltrecht, Völkerrecht und Öffentliches Recht der Universität Hamburg eine Promotionsstelle zum Thema unterirdische CO<sub>2</sub>-Speicherung ausgeschrieben wurde, bewarb er sich wegen des Themas. Das war im Sommer 2021. Seitdem ist Lennart Westmark Teil eines technisch-innovativen Projektes, wie er selbst über GEOSTOR, den CDRmare-Forschungsverbund zur CO<sub>2</sub>-Speicherung unter der Nordsee, sagt. »In Sachen Klimaschutz haben wir in Deutschland noch längst nicht alle Register gezogen. Mein Anspruch ist es, nicht nur rumzunörgeln, weil Dinge nicht funktionieren, sondern prag-



Die Arbeit an einer neuen Forschungsfrage beginnt für Lennart Westmark stets mit der Faktenrecherche – und das bedeutet manchmal auch, naturwissenschaftliche Fachbegriffe zu googlen, die Geolog\*innen vielleicht geläufig sind, einem Juristen beim ersten Hören aber rein gar nichts sagen. Foto: Sina Löschke

matische Lösungen zu suchen. Das heißt, Lösungen, die auf der Hand liegen, von uns bislang aber nicht genutzt werden. Dazu gehört für mich im Rahmen der Forschungsmission CDRmare herauszufinden, welche gesetzlichen Rahmenbedingungen sich ändern müssten, um Kohlendioxid-Speicherprojekte in Deutschland zu ermöglichen«, so Lennart Westmark.

## Ein Gesetz setzt Staub an

Um das deutsche Kohlendioxid-Speicherungsgesetz zu verstehen, muss man wissen, dass es von Anfang an nur als Gesetz konzipiert wurde, welches lediglich die Erforschung, Erprobung und Demonstration von Technologien zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid in unterirdischen Gesteinsschichten regeln sollte, nicht jedoch deren tatsächlichen Einsatz im industriellen Maßstab. Auf diese Weise kam der deutsche Gesetzgeber seiner Pflicht nach, CCS-spezifische Änderungen im internationalen Rechtsregime in nationales Recht umzusetzen, ohne dabei jedoch seine gewohnte Vorsicht und Skepsis abzulegen.

Einschlägige Regelwerke auf internationaler Ebene sind das Protokoll zum Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen von 1972 (*London-Protokoll*), das Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (*OSPAR-Übereinkommen*) sowie eine EU-Richtlinie zur umweltverträglichen CO<sub>2</sub>-Speicherung von Kohlendioxid an Land und auf See. »Während sowohl das London-Protokoll als auch die EU-Richtlinie und das OSPAR-Übereinkommen eine Verpressung von Kohlendioxid im Meeresuntergrund unter bestimmten Voraussetzungen erlauben, hat der deutsche Gesetzgeber auf Bundes- und Landesebene Regelungen geschaffen, die CCS heute faktisch unmöglich machen«, resümiert Lennart Westmark.



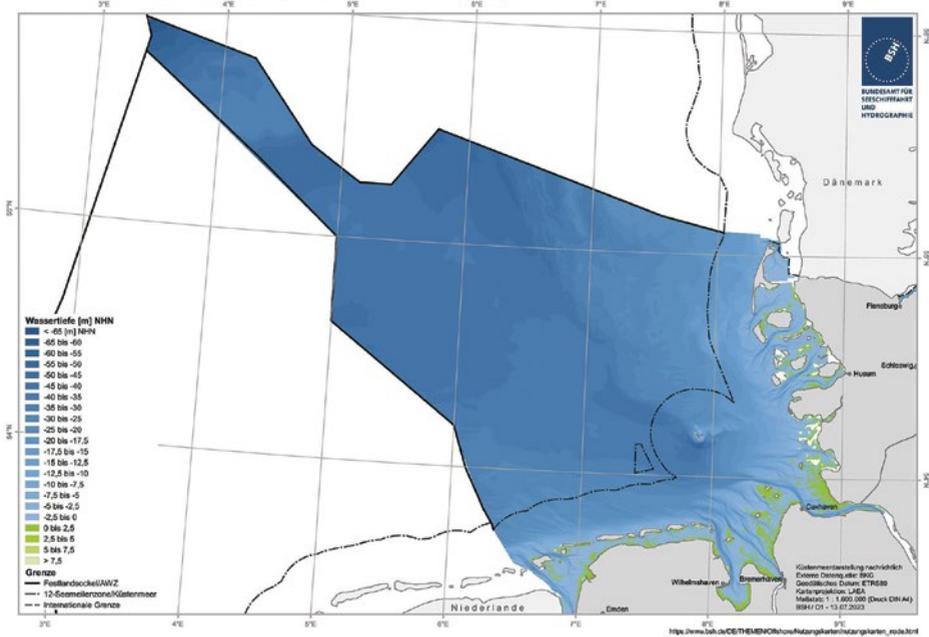
Fischerei, Schifffahrt, Tourismus, Windenergiegewinnung, Militärübungsplatz und vieles mehr: Deutschland nutzt seine Nordsee-Gebiete bereits intensiv. Mit der Speicherung von abgeschiedenem Kohlendioxid im tiefen Untergrund käme ein weiterer Nutzungsanspruch hinzu, dessen Vereinbarkeit mit dem Meeresschutz und anderen Nutzungsformen in CDRmare untersucht wird.

Foto: Robert Katzki/Unsplash.com

Diese restriktive Herangehensweise Deutschlands erklärt er mit der landestypischen Auslegung des Vorsorgeprinzips: »Das Vorsorgeprinzip besagt, dass die Umwelt am effektivsten geschützt wird, wenn denkbare Belastungen im Voraus vermieden werden. Es wird jedoch in internationalen Verträgen auf unterschiedliche Weise ausgestaltet, was seine Operationalisierung erschwert. Eine Kernfrage lautet zum Beispiel, wie sollen Staaten verfahren, wenn keine abschließende wissenschaftliche Gewissheit über mögliche Risiken besteht? Staaten wie Deutschland gehen in diesem Fall sehr restriktiv vor. Sie neigen dazu, zunächst alles Riskante zu verbieten, und prüfen dann im Einzelfall, was ausnahmsweise erlaubt werden kann. Bei CCS stellte sich zum Beispiel die Frage, ob es überhaupt erlaubt werden sollte. In den USA hingegen werden Risiken schneller akzeptiert. Im Gegenzug wissen alle Beteiligten jedoch, dass sie – sollte etwas schief gehen – Schadensersatz in gravierender Höhe zahlen müssen«, erklärt der Jurist.

Dieser Tradition folgend beschlossen Bundesrat und Bundestag damals, das KSpG regelmäßig zu evaluieren und erst zu einem späteren Zeitpunkt Textpassagen zu ergänzen, welche die Errichtung und Inbetriebnahme kommerzieller unterirdischer Kohlendioxid-speicher ermöglichen würden, wenn dies politisch gewollt wäre. Anträge auf die Zulassung von Forschungsspeichern konnten nur in den ersten drei Jahren gestellt werden, weil man dachte, diese kurze Zeit würde ausreichen, um genügend Erkenntnisse über die Risiken von CO<sub>2</sub>-Speicherprojekten zu sammeln und das Gesetz dann entsprechend anzupassen. Aufgrund der engen 3-Jahresfrist ist seit dem Inkrafttreten des Gesetzes jedoch nicht ein Demonstrationsprojekt beantragt worden. »Das KSpG kam somit nicht ein einziges Mal zur Anwendung, sondern verstaubt seit mehr als zehn Jahren im Archiv«, sagt Lennart Westmark.

## Nordsee: Festlandssockel / ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ)



Die deutschen Nordseegebiete unterteilen sich in das sogenannte Küstenmeer und die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ). Im Küstenmeer, welches von der Wasserlinie 12 Seemeilen weit auf das Meer hinausreicht, haben die Bundesländer die Entscheidungshoheit. Wer entscheidet, was in der angrenzende AWZ geschieht, ist eine der juristischen Fragen, mit denen sich Lennart Westmark und Alexander Proelß auseinandergesetzt haben. Grafik: © Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg/Rostock

## Vorschläge für eine Reform des Kohlendioxidspeichergesetzes

Zu wissen, wie Gesetze entstanden sind, wie sie während des Gesetzgebungsprozesses diskutiert und später von Gerichten ausgelegt wurden, gehört zum Handwerkszeug wissenschaftlich arbeitender Juristinnen und Juristen. Lennart Westmark liest deshalb nicht nur völkerrechtliche Verträge, EU-Richtlinien, nationale Gesetzestexte und die jeweilige Fachliteratur dazu, sondern auch die Protokolle von themenspezifischen UN-, EU- und Bundesparksdebatten, dazu noch Workshop- und Evaluationsberichte, Experten-Stellungnahmen und vieles mehr. Am Ende aber geht es für ihn stets um die Fragen: Was steht im Gesetz? Machen dessen Inhalte Sinn? Setzt es übergeordnetes Recht passend um und führt es in der Praxis zum angedachten Ziel? Oder sollten im Zuge einer Gesetzesreform Textpassagen verändert werden, um mehr Klarheit und Rechtssicherheit zu schaffen?

Im Falle des KSpG hat Lennart Westmark gemeinsam mit seinem Arbeitsgruppenleiter Prof. Dr. Alexander Proelß eine ganze Reihe von Verbesserungsvorschlägen zusammengetragen und in Form von Fachaufsätzen veröffentlicht. Darin empfehlen die Juristen, im Falle einer bereits angedachten Gesetzesreform die bislang geltenden Antragsfristen und CO<sub>2</sub>-Mengenbeschränkungen zu streichen und eindeutig klarzustellen, in welchen deutschen Meeresgebieten die Bundesländer über CO<sub>2</sub>-Speicherprojekte entscheiden und in welchen Gebieten die Genehmigung in den Händen des Bundes liegt. Strittig ist zudem, welche Behörde mögliche Projektanträge bearbeiten und genehmigen dürfte. Für mehr Rechtssicherheit sollten entsprechende Festlegungen getroffen und im Gesetzestext vermerkt werden.

## **Den Kohlendioxid-Export in andere Länder ermöglichen**

Ein zweiter Weg, Kohlendioxid aus deutschen Industrieprozessen unter dem Meer zu speichern, könnte über den Export des abgeschiedenen Gases in andere Küstenstaaten führen – etwa nach Norwegen, wo seit mehr als 25 Jahren CO<sub>2</sub> mehr als 1000 Meter tief unter dem Meer verpresst wird, welches bei der Erdgasaufbereitung anfällt. Das Londoner Protokoll enthält seit dem Jahr 2009 eine Ergänzung, die Staaten den Kohlendioxid-Export zum Zwecke der anschließenden Speicherung gestatten würde. Allerdings ist diese Neuerung noch nicht in Kraft getreten, weil sie bisher nur von wenigen Vertragsparteien ratifiziert wurde.

»Seit vier Jahren gibt es deshalb eine Zwischenlösung. Staaten, die schriftlich erklären, dass sie die Änderung vorläufig anwenden wollen, dürfen dies auch. Allerdings hat Deutschland diese Erklärung bis heute nicht bei der zuständigen Internationalen Seeschiffahrtsorganisation IMO eingereicht«, erklärt Lennart Westmark. Aus diesem Grund ist es deutschen Akteuren nach wie vor verboten, Kohlendioxid zum Zweck der Speicherung in andere Länder zu exportieren.

Diese Ausgangslage ließe jedoch vergleichsweise einfach ändern. »Der deutsche Gesetzgeber müsste lediglich die schriftliche Erklärung abgeben und das deutsche Hohe See Einbringungsgesetz (HSEG) leicht anpassen. Außerdem wäre es ratsam, die Änderung des Londoner Protokolls aus dem Jahr 2009 zu ratifizieren und damit einen Beitrag zu ihrem Inkrafttreten zu leisten«, empfiehlt der Jurist.



Weil in der Nordsee seit Jahrzehnten Erdöl und Erdgas gefördert werden, ist der Meeresuntergrund von vielen Bohrlöchern durchzogen. In deutschen Gewässern sind es weniger als 100. Dennoch stellt sich Expert\*innen die Frage: Sind diese Bohrlöcher sicher verschlossen oder könnte verpresstes Kohlendioxid aus der Tiefe aufsteigen?

Foto: Ben Wicks/Unsplash.com

## **Wann ist ein CO<sub>2</sub>-Austritt aus dem Speichergestein tatsächlich eine Leckage?**

Schwieriger noch als die Gesetzes-Reformvorschläge gestaltet sich die aktuelle Forschungsfrage, an der Lennart Westmark und Alexander Proelß arbeiten. Sie wollen auf Grundlage des Völker-, Europa- und nationalen Rechts überprüfen, ob Kohlendioxid-Speicherprojekte leichter umgesetzt werden können, wenn der Gesetzgeber den Begriff der »Kohlendioxid-Leckage« enger fassen würde als bisher. »Der Schutz der Umwelt wird im internationalen Rechtsregime groß geschrieben. Deshalb sind die Auflagen an Kohlendioxid-Speicherprojekte auch so restriktiv. Einige Akteure behaupten nun, dass die strengen Auflagen CO<sub>2</sub>-Speicherprojekte unter dem Meer ausbremsen würden. Aber stimmt diese Aussage eigentlich«, fragt der Wissenschaftler.

Seine wissenschaftliche Antwort darauf steht noch aus – auch deshalb, weil er bei der Faktenrecherche tief in die technischen Details der Kohlendioxid-Verpressung einsteigen muss. Rede und Antwort stehen ihm hierbei seine Kolleg\*innen aus dem CDRmare-Verbund – allesamt Geolog\*innen, Geo-

physiker\*innen, Biolog\*innen oder Ingenieur\*innen. »Ich muss zum Beispiel wissen, wie weit das Porenwasser im Speichergestein aufsteigt, wenn wir Kohlendioxid in den Meeresuntergrund einleiten oder ab wann Naturwissenschaftler\*innen tatsächlich von einer Leckage sprechen und welche Umweltauswirkungen die Folge sein könnten. Interessant ist auch, mit welchen technischen Verfahren mögliche Austrittsstellen im Meeresuntergrund verschlossen werden könnten und ob daraus irgendwelche Risiken für die Meeresumwelt resultieren würden. Sollte es Umweltauswirkungen geben, wie gehen wir dann rechtlich damit um und welche Abhilfemaßnahmen gäbe es«, sagt Lennart Westmark.

Solche Szenarien vorausdenken, ist aus seiner Sicht unerlässlich – gerade, weil in Deutschland bislang kein CCS-Projekt umgesetzt wurde und demzufolge wichtige praktische Erfahrungen fehlen, anhand derer die Juristen Gesetzeslücken erkennen könnten. Diese Lücken aber müssen identifiziert werden, wenn die Wissenschaftler zukunftsweisende CCS-Regulierungsvorschläge entwickeln und den politisch Verantwortlichen Handlungsoptionen aufzeigen wollen.

### **Was heißt Vorsorge in Zeiten eines drastischen Klimawandels?**

Bei der Suche nach pragmatischen Lösungen für CCS in Deutschland stoßen die Rechtswissenschaftler aber auch auf übergeordnete konzeptionelle Fragen, die gesellschaftlich diskutiert werden müssen. »Eine dieser Fragen bezieht sich auf unsere Auslegung des Vorsorgeprinzips, wenn es um risikobehaftete Klimaschutzmaßnahmen wie CCS geht. Priorisieren wir in einem solchen Fall den Schutz der heutigen Umwelt und verbieten eine CO<sub>2</sub>-Speicherung, um alle denkbaren Gefahren für die Meeresumwelt zu vermeiden? Oder argumentieren wir, dass wir durch die Einlagerung des Kohlendioxids im Meeresuntergrund eine weitere Erderwärmung vermeiden und die Umwelt auf diese Weise vor noch schweren Klimafolgen schützen werden?«, fragt Lennart Westmark und fügt hinzu. »Wenn wir CCS ermöglichen wollen, müssen wir entscheiden, was uns als Gesellschaft wichtiger ist. Daher bewegt mich diese Frage der Vorsorge nicht nur in meiner Rolle als Rechtswissenschaftler, sondern auch als klimaschutzinteressierter Mensch.«

Keine Abwägung zu treffen, sei für ihn die schlechteste aller Lösungen: »Wir haben in Sachen Klimaschutz bereits so viel wertvolle Zeit verloren und müssen die Erderwärmung endlich wirksam bekämpfen. CCS ist sicherlich kein

Allheilmittel, aber es kann dazu beitragen, den Ausstoß schwer vermeidbarer Kohlendioxid-Emissionen zu verhindern. Rechtlich wäre es jederzeit umsetzbar«, sagt Lennart Westmark zum Abschluss – und zwar im Brustton der Überzeugung. In diesem Punkt stimmen sein professionelles Urteil und seine private Meinung nämlich zu 100 Prozent überein

---

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



# Fragen der Gerechtigkeit

Foto: Rita Erven/GEOMAR

## Warum ein Forschungsprogramm zur CO<sub>2</sub>-Entnahme ein Ethikteam braucht

Als Philosoph und Klimaethiker nimmt Lukas Tank eine entscheidende Rolle innerhalb der Forschungsmission CDRmare ein. Gemeinsam mit zwei Kolleg\*innen fasst er jene moralischen Überlegungen zu CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden in Worte, welche die meisten Menschen im Hinterkopf haben, jedoch nur selten aussprechen. Sich mit diesen impliziten Vorbehalten oder auch Argumenten für eine CO<sub>2</sub>-Entnahme auseinanderzusetzen, ist jedoch unerlässlich. Bestimmen sie doch maßgeblich, wie wir Methoden zur CO<sub>2</sub>-Entnahme bewerten und über mögliche Einsätze entscheiden werden.

Das Thema »Gerechtigkeit« zieht sich bislang wie ein roter Faden durch Lukas Tanks Leben. Bereits in der Oberstufe interessierten den jungen Nordfriesen Fragen wie jene nach der gerechtesten Gesellschaftsordnung. Seine Philosophie-Lehrerin befeuerte diese Neugierde. »Sie selbst kam aus der Wissenschaft und hat mich sogar zu einer philosophischen Tagung mitgenommen. Ich durfte den Philosophieunterricht der anderen Klassenstufen besuchen und hatte Spaß am Argumentieren. Das alles zusammen hat mich dazu

gebracht, Philosophie zu studieren, obwohl ich damals nicht wusste, ob ich mit dieser Ausbildung eine Anstellung finden würde«, erzählt der 34-jährige Wissenschaftler rückblickend auf seine Schulzeit in Husum.

Sein Berufswunsch ging in Erfüllung. Heute setzt sich Lukas Tank als promovierter Philosoph täglich mit Gerechtigkeitsfragen auseinander. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe »Klimaethik und globale Gerechtigkeit« an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel forscht Lukas Tank im Rahmen der Forschungsmission CDRmare zur Ethik und Gerechtigkeit meeresbasierter CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden (*englisch: Carbon Dioxide Removal, CDR*). Oder um es in seinen Worten zu sagen: Er setzt sich mit den häufig unausgesprochenen moralischen Fragen zu diesem Thema auseinander.

## **Fragen, die sich Menschen immer wieder stellen**

»Philosophie beschäftigt sich mit einer Reihe ziemlich unterschiedlicher Fragen. An einem Ende dieses Spektrums stehen angewandte Fragen, wie zum Beispiel: Was ist aus gerechtigkeits-theoretischer Sicht von einer Kohlendioxid-Entnahme als Maßnahme gegen den Klimawandel zu halten? Am anderen Ende kann es in der Philosophie aber auch um ganz abstrakte Dinge gehen wie: Was ist die Natur von Zahlen?«, erläutert der Kieler Forscher.

Für beide Seiten des Spektrums gelten dennoch zwei Grundsätze: Zum einen stellen sich Menschen diese Fragen immer wieder, wenn auch oft nur still und leise. Zum anderen sei nicht zu erkennen, wie empirische Wissenschaften auf diese Fragen antworten sollen. »Natur-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften können helfen, aber danach bleibt immer noch etwas offen, was dir kein Experiment dieser Welt sagen kann«, erklärt Lukas Tank.

## **Unausgesprochene Ideen ausformulieren und diskutieren**

Eine dieser schwer zu beantwortenden Fragen lautet: Sind CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden etwas Unnatürliches und stellen sie einen weiteren Eingriff in die Natur dar? »Viele Menschen, die über diese Methoden nachdenken, stellen sich irgendwann diese Frage und es ist eine der Tugenden der Philosophie, sich solche oft schwer zu artikulierenden Gedanken anzuschauen, sie möglichst klar auszuformulieren und dann kritisch zu hinterfragen. Findet man Argumente, die diese Ideen stützen oder dagegensprechen? Und welche Argumente überzeugen am meisten?«, erläutert Lukas Tank.

Klar und deutlich sagen, was anderen durch den Kopf geht. Ethiker\*innen wie Lukas Tank – hier an der Kieler Förde fotografiert – setzen sich oftmals mit Fragen des Menschen auseinander, auf welche empirische Wissenschaften keine umfänglichen Antworten geben können.

Foto: Rita Erven/CDRmare



Für ihn liegt genau in dieser kritischen Auseinandersetzung der Beitrag, den Ethiker\*innen zur öffentlichen Debatte leisten können. »Ich denke nicht, dass wir uns Fragen stellen, die sich kein anderer Mensch stellt. Ich glaube vielmehr, dass diese moralische Dimension etwas ist, was im Denken vieler Menschen andauernd eine Rolle spielt. In Forschungsprojekten wie CDRmare ist es dann unsere Aufgabe, diesen impliziten Teil transparent und damit diskussionsfähig zu machen. Dieses Explizit-Machen ist ein erheblicher Teil des philosophischen Arbeitens«, sagt Lukas Tank.

## Fasziniert von der Klarheit des Denkens

Seit dem Studium fasziniert ihn an der Klima- und Umweltethik vor allem die Klarheit des Denkens, welche die philosophische Arbeit verlangt. »Ich bilde gemeinsam mit meinen Kollegen Christian Baatz und Lieske Voget-Kleschin das Ethikteam in CDRmare und ich kann für uns drei sprechen, wenn ich sage, dass wir keine Anhänger einer bestimmten Theorie sind und uns Fragestellungen eben nicht nur aus genau einer ethischen Perspektive anschauen. Stattdessen versuchen wir zumindest in CDRmare, jene moralischen Ideen als Ausgangspunkt und Grundlage unseres Denkens zu nehmen, die von verschiedenen Denktraditionen geteilt werden«, sagt Lukas Tank.

Weitgehender Konsens in der Klimaethik sei zum Beispiel, dass die Begrenzung des Klimawandels von immenser Bedeutung sei. »Sie ist eine der zentralen moralischen Prioritäten unseres Jahrhunderts. Das, was auf dem Spiel steht, wenn der Klimawandel ungebremst voranschreitet, ist kaum überzubewerten – die Zahl der Menschenleben, die Auswirkungen auf die Natur ...«, sagt der Wissenschaftler noch, bevor er kurz innehält und gedankenverloren den Kopf schüttelt.



Seit Beginn der CDRmare-Forschungsmission nutzen Lukas Tank (rechts) und sein Kollege Christian Baatz (mitte) jede Gelegenheit, die klimaethischen Aspekte einer gezielten CO<sub>2</sub>-Entnahme mit ihren Kolleg\*innen aus den Natur-, Sozial-, Rechts- und Wirtschaftswissenschaften zu diskutieren. Hier besprechen sie sich mit Ethikerin Antonia Holland-Cunz aus der Partnermission CDRterra. Diese Aufnahmen entstanden noch zu Corona-Zeiten bei einem Workshop des CDRmare-Verbundprojektes ASMASYS. Fotos: ASMASYS-Team

Breit geteilt werden außerdem Ideen wie das Verursacherprinzip und das Ability-to-pay-Prinzip. »Das Verursacherprinzip besagt im Hinblick auf den Klimawandel, dass im Kampf gegen die globale Erwärmung jene Akteure die größten Lasten tragen sollten, die seit Bekanntwerden des Problems besonders viel dazu beigetragen haben. Das Ability-to-pay-Prinzip hingegen postuliert, dass eher jene Akteure die Lasten schultern sollten, die finanziell auch am ehesten dazu in der Lage sind. Diese beiden Prinzipien fallen häufig zusammen und begründen, worauf sich zumeist alle Beteiligten einigen können«, erklärt Lukas Tank.

Wer die Kosten oder Lasten des Klimawandels tragen sollte, wird unter anderem im Rahmen der Debatte über Klimagerechtigkeit (englisch: Climate Justice) weltweit diskutiert.

Foto: Markus Spiske/Unsplash.com



## Gedankenexperimente und Plausibilitätstests

Auf die Konsensfindung folgt philosophisch-wissenschaftliche Denkarbeit gespickt mit vielen kollegialen Streitgesprächen. Lukas Tank: »Es gibt innerhalb der Philosophie eine große Methodenvielfalt. Ich fühle mich der Schule der analytischen Philosophie zugehörig. Sie ähnelt in ihrer Vorgehensweise den empirischen Wissenschaften insofern, als dass wir Hypothesen aufstellen und diese dann mit Argumenten testen. Wir machen Experimente in Form von Gedankenexperimenten, bei denen wir versuchen, bestimmte Prinzipien in möglichst vereinfachten Szenarien zu prüfen. Und was in den Naturwissenschaften die Daten sind, sind bei uns möglichst wohl geprüfte moralische Intuitionen, an denen dann die Plausibilität bestimmter Prinzipien gemessen wird.«

Bei der Frage nach der Natürlichkeit von CDR-Einsätzen hat ihn diese Arbeit bereits ein ganzes Stück vorangebracht. »Wir glauben aktuell, dass es kein überzeugendes Argument gibt, die gezielte Kohlendioxid-Entnahme als Ganzes abzulehnen, weil sie unnatürlich oder gegen die Natur ist. Wenn wir jedoch zwischen verschiedenen CDR-Methoden entscheiden müssen, macht das Ausmaß des jeweiligen Eingriffes in die Natur aber durchaus einen Unterschied, auch aus moralischer Sicht«, sagt Lukas Tank.

## Ein neues Grundgerüst für die Bewertung von CDR-Methoden und -Projekten

Solche klima- und umweltethischen Fragen standen auch im Raum, als das interdisziplinäre Team des CDRmare-Verbundprojektes ASMASYS vor zweieinhalb Jahren begann, über einen neuen Bewertungsleitfaden für meeres-



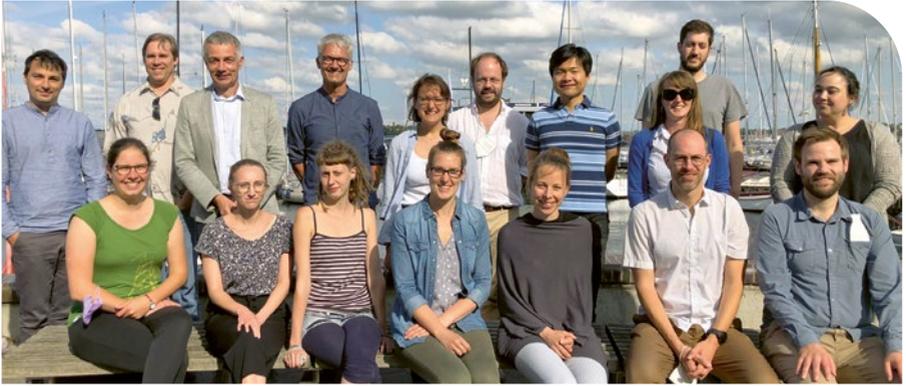
Eines der bekanntesten philosophischen Gedankenexperimente ist das sogenannte »Trolley-Problem«, im Deutschen auch Weichenstellerfall genannt. Darin heißt es, dass eine Straßenbahn außer Kontrolle geraten ist und droht, fünf Personen zu überrollen. Durch das Umstellen einer Weiche kann die Straßenbahn auf ein anderes Gleis umgeleitet werden. Unglücklicherweise befindet sich dort eine weitere Person. Die Frage lautete nun: Darf durch Umlegen der Weiche der Tod einer Person in Kauf genommen werden, um das Leben von fünf Personen zu retten?

Grafik: Rita Erven/CDRmare

basierte CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden nachzudenken. Das Ziel lautete, einen Kriterienkatalog zu entwickeln, mit dessen Hilfe Expert\*innen und Entscheidungstragende geplante CDR-Projekte umfassend bewerten können.

»Uns Ethikern fiel dabei zunächst die Rolle zu, die wichtigsten Metafragen zu stellen – also: Was wollen wir mit einem solchen Bewertungsleitfaden? Welchen Mehrwert soll er bringen und welche Inhalte brauchen wir, um dieses Ziel auch zu erreichen«, erzählt Lukas Tank und fügt dann schmunzelnd hinzu: »Keine dieser Fragen ist jetzt ausgesprochen philosophisch, aber aus irgendeinem Grund scheinen wir Philosoph\*innen geeignet zu sein, solche Metafragen zu stellen und zu bearbeiten – vielleicht weil wir es gewohnt sind, einen Schritt zurückzutreten und Fragen nach dem großen Ganzen zu stellen.«

Im Anschluss folgte eine ausführliche Literatur-Recherche zu philosophischen Veröffentlichungen, die sich mit der CO<sub>2</sub>-Entnahme beschäftigen. Die Trefferliste blieb überschaubar, sodass Lukas Tank und seine Kolleg\*innen im nächsten Schritt allgemeine Literatur aus der Klimaethik heranzogen, um zu untersuchen, welche Gerechtigkeitsgrundsätze in der Diskussion um CDR-Methoden angewendet werden können. Im letzten Schritt überprüften sie Literatur zu allgemeinen Gerechtigkeits- und Moraltheorien und analysierten



Die Arbeit an dem neuen CDRmare-Bewertungsleitfaden für CO<sub>2</sub>-Entnahmeprojekte begann mit Literaturrecherchen und einer Reihe gemeinsamer Workshops, in denen das interdisziplinäre Forscherteam Kernkonzepte und Ideen diskutierte.

Fotos: ASMASYS-Team

bereits existierende CDR-Bewertungsschemata. »Wir wollten wissen, welches Material es bereits gibt, inwiefern die uns wichtigen Perspektiven darin schon repräsentiert waren und was fehlte. Die ganze philosophische Arbeit diente dazu, bestimmte Dinge besser zu machen. Und ich denke, wir sind fündig geworden«, erzählt Lukas Tank.

## **Die klare Unterscheidung zwischen machbar und wünschenswert**

Dem ASMASYS-Team ist es gelungen, einen Bewertungsleitfaden zu entwickeln, der nicht nur fragt, ob bestimmte CDR-Methoden oder -Projekte technisch, politisch und rechtlich machbar sind, sondern auch, ob ihr Einsatz und alle damit verbundenen Auswirkungen für Mensch und Natur wünschenswert sind.

»In philosophischen Kreisen ist diese Unterscheidung ganz selbstverständlich. Nicht alles, was machbar ist, ist auch wünschenswert und umgekehrt. Aber in den existierenden wissenschaftlichen Bewertungsschemata hatten sich beide Fragen auf wenig hilfreiche Art und Weise vermischt. Wir haben deshalb eine neue Lösung erarbeitet – mit einer Liste von Bewertungskriterien, die klar zwischen beiden Dimensionen unterscheidet und dennoch alle wichtigen Belange abdeckt.«



Diese Grafik zeigt den Aufbau des neuen ASMASYS-Bewertungsrahmens für CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden und -projekte. Klar zu erkennen ist die Unterteilung in Fragen und Kriterien zur Machbarkeit (Feasibility) sowie zur Erwünschtheit (Desirability).

Grafik: ASMASYS-Team & Rita Erven/GEOMAR

## Das wichtigste moralische Argument in der Debatte um eine Kohlendioxid-Entnahme

In die Details und praktische Anwendung dieses Bewertungsleitfadens einzusteigen, würde mehrere Stunden in Anspruch nehmen, insbesondere weil darin so gut wie alle Forschungsergebnisse der CDRmare-Verbundprojekte zusammenlaufen – die Resultate aus der Klimaethik ebenso wie jene aus den Natur-, Sozial-, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften. Lukas Tank lenkt das Gespräch daher lieber auf das wichtigste Argument in der öffentlichen Debatte um eine gezielte Kohlendioxidentnahme.



Allen, die tiefer in die Arbeit der Klimaethiker eintauchen wollen, empfehlen wir den frei verfügbaren Beitrag »Neun Thesen zur Ethik von Climate Engineering«, den Lukas Tank, Christian Baatz und Friederike Neuber für das Buch »Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung?« geschrieben haben. Interessierte können es hier kostenlos herunterladen: <https://www.fdr.uni-hamburg.de/record/12868>

Grafik: Rita Erven/GEOMAR

»In der moralphilosophischen Diskussion zu CDR spielt kein Argument auch nur ansatzweise eine so große Rolle wie die antizipierte Gefahr, dass die technische Machbarkeit und der Einsatz von CDR-Maßnahmen uns dazu verleiten könnten, eine andere Pflicht im Hinblick auf das Klima schleifen zu lassen, nämlich die Pflicht, unsere Treibhausgasemissionen drastisch und umfassend zu reduzieren«, sagt der Klimaethiker.

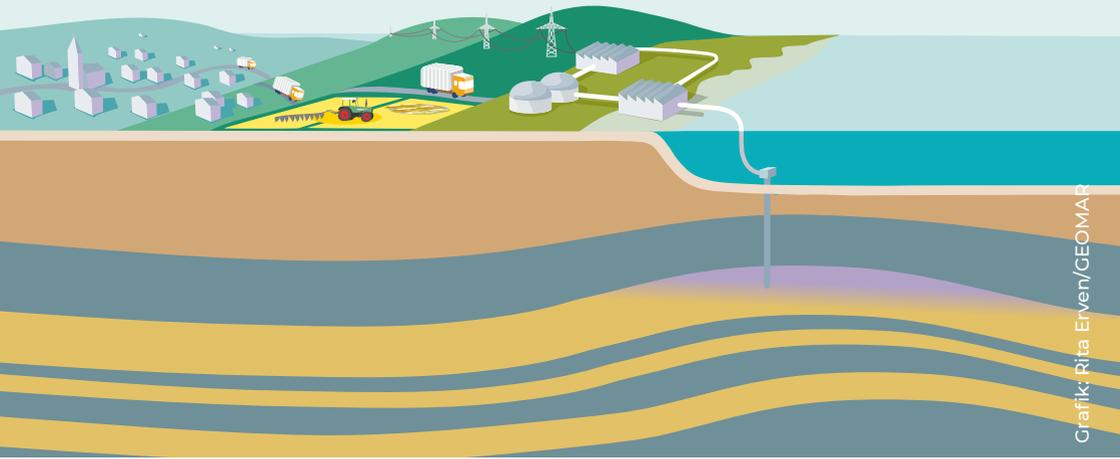
Entscheidend in der gesellschaftlichen Debatte sei deshalb am Ende nicht nur, welche möglichen Nebenfolgen eine CDR-Methode mit sich brächte oder wie teuer sie wäre, sondern was das Wissen über diese Methode in den Köpfen der Menschen bewirke. »Alle Leute, die ernsthaft über CDR-Ansätze nachdenken, reden von der Möglichkeit, den kleinen Rest schwer vermeidbarer Emissionen auszugleichen. Das allein wird schon eine riesige Herausforderung. In der politischen Kommunikation jedoch gibt es auch immer wieder Hinweise darauf, dass CDR als eine nicht überzeugende Entschuldigung genutzt wird, um unsere Emissionsreduktionspflichten in den Hintergrund zu stellen«, resümiert der Wissenschaftler.

Dagegen anzugehen, mitzureden und zu überzeugen, sei Aufgabe und Pflicht aller Menschen – egal, ob sie jemals etwas mit Philosophie zu tun hatten oder nicht.

---

**Alle beschriebenen Forschungsarbeiten wurden im CDRmare-Forschungsverbund »ASMASYS – Bewertungsrahmen für marine CO<sub>2</sub>-Entnahme und Synthese des aktuellen Wissenstandes« durchgeführt.**

# Das 10 Millionen-Tonnen-Ziel



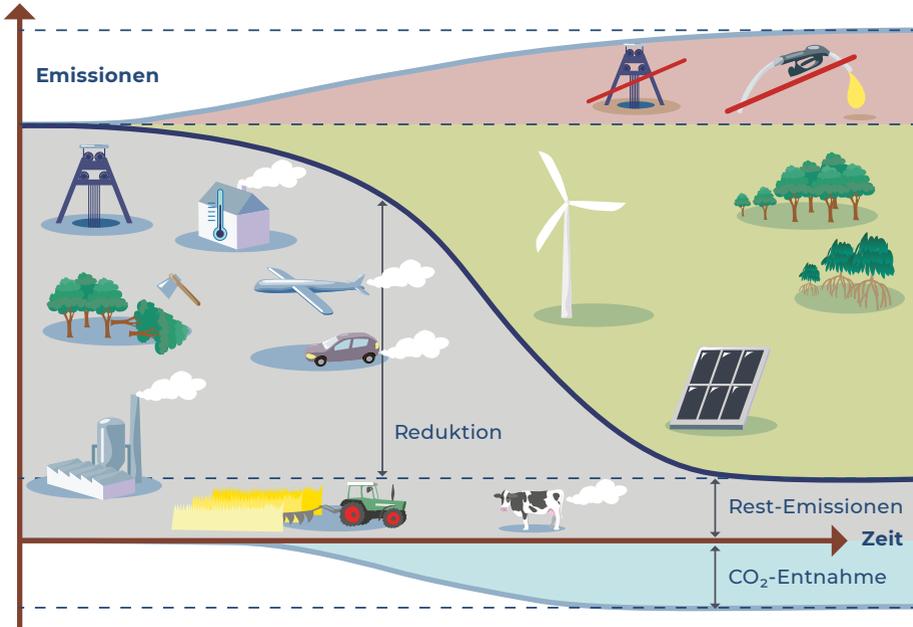
## Im Team schaffen, was allein nicht zu leisten ist

Als Biogeochemiker Wanxuan Yao vor einer schier unlösbaren Aufgabe steht, gibt er nicht auf, sondern zieht Nachwuchswissenschaftler\*innen aus allen Teilen der Forschungsmission CDRmare zu Rate. Gemeinsam gelingt, was allein unmöglich schien – eine erste Konzeption mariner Klimalösungen, mit denen Deutschland der Atmosphäre pro Jahr 10 Millionen Tonnen Kohlendioxid entnehmen könnte.

Ich schaffe es nicht allein. Diesen Satz laut auszusprechen, fällt Wanxuan Yao heute noch schwer. Klingt er doch wie eine Niederlage, die niemand gern eingesteht, erst recht nicht im wettbewerbsgetriebenen Wissenschaftsbetrieb. Für den 36-jährigen Biogeochemiker vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel markierte das frustrierende Selbsteingeständnis an einem Tag im Mai 2022 jedoch den Anfang zur Lösung seines Forschungsproblems.

Wanxuan Yao, der sich von allen »Ben« nennen lässt, gehört der Forschungsmission CDRmare an. In ihr untersuchen Wissenschaftler\*innen verschiedene

## Wie erreichen wir Netto-Null Emissionen?



Um bis zum Jahr 2045 das Ziel der Treibhausgas-Neutralität zu erreichen, wird Deutschland der Atmosphäre vermutlich mindestens 30 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr entnehmen müssen, wahrscheinlich aber auch 60 Millionen Tonnen oder mehr. Die Frage, mit welchen konkreten marinen Projekten ein entscheidender Teil dieser Entnahme gelingen könnte, stellten Nadine Mengis, Wanxuan Yao und Teresa Morganti in den Mittelpunkt des von ihnen organisierten CDRmare-Workshops. Grafik: Rita Erven nach Nadine Mengis/GEOMAR

Verfahren zur marinen Kohlendioxid-Entnahme sowohl auf ihre technische Machbarkeit als auch auf ihre Vereinbarkeit mit den globalen Umweltschutz- und Entwicklungszielen und bewerten diese. Wanxuan Yaos Aufgabe lautet, herauszufinden, mit welchen konkreten Projekten die Bundesrepublik Deutschland ihr Klimaziel der Treibhausgas-Neutralität im Jahr 2045 erreichen könnte, indem sie mögliche schwer vermeidbare Rest-Emissionen auch durch marine Kohlendioxid-Entnahmeverfahren kompensiert.

Nimmt Deutschland sein Klimaziel ernst, wird die Bundesrepublik aktuellen Berechnungen zufolge der Atmosphäre im Jahr 2050 mindestens 30 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr entnehmen müssen, wahrscheinlich aber auch 60 Millionen Tonnen oder mehr – je nachdem, wie erfolgreich Emissionen bis dahin vermieden werden. Die schiere Menge dieser Rest-Emissionen und die



Nadine Mengis, Ben Wanxuan Yao und Teresa Morganti sind die Initiatoren des Workshops zur »10-Millionen-Tonnen-Entnahme-Challenge« Foto: Chris Schelten/GEOMAR

Vielzahl der theoretisch denkbaren Herangehensweisen aber lassen Lösungssuchende wie Wanxuan Yao und seine CDRmare-Kollegin Teresa Morganti vom Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde schon jetzt nicht mehr ruhig schlafen.

### **Perspektivwechsel: Eine völlig neue Art zu denken**

»Ganz konkrete Einsatzszenarien für marine Kohlendioxid-Entnahme zu entwickeln ist schwierig, weil es uns Forschende zwingt, die Perspektive zu wechseln«, erklärt Teresa Morganti. »Im wissenschaftlichen Alltag untersuchen die meisten von uns kleine Detailfragen einer bestimmten Kohlendioxid-Entnahmemethode – etwa wie viel Kohlenstoff die Mangroven an der Küste Kolumbiens jährlich im Untergrund einlagern oder wie schnell sich silikathaltiges Gesteinsmehl in der Ostseebrandung löst. Geht es aber um die Frage, wie entnehmen wir der Atmosphäre eine bestimmte Kohlendioxidmenge, muss man die vielen Details zu einem Gesamtbild zusammenfügen und die großen Zusammenhänge analysieren«, so die 38-jährige Biogeochemikerin und Ökophysiologin.

Weil das Wissen eines Einzelnen dafür nicht ausreicht, entschieden sich Wanxuan Yao, Teresa Morganti und CDR-Expertin Nadine Mengis, interessierte Nachwuchswissenschaftler\*innen aus allen sechs Verbänden der CDRmare-Forschungsmission einzuladen und drei Tage lang an einem Ort gemeinsam über konkrete Lösungen zu beraten. Die Kernfrage des Workshops lautete:



30 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen aus allen Verbänden der Forschungsmission CDRmare folgten der Einladung zur »10-Millionen-Tonnen-Challenge«, wie Wanxuan Yao und Teresa Morganti den Workshop nannten. Foto: CDRmare

Mit welchen marinen Methoden könnte es der Bundesrepublik Deutschland künftig gelingen, der Atmosphäre 10 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr zu entnehmen? Der Kreativität waren dabei im ersten Schritt keine Grenzen gesetzt: Weder existierende rechtliche noch politische oder infrastrukturelle Hürden sollten die Überlegungen der Teilnehmenden in dieser Phase einschränken. Umsetzungshindernisse und Risiken würden später analysiert.

»Mit einer Entnahme von 10 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr würde Deutschland seinem Ziel der Treibhausgas-Neutralität einen entscheidenden Schritt näher kommen. Diese Relevanz der Aufgabenstellung war uns wichtig, um allen Teilnehmenden zu vermitteln: Seht her, mit eurer Arbeit könnt ihr am Ende den entscheidenden Unterschied machen«, sagt Wanxuan Yao.

### **Kreativ im Rahmen des wissenschaftlich Möglichen**

30 CDRmare-Wissenschaftler\*innen folgten der Einladung in ein Tagungshaus in der Nähe von Verden an der Aller, Niedersachsen. Auf der Gästeliste standen zudem Experten für Bioenergiegewinnung mit anschließender Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) sowie Juristen, die zum gesetzlichen Rahmen gezielter Kohlendioxid-Entnahme im deutschen Kontext forschen. Deren Impuls-Vorträge sollten die Workshop-Teilnehmenden inspirieren, über die Fach- und Meeressgrenzen hinauszudenken. Erfahrene Mentoren wie GEOMAR-Forschungsgruppenleiterin Nadine Mengis leisteten



Nadine Mengis stimmte die Teilnehmenden auf die Herausforderung ein und stand den einzelnen Projektteams als Ansprechpartnerin für methodische Fragen zur Verfügung.  
Foto: CDRmare

Hilfestellung in Sachen Kontext, Denkanstöße und Diskussionen. Wanxuan Yao und Teresa Morganti bereiteten Datenbanken und Literatur-Quellen vor. Die Aufgabenstellung schrieb nämlich vor, dass die technische Machbarkeit aller vorgeschlagenen Lösungsansätze mit wissenschaftlichen Studien und Zahlen belegt werden mussten. Außerdem sollten die Teilnehmenden alle erforderlichen Voraussetzungen klar beschreiben und die Ergebnisse am Ende vergleichbar sein. Das heißt, Kohlendioxid-Budget-Kalkulationen mussten auf Grundlage standardisierter Einheiten und Parameter durchgeführt werden.

»Zugegeben, am ersten Tag waren die meisten unserer Kolleg\*innen von der Aufgabenstellung und der Fülle an Informationen überwältigt. Über die konkrete Umsetzung von Methoden nachzudenken, deren naturwissenschaftliche, rechtliche und sozioökonomische Grundlagen zeitgleich erst noch erforscht werden, stellt schon eine besondere Herausforderung dar und war in dieser Form für die meisten neu«, erzählt Wanxuan Yao. »Bis zu diesem Zeitpunkt hatten auch die wenigsten der teilnehmenden Wissenschaftler\*innen darüber nachgedacht, welche logistischen und infrastrukturellen Voraussetzungen für bestimmte Entnahmemethoden geschaffen werden müssen. Als die Teilnehmenden dann aber begannen, zehn disziplinenübergreifende Teams zu bilden und in kleinen Gruppen an konkreten Ideen zu arbeiten, entwickelte der Workshop eine hoffnungsvoll stimmende Dynamik«, ergänzt Teresa Morganti.

## Lösungsansätze im Detail

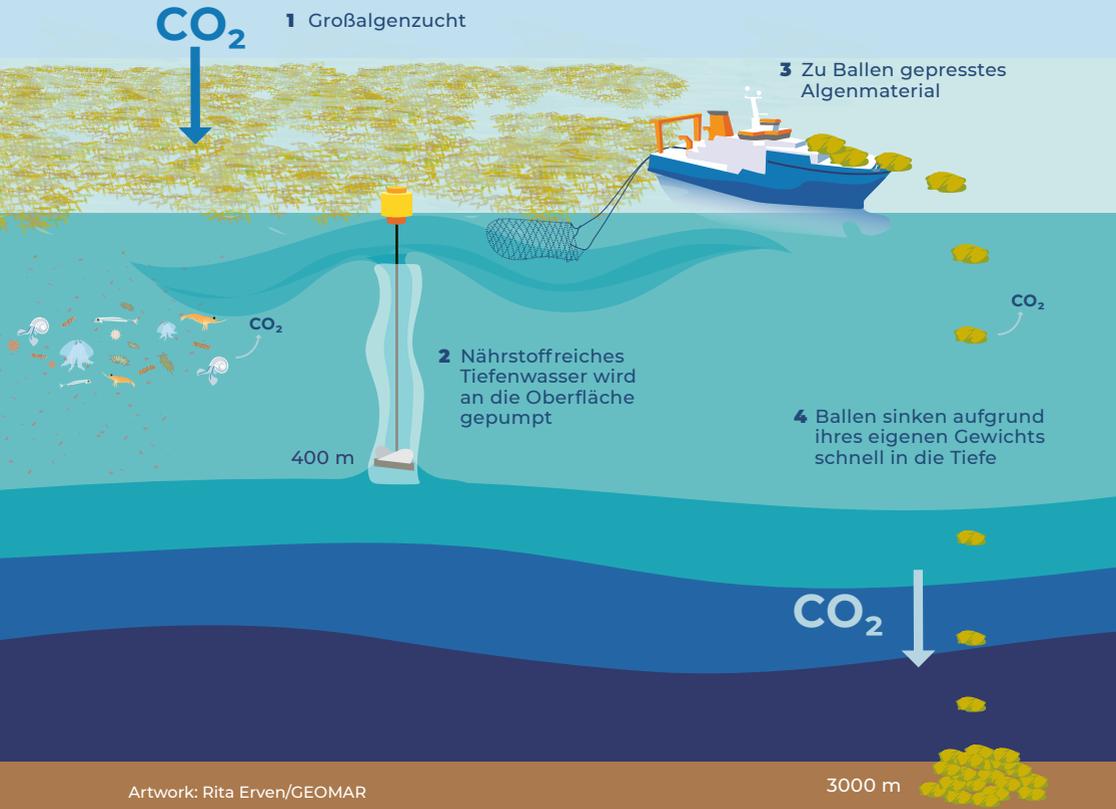
13 detaillierte Lösungsvorschläge präsentierten die Teams nach zwei Tagen intensiver Arbeit. Mit sechs von ihnen könnte es Deutschland nach Stand des aktuellen Wissens gelingen, der Atmosphäre jährlich mindestens 10 Millionen Tonnen Kohlendioxid zu entnehmen und im Ozean einzulagern – sei es im Meeresboden der Küstengewässer, in den Wassermassen der Tiefsee oder aber in geologischen Gesteinsformation tief unter dem Meer. Allerdings ließen sich nur zwei der Ansätze allein auf deutschem Territorium umsetzen. Für die restlichen vier müssten zusätzlich internationale Gewässer oder aber Küstenregionen anderer Staaten in Anspruch genommen werden. »Diese Erkenntnis verdeutlicht, wie entscheidend die Höhe der angestrebten Kohlendioxid-Entnahme in der Debatte ist«, sagt Wanxuan Yao. »Es geht nicht mehr allein um die Frage, funktioniert eine Entnahme-Methoden oder nicht, sondern auch darum, in welchem Größenmaßstab sie umgesetzt werden müsste, um die erhoffte Wirkung zu erzielen.«

## Ideenwettbewerb: Diese drei Vorschläge haben gewonnen

### Großalgenzucht im Südatlantik

Großalgen wie Sargassum wachsen schnell und produzieren viel Biomasse, deren Kohlenstoff sich für lange Zeit in der Tiefsee einlagern ließe, wenn es gelänge, das Pflanzenmaterial schnell in Wassertiefen von mehr als 3000 Metern zu versenken. Um der Atmosphäre jährlich 10 Millionen Tonnen Kohlendioxid zu entnehmen, müsste Deutschland Großalgenfarmen im südlichen Atlantischen Ozean betreiben, deren Gesamt-Anbaufläche etwa 1,5 mal so groß wäre wie das Stadtgebiet Berlins. Farmen in dieser Größenordnung könnten täglich 0,16 Millionen Tonnen neues Algenmaterial produzieren, welches anschließend versenkt werden müsste. Dazu würde das Pflanzenmaterial geerntet und in Ballen gepresst. Diese Algenballen wären den Überlegungen zufolge schwer genug, um innerhalb kurzer Zeit in große Tiefe zu sinken, sodass Mikroorganismen keine Zeit bliebe, das Pflanzenmaterial in der oberen oder mittleren Wassersäule zu zersetzen. Machbar wäre dieser Lösungsansatz allerdings nur, wenn parallel stetig nährstoffreiches Tiefenwasser aus einer Tiefe von 400 Metern an die Meeresoberfläche gepumpt würde. Andernfalls stünden im Südatlantik nicht genügend Nährstoffe für die Großalgenzucht zur Verfügung.

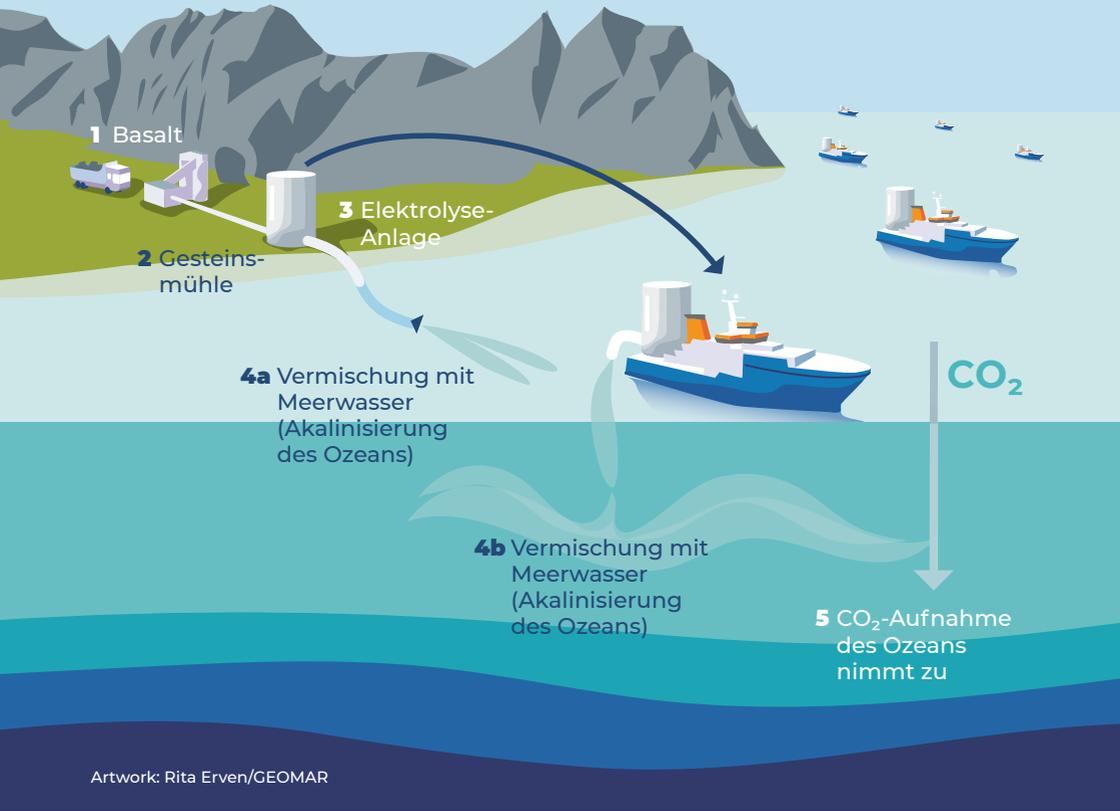
## Großalgenzucht im Südatlantik



## Alkalinitäts­erhöhung des Nordseewassers durch Elektrolyse

Für diesen Lösungsansatz müsste Basaltgestein in Steinbrüchen abgebaut und zu Gesteinsmehl gemahlen werden. Dieses Pulver würde anschließend in einer Elektrolyse-Anlage mit Meerwasser vermischt, sodass eine alkalische Lösung entstände, die anschließend von Schiffen auf der Nordsee verteilt würde. Als Folge würde sich die Chemie des Oberflächenwassers so verändern, dass es zusätzliche 10 Millionen Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen könnte. Der erforderliche Energie- und Materialaufwand wäre jedoch enorm: Benötigt würden rund 30 Millionen Tonnen Basalt – diese Menge entspräche 94 Prozent des aktuellen Basaltabbaus in Deutschland. Für die Elektrolyse würden 19 Terrawattstunden Elektrizität aus Wind- oder Sonnenkraft gebraucht. Diese Strommenge entspricht 8 Prozent der aktuel-

## Alkalinitätserhöhung des Nordseewassers durch Elektrolyse

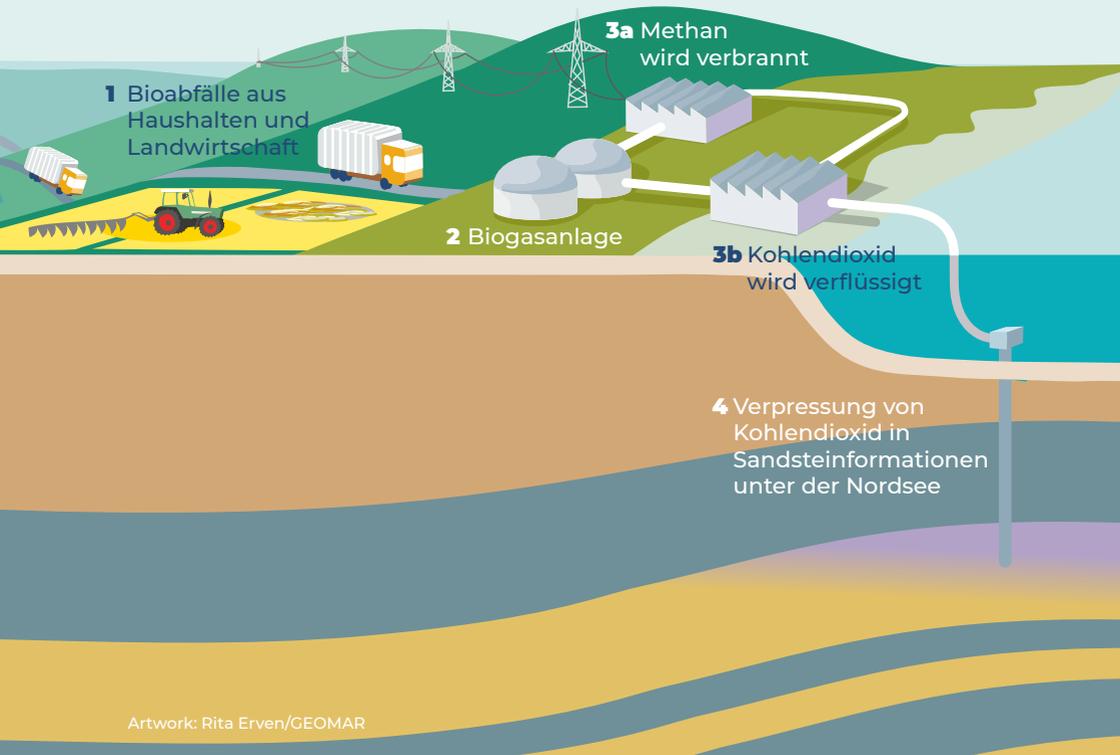


len Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen in Deutschland. Als positiver Nebeneffekt würde bei der Elektrolyse allerdings auch Wasserstoff im Wert von 10 Terrawattstunden generiert, welcher dann zum Beispiel in der Industrie genutzt werden könnte.

## Energie- und Warmegewinnung aus Bioabfällen mit anschließender Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der Nordsee

Für die geforderte Kohlendioxid-Entnahme von 10 Millionen Tonnen pro Jahr müssten ersten Schätzungen zufolge nahezu alle Grünabfälle aus der Landwirtschaft sowie die Bioabfälle der Haushalte in Deutschland einge-

## Energie- und Wärmegewinnung aus Bioabfällen mit anschließender Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund der Nordsee



sammelt werden. Zusammen ergäbe das in etwa 10 bis 19 Millionen Tonnen Biomasse (Trockengewicht) pro Jahr – vorausgesetzt, die Bioabfälle werden nicht für andere Zwecke verwendet. Das eingesammelte organische Material würde anschließend in mehr als 3000 Biogasanlagen abgebaut und in Biogas umgewandelt, eine Mischung aus Methan und Kohlendioxid. Beide Bestandteile müssten im Folgeschritt getrennt werden. Das Kohlendioxid würde zwischengelagert, das Methan wiederum vor Ort verbrannt werden, um Strom und Wärme bereitzustellen. Das im Verbrennungsgas enthaltene Kohlendioxid könnte ebenfalls abgeschieden werden. Alles Kohlendioxid würde nun verflüssigt und zu guter Letzt in Sandsteinformationen unter der Nordsee verpresst werden. Das heißt, es würde im tiefen Untergrund des Meeres gespeichert. Weil Deutschland die unterseeische Einlagerung und

Speicherung von abgeschiedenem Kohlendioxid bislang nicht erlaubt, wäre für eine Umsetzung dieses Lösungsansatzes eine Zusammenarbeit mit Norwegen oder Großbritannien erforderlich.

»Die Idee, Bioabfälle für die Kohlendioxidentnahme zu nutzen, hat mich wirklich überrascht, weil ich als Meeresforscher vor unserem Workshop nicht im Ansatz über diese Möglichkeit nachgedacht habe. Aber natürlich bewegen wir uns in den Meeresgebieten, sobald wir davon sprechen, Kohlendioxid im geologischen Untergrund der Nordsee zu speichern«, erzählt Wanxuan Yao. »Das Beispiel zeigt auch, welche kreativen Lösungen erdacht werden, wenn Fachleute aus ganz unterschiedlichen Disziplinen zusammenkommen, um Fragestellungen gemeinsam anzugehen.«

### **Konkrete Entnahme-Vorschläge für Deutschland**

Er und Teresa Morganti werden die Workshop-Ergebnisse in den kommenden Wochen zusammenführen und auswerten. Parallel dazu bereiten sie einen zweiten Workshop für das Frühjahr 2023 vor. In diesem wollen die CDRmare-Wissenschaftler\*innen gemeinsam die Veröffentlichung ihrer Ergebnisse vorbereiten. Im nächsten Schritt untersuchen die Forschende, welche Risiken und zusätzlichen Vorteile die vorgeschlagenen Projekte mit sich bringen; welche rechtlichen, institutionellen und politisch-gesellschaftlichen Hürden den jeweiligen Lösungsvorschlägen im nationalen Kontext bislang noch im Weg stehen; wie sich diese Hindernisse eventuell beseitigen ließe und inwiefern sich ein neuer, im Rahmen von CDRmare entwickelter Bewertungsleitfaden für marine Kohlendioxid-Entnahmemethoden auf die Lösungsvorschläge anwenden ließe.

Am Ende wollen sie die vielversprechendsten Lösungen in einem Portfolio zusammenstellen, welches Teil des CDRmare-Projektberichtes wird. Die Teilnehmenden werden gemeinsam also genau jene Fragestellung klären, die Wanxuan Yao im Mai 2022 noch hat ver zweifeln lassen. Mit einem Lächeln sagt er heute: »Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in CDRmare sind eine ehrgeizige Bande. Gib ihnen ein Rätsel und sie werden alles in ihrer Macht stehende tun, dieses auch zu lösen.«



# Ergänzende Begriffserklärungen

**Alkalinitätserhöhung:** Die marine Alkalinitätserhöhung (Ocean Alkalinity Enhancement, OAE) bezeichnet Maßnahmen, die darauf abzielen, die Alkalinität des Meerwassers zu steigern. Alkalinität ist ein Maß für die Fähigkeit des Wassers, Säuren zu neutralisieren und spielt eine entscheidende Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Durch die Erhöhung der Alkalinität kann der Ozean mehr Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus der Atmosphäre aufnehmen und speichern, wodurch der Klimawandel abgemildert werden kann. Methoden der Alkalinitätserhöhung sind 1.) die Zugabe alkalischer Mineralien: Durch das Einbringen von Stoffen wie gemahlenem Kalkstein oder anderen alkalischen Materialien wird die Alkalinität des Meerwassers erhöht. Dies fördert die Umwandlung von gelöstem  $\text{CO}_2$  in Bikarbonat- und Karbonationen; und 2.) elektrochemische Verfahren: Techniken wie die Elektrolyse können eingesetzt werden, um die chemische Zusammensetzung des Meerwassers zu verändern und so die Alkalinität zu erhöhen.

**Biologische Kohlenstoffpumpe:** Als organisch-biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres werden jene Prozessketten bezeichnet, bei denen Algen und Cyanobakterien Kohlendioxid aus dem lichtdurchfluteten Oberflächenwasser aufnehmen, mittels Photosynthese in Biomasse umwandeln und als organischen Kohlenstoff in die Tiefe transportieren. Ein Teil der kohlenstoffhaltigen Biomasse wird von Ruderfußkrebse und anderen Organismen konsumiert und tritt somit in das oberflächennahe Nahrungsnetz ein. Der Rest sinkt langsam ab oder wird ebenso wie Ausscheidungen der Tiere durch Strömungen oder Vermischungsprozesse in die Tiefe transportiert und dort als Folge bakterieller Zersetzungsprozesse wieder als Kohlendioxid freigesetzt. Mit der Ozeanzirkulation wird dieses Kohlendioxid irgendwann wieder an die

Meeresoberfläche gelangen und damit in Kontakt mit der Atmosphäre kommen. Entscheidend für die Dauer der Kohlenstoffspeicherung in der Tiefe ist, wie viel der Biomasse in Wasserschichten unterhalb der von Wind und Wellen durchmischten Deckschicht sinkt. Im Zwischen- und Tiefenwasser sind sowohl das organische Material als auch der in ihm enthaltene Kohlenstoff für Jahrzehnte bis Jahrhunderte eingelagert und somit von einem Kontakt mit der Atmosphäre ausgeschlossen. Bestenfalls erreichen die herabsinkenden Tier- und Algenreste den Meeresboden, werden dort in die obere Sedimentschicht eingelagert und in Teilen für Abermillionen Jahre konserviert.

*Siehe: Factsheet »Kohlenstoffspeicher Ozean: So nimmt das Meer Kohlendioxid auf ([www.cdrmare.de/factsheets](http://www.cdrmare.de/factsheets))*

Die **CO<sub>2</sub>-Entnahme (engl. Carbon Dioxide Removal, CDR)** umfasst verschiedene terrestrische und marine Methoden, um Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aktiv aus der Atmosphäre zu entfernen und es langfristig zu speichern. CO<sub>2</sub>-Entnahmemassnahmen sind zum Beispiel Aufforstung, Seegras- oder Salzmarschenausweitung, Biochar, Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BECCS), Direct Air Capture oder Alkalinitätserhöhung (OAE). Diese Maßnahmen sind neben der Reduzierung von Treibhausgasemissionen entscheidend, um Klimaziele wie das Netto-Null-Ziel zur Begrenzung der globalen Erwärmung zu erreichen.

**Klima- und Umweltethik:** Philosophische Ethik befasst sich wissenschaftlich mit den Voraussetzungen und der Bewertung menschlichen Handelns. Klima- und Umweltethik reflektieren als Teile der angewandten Ethik, was moralisches richtiges bzw. falsches Handeln bezüglich Umwelt und Klima bedeutet. Es geht sowohl um Grundsatzfragen (zum Beispiel: Sollten wir Natur nur um des Menschen willen oder auch um ihrer selbst willen schützen?) als auch um konkrete Anwendungsfragen (zum Beispiel: Wie sieht eine gerechte Bepreisung von CO<sub>2</sub> aus?).

**Großalgen (Makroalgen)** sind vielzellige, im Meer lebende Algen, die aufgrund ihrer Größe mit bloßem Auge sichtbar sind. Zu ihnen zählen z.B. Blausentang und Kelp, darunter auch viele essbare Arten, die z.B. in der asiatischen Küche genutzt werden. Die Mehrheit der Arten benötigt Fels oder

andere Substrate zum Wachsen und ist somit an Küsten gebunden, während einige wenige wie z. B. Sargassum frei treibend im Ozean leben. Makroalgen bilden bedeutende Ökosysteme, welche u. a. wichtig für die Primärproduktion und Kohlenstoffbindung sind. Makroalgen nehmen genauso wie Pflanzen, einzellige Algen und Cyanobakterien durch Photosynthese  $\text{CO}_2$  auf. Sie tragen somit zur Reduktion dieses Treibhausgases bei, wenn sie durch ihr Absinken in den tiefen Ozean oder aber durch Ernten und Lagerung an Land dem Oberflächenwasser dauerhaft Kohlenstoff entziehen. Zudem bieten sie Nahrung und Lebensraum für marine Organismen, fördern auf diese Weise die Biodiversität und schützen durch ihre wellendämpfende Wirkung die Küsten vor Erosion. Sie werden derzeit hinsichtlich ihres Potenzials zur  $\text{CO}_2$ -Entnahme und -Speicherung untersucht.

**Künstlicher Auftrieb:** Natürliche Auftriebsgebiete sind Regionen, vor allem an den subtropischen Westküsten der Kontinente, in denen kaltes, nährstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche tritt. Die Nährstoffe fördern produktive Ökosysteme mit ertragreichen Fischgründen. Im Gegensatz dazu sind große Gebiete im offenen Ozean, vorwiegend in den Subtropen, nährstoffarm, was das Algenwachstum einschränkt. Künstlicher Auftrieb soll in diesen Gebieten mit Pumpen (z. B. Wellenpumpen) nährstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche befördern. Dadurch können sich die Algen vermehren, wodurch Kohlenstoff durch Photosynthese in der Biomasse gebunden wird. Der Kohlenstoff in der Biomasse, die bis zum Meeresboden sinkt, ist auf lange Zeit der Atmosphäre entzogen. Mit dem Auftrieb des Tiefenwassers verändern sich neben der Nährstoffkonzentration auch die Alkalinität, die Temperatur, der Säuregehalt und die  $\text{CO}_2$ -Konzentration des Oberflächenwassers und damit dessen Fähigkeit  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre aufzunehmen. Da bei den meisten Techniken des künstlichen Auftriebs das Oberflächenwasser und somit die Atmosphäre vom Tiefenwasser abgekühlt wird, beeinflusst dies zudem die globale Erwärmung durch die Verlagerung von Wärme in tiefere Meeresschichten. Es gibt Ansätze, die den künstlichen Auftrieb mit dem Anbau von Makroalgen kombinieren, um den Nährstoffbedarf der Makroalgen-Kulturen zu decken und die Biomasseproduktion zu erhöhen.

**Kohlendioxid-Abscheidung und unterirdische Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS)** ist eine Technologie, bei der CO<sub>2</sub> aus industriellen Prozessen abgeschieden und in geologischen Formationen gespeichert wird. CCS spielt im Zusammenhang mit DACCS (Direct Air Capture and Storage) und BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) eine Rolle bei der Entnahme und dauerhaften Speicherung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre.

**Lagerstätten:** Je nach Methode gibt es verschiedene Arten von Kohlenstoff- oder CO<sub>2</sub>-Lagerstätten. Zu den Kohlenstoff-Lagerstätten gehören natürliche Senken wie der Ozean, Wälder und Böden, die CO<sub>2</sub> durch natürliche Prozesse wie Photosynthese, Pflanzenwachstum und chemische Verwitterung aufnehmen und speichern. Maßnahmen wie Aufforstung, die Wiedervernässung von Mooren oder die Wiederherstellung von Seegraswiesen und Salzmarschen können die langfristige Speicherung von Kohlenstoff fördern und erhöhen. CO<sub>2</sub>-Lagerstätten umfassen geologische Strukturen, in denen CO<sub>2</sub> in verflüssigter Form oder als Gas gespeichert wird. Eine Methode der Speicherung ist die Mineralisierung, bei der CO<sub>2</sub> chemisch in reaktionsfreudigem Gestein (zum Beispiel Basalt) gebunden wird, wodurch es über geologische Zeiträume stabil bleibt.

**Marine Kohlendioxid-Entnahme (Marine Carbon Dioxide Removal, mCDR)** umfasst verschiedene Methoden, die darauf abzielen, CO<sub>2</sub> direkt aus der Atmosphäre zu entnehmen und im Ozean zu speichern. Die verschiedenen Ansätze wie eine Erhöhung der Alkalinität, die Ausweitung der Seegraswiesen, Salzmarschen und Mangrovenwälder oder ein künstlicher Auftrieb nutzen die natürlichen Prozesse des Meeres und setzen technische Verfahren ein, um die CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans zu steigern und somit zur Minderung des Klimawandels beizutragen. Jede Methode muss hinsichtlich ihres Potenzials, ihrer Auswirkungen und Risiken individuell betrachtet werden. Vielfach sind konkrete Aussagen und Bewertungen nur für individuelle Projekte an ausgewählten Standorten möglich.

**Messungen:** Wissenschaftliche Messungen sind systematische Erhebungen realer Daten, die mithilfe verschiedener Instrumente und Verfahren erfasst werden. Im Kontext der Erforschung von CO<sub>2</sub>-Entnahme werden beispiels-

weise die Konzentrationen von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> und Methan, der Kohlenstoffgehalt in Biomasse oder der pH-Wert gemessen. Wissenschaftliche Messungen sind ein grundlegender Bestandteil zur Validierung von Modellen und Überprüfung von Effekten und Grenzwerten. Die Messungen können entweder im Labor, in Mesokosmen (zum Beispiel zur Alkalinitäts-erhöhung) oder in der Umwelt (zum Beispiel Treibhausgasmessung bei Salz-marschen) vorgenommen werden.

**Modellierung** bezeichnet die vereinfachte Beschreibung eines komplexen, realen Systems, in der Regel durch mathematische Formulierungen in Form von Computerprogrammen. Sie dient der vereinfachten Abbildung der Realität. Simulationen sind die Ergebnisse der Anwendung der gegebenen Modellstruktur, wobei die Abbildung der Realität gezielt verändert werden kann. Mit simulierten Experimenten können Erkenntnisse zu Fragestellungen gewonnen werden, ohne dass diese Experimente in der Natur durchgeführt werden müssen. Dadurch können Forschende Vorhersagen treffen, Hypothesen überprüfen oder Sachzusammenhänge darstellen.

Die wissenschaftliche Modellierung spielt eine zentrale Rolle bei der Erforschung und Anwendung von CO<sub>2</sub>-Entnahme-Verfahren. Mit Modellen kann zum Beispiel berechnet werden, wieviel CO<sub>2</sub> entfernt werden muss, um das Netto-Null-Ziel für CO<sub>2</sub> zu erreichen. Außerdem kann die Wirksamkeit verschiedener Methoden und die Interaktion mit anderen Maßnahmen bewertet sowie die langfristigen Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Entnahme-Verfahren in Szenarien abgeschätzt werden. Modelle sind auch unverzichtbar, um Nebenwirkungen und Risiken einzuschätzen. Hierzu gehören die langfristigen Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Entnahme-Methoden auf Biodiversität, Ökosysteme und Landnutzungen sowie Rückkopplungseffekte.

Modelle können außerdem Informationen über soziale und wirtschaftliche Auswirkungen dieser Verfahren liefern. Sie können in Szenarien simulieren, wie eine CO<sub>2</sub>-Entnahme in Marktmechanismen integriert werden kann und ermöglichen planerische Informationen zur Skalierung der CO<sub>2</sub>-Entnahme in spezifischen geografischen Kontexten.

Modelle können einzelne Annahmen und Beobachtungen in Raum und Zeit inter- und extrapolieren und somit eine bessere Nachverfolgbarkeit und Berichterstattung über CO<sub>2</sub>-Entnahme-Effekte ermöglichen. Die Ergebnisse von Modellsimulationen sind damit eine wichtige Grundlage für wissen-

schaftliche Analysen, politische Entscheidungen und die praktische Umsetzung von CO<sub>2</sub>-Entnahme-Verfahren.

Allerdings birgt die Modellierung auch viele Herausforderungen. Modelle sind immer vereinfachte Abbilder der Realität und basieren auf Annahmen, die natürliche, politische und wirtschaftliche Realitäten nie vollständig abbilden. Die transparente Kommunikation der die Modellergebnisse beeinflussenden Unsicherheiten und Annahmen ist daher wesentlich.

**Mineralisierung** bezeichnet eine Stoffumwandlung durch biologische, chemische oder geologische Prozesse, bei der ein Feststoff entsteht. Für die Entnahme und Speicherung von CO<sub>2</sub> spielt die Mineralisierung eine Rolle bei der dauerhaften Bindung von CO<sub>2</sub>, indem der enthaltene Kohlenstoff in stabile Mineralien wie Karbonate umgewandelt wird. Dieser Prozess kann sowohl an Land als auch im marinen Umfeld stattfinden und wird als potenzielle Methode zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre untersucht.

**Netto-Null** beschreibt einen Zustand, in dem nicht-vermiedene menschengemachte Emissionen durch eine CO<sub>2</sub>-Entnahme ausgeglichen werden, in dem aktiv CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnommen wird. Für das Erreichen des Netto-Null-Zieles sind verschiedene Pfade denkbar. Wichtig zu wissen: Der Netto-Null-Begriff wird häufig ohne Bezugsgröße genannt. Er gewinnt aber an Aussagekraft, wenn hinzugefügt wird, ob es sich um ein Netto-Null-Ziel für CO<sub>2</sub>-Emissionen (CO<sub>2</sub>-Neutralität) oder ein Netto-Null-Ziel aller Treibhausgasemissionen (Treibhausgasneutralität) handelt. Wenn man weitere Treibhausgase (zum Beispiel Methan und Lachgas) mit in die Rechnung einbezieht, steigt damit der Druck auf den Einsatz von CO<sub>2</sub>-Entnahme-Maßnahmen, weil diese Gase die Summe der schwer vermeidbaren Emissionen stark erhöhen.

**Ozeanische Rücken** sind Höhen- oder Gebirgszüge am Grund der Tiefsee, die sich bilden, wo Kontinentalplatten auseinanderdriften. An diesen Bruchstellen steigt Magma aus dem Erdinneren auf, erkaltet im Wasser und türmt sich mit der Zeit zu mächtigen Gebirgen auf.

Ein **Ökosystem** ist die Gesamtheit einer Lebensgemeinschaft von Organismen mehrerer Arten und der dazugehörigen unbelebten Umwelt (Gestein, Mineralboden oder Luftfeuchtigkeit und andere Umweltbedingungen). »Ökosystem« ist ein wertfreier wissenschaftlicher Begriff. Im politischen Kontext wird der Begriff aber oftmals mit schützenswerten Naturräumen gleichgesetzt. Beispiele für Ökosysteme sind Wälder, Korallenriffe oder auch das Wattenmeer.

Das **Pariser Klimaschutzübereinkommen** baut auf dem UN-Klimarahmenübereinkommen auf und ist ein multilateraler Vertrag, dem alle Staaten der Welt als Vertragsparteien beigetreten sind. Es wurde am 12. Dezember 2015 auf der Vertragsstaatenkonferenz der UN-Klimarahmenkonvention angenommen und gibt einen globalen rechtlichen Rahmen zur Bekämpfung des Klimawandels vor. Demnach soll die Erderwärmung durch drastische Reduktionen der Treibhausgasemissionen deutlich unter zwei Grad Celsius gehalten werden. Zudem sollen die Vertragsparteien Anstrengungen unternehmen, den Temperaturanstieg auf 1,5 Grad Celsius zu beschränken. Die Entwicklungsländer sollen bei der Anpassung an die Folgen des Klimawandels unterstützt werden. Das Abkommen trat am 4. November 2016 in Kraft, nachdem es von 55 Staaten ratifiziert wurde, die gemeinsam für mindestens 55 Prozent der weltweiten Emissionen verantwortlich sind.

**Rest-Emissionen** sind menschengemachte Treibhausgasemissionen, die trotz Reduktionsmaßnahmen verbleiben, zum Beispiel in der Industrie (Zementherstellung), Landwirtschaft (Methan aus Tierhaltung) und Luftfahrt (CO<sub>2</sub>-Emissionen). Da ihre vollständige Vermeidung derzeit technisch, wirtschaftlich oder gesellschaftlich nicht möglich ist, müssen Rest-Emissionen durch CO<sub>2</sub>-Entnahme ausgeglichen werden.

**Salzmarschen**, auch Salzwiesen genannt, sind Küstenlebensräume, die als Übergangszone zwischen Meer und Land fungieren und weltweit etwa 45.000 Quadratkilometer Fläche einnehmen. Sie entstehen in wind- und wellengeschützten Küstenbereichen mit hohen Sedimentationsraten und sind an regelmäßige Überflutungen sowie an hohe Salzkonzentrationen angepasst. Salzmarschen spielen eine wichtige Rolle beim Küstenschutz, filtern Schadstoffe

aus dem Wasser und sind bedeutende Brut- und Rastgebiete für Vögel. Ihre Vegetation kann CO<sub>2</sub> binden und im Sediment speichern, was die Bedeutung der Marschen für den Klimaschutz unterstreicht.

**Seegraswiesen** sind charakteristische pflanzliche Lebensgemeinschaften in küstennahen Gewässern und in Wattenmeeren, die sich aus Seegrasgewächsen zusammensetzen. Diese wachsen länglich und krautartig und ähneln damit den Gräsern an Land, sind mit diesen aber nicht näher verwandt. Seegraswiesen sind bedeutende Lebensräume, weil in ihnen Jungfische Schutz vor Feinden und Nahrung finden. Verschiedene Fischarten legen ihre Eier direkt an Seegräsern ab, weshalb Seegraswiesen auch als Kinderstube der Fische bezeichnet werden. Darüber hinaus sind Seegräser als Nahrung für Zugvögel von Bedeutung – beispielsweise für die Ringelgänse während ihres Herbstzuges durch das westeuropäische Wattenmeer. Wie bei Salzmarschen findet die Kohlenstoffspeicherung in Seegraswiesen vorwiegend im Sediment statt.

**Sozioökologische Systeme** sind voneinander abhängige und miteinander verbundene Systeme aus Mensch und Natur, die über verschiedene Maßstäbe (engl. scale) hinweg verschachtelt sind. Dies spiegelt wider, dass Menschen Teil von Ökosystemen sind und diese von lokaler bis globaler Ebene formen und gleichzeitig grundlegend von der Fähigkeit dieser Systeme abhängen.

**Treibhausgas-Neutralität** bezeichnet den Zustand, in dem die von Menschen ausgestoßenen Treibhausgase vollständig durch die Entnahme und Speicherung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre ausgeglichen werden.

Das **Vorsorgeprinzip** ist ein Kernprinzip des internationalen Umweltrechts und der internationalen Umweltpolitik. Es ist in zahlreichen multilateralen Übereinkommen zum Schutz und zur Erhaltung der Umwelt enthalten. Im Kern besagt es, dass immer dann, wenn wissenschaftliche Unsicherheit über mögliche negative Umweltauswirkungen einer bestimmten Tätigkeit besteht, vorausschauend agiert werden soll, damit mögliche Gefahren für die Umwelt erst gar nicht entstehen. Das Prinzip umfasst nach Angaben des

deutschen Umweltbundesamtes zwei Dimensionen: die Risikovorsorge und die Ressourcenvorsorge. Risikovorsorge bedeutet, dass bei unvollständigem oder unsicherem Wissen über Art, Ausmaß, Wahrscheinlichkeit sowie Kausalität von Umweltschäden und -gefahren vorbeugend zu handeln ist, um diese von vornherein zu vermeiden. Ressourcenvorsorge meint, dass mit den natürlichen Ressourcen wie Wasser, Boden und Luft schonend umgegangen werden soll, um sie langfristig zu sichern und im Interesse künftiger Generationen zu erhalten. Im internationalen Recht ist das Vorsorgeprinzip an die Staaten gerichtet, im nationalen Kontext an staatliche Behörden und private Betreiber potentiell umweltgefährdender Vorhaben.

# Tiefer einsteigen

Wer tiefer in das Thema CDR und CCS einsteigen möchte, findet frei verfügbare Infomaterialien bei den BMBF-Forschungsprogrammen CDRmare und CDRterra und dem World Ocean Review 8. Bei diesen Informationsmaterialien handelt es sich um erläuterte und zusammengefasste wissenschaftliche Erkenntnisse, die in einer allgemeinverständlichen Sprache erstellt wurde.



**CDRmare Broschüre,  
Factsheets, Updates, Insights:**  
[www.cdrmard.de/infomaterialien](http://www.cdrmard.de/infomaterialien)

[www.cdrmard.de](http://www.cdrmard.de)

## CDRterra

Ergänzend zu den marinen Methoden finden Sie Informationen zu terrestrischen Methoden auf der Website unseres Partnerprogramms [www.cdrterra.de](http://www.cdrterra.de).



CDRterra Factsheets

[www.cdrterra.de/publikationen](http://www.cdrterra.de/publikationen)



World Ocean Review:  
**Klimaretter Ozean?  
Wie das Meer (noch) mehr  
Kohlendioxid aufnehmen soll**



Gesammeltes Wissen zu marinen Verfahren der Kohlendioxid-Entnahme unter Mitwirkung von CDRmare Forschenden.



[www.worldoceanreview.com/de/wor-8/](http://www.worldoceanreview.com/de/wor-8/)

# Impressum

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

Koordiniert am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel  
Wischofstr. 1 – 3 / 24148 Kiel, Germany

## Text

Sina Löschke, schneehohl.net

## Redaktion

Ulrike Bernitt, CDRmare/GEOMAR

## Artwork/Layout

Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

## Coverfoto

Michael Sswat, CDRmare/GEOMAR

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

Löschke, S., CDRmare (2025): *CDRmare Science Stories*, pp. 1-108,  
DOI 10.3289/CDRmare.46

## **CDRmare PARTNER**

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung // Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe // Carl von Ossietzky Universität Oldenburg // Christian-Albrechts-Universität zu Kiel // Deutsches Meeresmuseum // Fachhochschule Kiel // Fichtner GmbH & Co. KG // Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik // GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel // Helmholtz-Zentrum Hereon // K.U.M. Umwelt- und Meerestechnik Kiel GmbH // Kiel Institut für Weltwirtschaft // Leibniz Universität Hannover // Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde // Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung // Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie // North.io // Potsdam Institut für Klimafolgenforschung // Sea & Sun Technology // Senckenberg am Meer // Stiftung Wissenschaft und Politik // TensorGEO // Universität Bremen / MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften // Universität Hamburg // Universität Leipzig // Universität Münster



anberaumt von