

8

Klimaretter Ozean? Wie das Meer (noch) mehr Kohlendioxid aufnehmen soll



Herausgegeben von
maribus in Kooperation mit



future ocean
KIEL MARINE SCIENCES



KDM
Konsortium Deutsche Meeresforschung

mare

world ocean review 
Mit den Meeren leben. 2024



8

**Klimaretter Ozean?
Wie das Meer (noch)
mehr Kohlendioxid
aufnehmen soll**

Vorwort

Je umfangreicher unser Wissen, desto mehr erkennen wir dessen Komplexität. Das gilt insbesondere für unsere Ozeane. Die Meeresforschung ist eine relativ junge Wissenschaft, und aufgrund der vielfältigen Zusammenhänge physikalischer, chemischer und biologischer Vorgänge in einem zugleich unzugänglichen und technikfeindlichen Umfeld entwickelten sich unsere Erkenntnisse mit der einhergehenden modernen Forschung in den letzten Dekaden quasi exponentiell. Während wir noch vor einem halben Jahrhundert vorwiegend deskriptive Erkenntnisse über die Meere gewannen, verstehen wir heute zunehmend die Wechselwirkungen zwischen den Ozeanen und den Folgen des Anthropozäns.

Dabei müssen wir erkennen, dass der Einfluss des Menschen auf das marine Ökosystem gravierender ausfällt, als wir noch vor einem halben Jahrhundert vermuteten. Nichts gefährdet die Ozeane und somit unseren Planeten mehr als der menschengemachte Klimawandel. Die Folgen der Kohlendioxidemissionen unserer modernen Gesellschaft führen aufgrund von Versauerung und Erwärmung der Meere zu schwerwiegenden, kaum revidierbaren Veränderungen. Noch nie in der Menschheitsgeschichte griffen wir so folgenschwer und existenziell in unser Ökosystem ein wie mit unseren Treibhausgasemissionen, noch nie zuvor so gottgleich, also allgewaltig und absolut. Erwärmt sich die Erde weiter in der bisherigen Geschwindigkeit, ist ein Kollaps von Natur und Gesellschaft unabwendbar. Um das folglich von der Wissenschaft vorgegebene 1,5-Grad-Ziel jedoch einzuhalten, müssen wir abermals zu Methoden greifen, die entsprechend wirkmächtig und existenziell sind! Denn eine sofortige Null-Emission allein reicht dazu nicht mehr aus; die aktive Entnahme von Kohlendioxid und dessen sicheres Einbringen an Land oder in die Meere scheint unerlässlich. Kaum haben wir somit den gewaltigen Eingriff in die Meere durch den Klimawandel verstanden, wollen wir erneut Einfluss auf den Ozean nehmen. Und wieder sind die Folgen schwer abzuschätzen.

Wenn wir die geforderten und notwendigen Techniken anwenden, Kohlendioxid aktiv in die Meere zu verbringen, agieren wir schon wieder als eine höhere Macht, oftmals wieder ohne die dazu erforderlichen Kenntnisse.

Ich hoffe sehr, dass der vorliegende „World Ocean Review“, der WOR No. 8, dazu beiträgt, leider notwendige Maßnahmen besser zu verstehen und deren Konsequenzen zu erkennen. Auf diese Weise kann er uns vielleicht zu der Einsicht bringen, dass „weichere“, biologische Methoden eher zu empfehlen sind als solche, deren Folgen wieder schwer abzusehen sind.

Unser Wissen ist gewachsen, die Komplexität unseres Einflusses auf die Meere jedoch ebenso. Wir sollten gelernt haben, dass vor allem die Null-Emission unser vorrangiges Ziel sein sollte und nicht in erster Linie die Umkehrung von Prozessen. Wir haben viel zu lange gewartet, den Klimawandel zu lange hingenommen oder gar nicht erst erkannt. Jetzt müssen wir umso umsichtiger mit unseren Reaktionen umgehen.



Nikolaus Gelpke

Geschäftsführer maribus gGmbH, Verleger des mareverlags und Schirmherr des IOI

In der Forschung herrscht ebenso Konsens wie in weiten Teilen der Gesellschaft: Der Klimawandel wird zunehmend drastischere Folgen für die Menschheit und den Planeten haben, wenn es nicht gelingt, den weltweiten jährlichen Ausstoß von Kohlendioxid zu begrenzen. Der Ozean spielt dabei eine zentrale Rolle, nimmt er doch einen erheblichen Teil der vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre auf. Aber wie lange noch und mit welchen Folgen? Die Verbindung zwischen Ozean und Klima ist offensichtlich, und die Veränderungen auf der Erde werden von Jahr zu Jahr spürbarer.

Um den Klimawandel zu begrenzen sind daher vielfältige Maßnahmen erforderlich, besonders um den CO₂-Ausstoß auf Null zu reduzieren. Doch wie? Gibt es neben der notwendigen Reduktion noch weitere sinnvolle Maßnahmen, die das System Ozean dazu bringen, mehr Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu binden? Mit dieser Zukunftsfrage beschäftigen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit, in Deutschland und in Kiel. Die Kieler Forschenden arbeiten über Fächergrenzen hinweg und in Zusammenarbeit von Natur- und Gesellschaftswissenschaften mit dem Ziel, wissenschaftsbasierte Handlungsoptionen aufzuzeigen, wie der Ozean und seine Ressourcen nachhaltig genutzt werden können.

Ist ein aktiver Eingriff in den marinen Kohlenstoffhaushalt möglich, effektiv, effizient und bezahlbar? Welche Maßnahmen sind gesellschaftlich akzeptabel? Grundlage für solche Aushandlungsprozesse und transformativen Entscheidungen ist immer fundiertes, verständlich aufbereitetes und umfassendes Wissen. Und dieses bietet in kompakter Form der „World Ocean Review“, der WOR No. 8. Er gibt einen Überblick über die Rolle der Meere für unser Klima mit einem Fokus auf den marinen Kohlenstoffkreislauf. Der neue Band zeigt auf, welche Eingriffsmöglichkeiten wir als Menschheit haben – von „nature-based solutions“ bis hin zur Verklappung von CO₂ in der Tiefsee oder im Meeresboden.

Die Themen des WOR 8 werden uns noch viele Jahre begleiten. International sind sie in der im Jahr 2021 gestarteten UN-Dekade der Meeresforschung für nachhaltige Entwicklung verankert, die sich mit der Schnittstelle zwischen Ozean und Klima ebenso beschäftigt wie mit dem notwendigen gesellschaftlichen Transformationsprozess. Der Ozean – Nahrungslieferant für viele Menschen, Sehnsuchtsort und Transportweg – ist dabei ein Hoffungsanker. Doch wie lange noch? Lösungen sind in Sicht, auch wenn sie noch in den Kinderschuhen stecken. Und wenn wir gegensteuern, stellt sich die Frage nach Nebenwirkungen, zum Beispiel Krankheiten im Meer, über die erstaunlich wenig bekannt ist.

Wir möchten dafür werben, grundsätzlich zuversichtlich zu bleiben und sich innovativ und gemeinschaftlich für gesunde Ökosysteme im Meer einzusetzen. Die UN-Ozeandekade bietet einen wichtigen Rahmen. Und der neue „World Ocean Review“ leistet einen wertvollen Beitrag als Grundlage für viele Aktivitäten, auch für die Klimaverhandlungen.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre!

Prof. Dr. Martin Visbeck
GEOMAR Helmholtz-Zentrum
für Ozeanforschung Kiel
Co-Sprecher Future Ocean

Prof. Dr. Nele Matz-Lück
Christian-Albrechts-
Universität zu Kiel
Co-Sprecherin Future Ocean

Prof. Dr. Ralph Schneider
Christian-Albrechts-
Universität zu Kiel
Co-Sprecher Future Ocean

Kann uns der Ozean vor der Klimakrise retten? Sicher nicht! Es gibt allerdings zahlreiche Optionen, wie Prozesse im Ozean dazu beitragen, mehr vom Klimagas Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre aufzunehmen, um so etwas mehr Zeit zu gewinnen, Alternativen zu entwickeln, um den anthropogenen CO₂-Ausstoß zu verringern. Der vorliegende WOR 8 zeigt dieses Potenzial auf. Die Autorinnen und Autoren beschreiben Maßnahmen, die bereits umgesetzt werden (können), und solche, die als Option bezüglich ihres Nutzens, aber auch wegen möglicher Risiken noch bewertet werden sollten. Alle Einrichtungen und Institute der deutschen Meeresforschung sind an entsprechenden Projekten beteiligt und belegen so einmal mehr, wie eine Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen der Meeresforschung dazu in der Lage ist, schnell tragbare und nachhaltige Beiträge zu Lösungen eines globalen Problems zu entwickeln. Eindrucksvoll präsentiert der WOR 8 hier ein Kaleidoskop der aktuellen Forschung im Jahr 2023, zeigt aber auch, welches Wissen noch fehlt, um noch verlässlichere Empfehlungen an umsetzende Akteure auszusprechen. Die Projekte, in denen geforscht wird, werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Max-Planck-Gesellschaft, der Leibniz-Gemeinschaft und den Universitäten direkt oder indirekt vom Bund und den (norddeutschen) Bundesländern finanziert. Darüber hinaus hat die Deutsche Allianz Meeresforschung (DAM) hierzu eine umfangreiche Forschungsmission initiiert, in der über 100 Personen arbeiten. Die einzelnen Projekte benötigen neben Sachmitteln, Forschungsschiffen und weiterer Infrastruktur vor allem kreative Menschen, die sich engagieren. Entsprechend umfangreich ist der Bedarf an jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie an technischem und unterstützendem Personal, die sich den Herausforderungen annehmen, sei es als Mitarbeitenden in unseren KDM-Instituten oder an anderer Stelle. Wir bereiten von Seiten der Wissenschaft unsere Erkenntnisse so auf, dass sie einerseits im Detail für die Fachwelt nachvollziehbar sind. Andererseits entwickeln wir in den KDM-Instituten und aus der DAM heraus Informationsmaterial in vielfältiger Form (unter anderem gedruckt, digital, persönlich), das kondensiert und gut verständlich die wesentlichen Schlussfolgerungen nachvollziehbar für viele Ebenen der Gesellschaft aufarbeitet und anbietet. Der WOR 8 ist hierzu eine gelungene Ergänzung. Das Wissen ist so umfangreich – jetzt ist Handeln dringend geboten.

Prof. Dr. Ulrich Bathmann
Direktor des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und
Vorsitzender des Konsortiums Deutsche Meeresforschung (KDM)



Vorwort 5

Dringlichst gesucht – Wege aus der Klimakrise Kapitel 1

Alarmstufe Rot für Mensch und Natur 12
 Lösungen für das Treibhausgas-Problem? 34
 CONCLUSIO: Die Klimakrise kennt nur
 eine Lösung: Treibhausgasneutralität 51



Die Rolle des Ozeans im Kohlenstoffkreislauf der Erde Kapitel 2

Wie der Ozean Kohlendioxid aufnimmt 54
 CONCLUSIO: Kohlenstoffspeicher Ozean: Riesig, effizient und in Gefahr 67



Das ungenutzte Klimaschutzpotenzial der Ökosysteme an Land Kapitel 3

Wälder, Wiesen und Böden als Kohlenstoffspeicher 70
 CONCLUSIO: Lösungen, die viel zu selten umgesetzt werden 87



Marine CDR-Verfahren: Forschung unter Zeit- und Erwartungsdruck Kapitel 4

Ein Ozean der Möglichkeiten oder gefährlicher Hype? 90



Mehr Kohlenstoffeinlagerung in Wiesen und Wäldern des Meeres? Kapitel 5

Blue Carbon: Ein Lösungsansatz mit doppeltem Nutzen 96
 CONCLUSIO: Küstenökosysteme: Marine Kohlenstoffsенke
 mit unverzichtbaren Zusatzleistungen 119

Künstlicher Auftrieb: Die Idee von der Begrünung des Ozeans Kapitel 6

Eine Anschubhilfe für die biologische Kohlenstoffpumpe 122
 CONCLUSIO: Künstlicher Auftrieb – Prädikat: „nur bedingt nützlich“ 133



Gezielte Eingriffe in die Meereschemie Kapitel 7

Alkalinitätserhöhung: Verfahren in den Kinderschuhen 136
 CONCLUSIO: Alkalinitätserhöhung –
 theoretisch verstanden, im Feld jedoch kaum getestet 149



Kohlendioxid verpressen tief unter dem Meer Kapitel 8

Gasspeicherung in Sandsteinschichten und Basaltgestein 152
 CONCLUSIO: Kohlendioxidspeicherung unter dem Meer:
 Ein umstrittenes Verfahren im Aufwind 179



Leitprinzipien und Regeln für einen Einsatz mariner CDR-Verfahren Kapitel 9

Wie regelt man eine verstärkte CO₂-Aufnahme des Meeres? 182
 CONCLUSIO: Regulierung möglicher CDR-Einsätze:
 Gebraucht werden klare Strategien und Vorschriften 205



Gesamt-Conclusio 207

Abkürzungen 222
 Quellenverzeichnis 224
 Mitwirkende 232
 Index 236
 Partner und Danksagung 241
 Abbildungsverzeichnis 242
 Impressum 244



1 Dringlichst gesucht – Wege aus der Klimakrise

> Seit Jahrzehnten weiß man, dass sich durch den Ausstoß von Treibhausgasen die Erdatmosphäre erwärmt und sich das Klima verändert. Ein Umdenken aber blieb bisher aus, wertvolle Zeit verstrich ungenutzt. Erst jetzt, wo die dramatischen Folgen immer augenfälliger werden, beginnen Verantwortliche ernsthaft nach Lösungen zu suchen. Dabei müssen sie feststellen, dass Treibhausgasreduktionen allein nicht ausreichen werden, den Klimawandel auf ein erträgliches Maß zu begrenzen.



Alarmstufe Rot für Mensch und Natur

> Der Klimawandel ist angekommen im Alltag der Menschen. Mindestens die Hälfte der Weltbevölkerung leidet inzwischen unmittelbar unter den Folgen der globalen Erwärmung. Brunnen versiegen, Hitze wird unerträglich, Stürme und Fluten reißen Hab und Gut davon. Zugleich versagen die ohnehin schon geschundenen Ökosysteme mehr und mehr ihren Dienst. Klima und Natur – so viel ist klar – machen keine Kompromisse. Für die Menschheit geht es daher um alles, denn der selbst angestoßene Wandel entpuppt sich als lebensgefährlicher Gefahrenmultiplikator.

Unsere Zukunft steht auf dem Spiel

Die Menschheit weiß seit Jahrzehnten, dass sie das Klima der Erde durch den Ausstoß von Treibhausgasen erwärmt. Welches Ausmaß die weltweiten Klimaveränderungen jedoch bereits angenommen haben und in welcher Notlage sich das Leben auf dem Planeten Erde schon heute befindet, wurde selten mit solcher Dringlichkeit kommuniziert wie im sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC).

Im Auftrag des Weltklimarates, wie der IPCC auch im Deutschen genannt wird, bewerten mehr als 750 Klimawissenschaftlerinnen und Klimawissenschaftler aus

aller Welt in regelmäßigen Abständen den aktuellen Stand des Wissens zu den Veränderungen des Erdklimas. Sie analysieren Forschungsergebnisse zu den Ursachen und Folgen des Klimawandels; sie tragen zusammen, in welchem Umfang Natur und Menschheit in der Lage sind, sich an das neue Klima anzupassen; und sie beschreiben, durch welche Maßnahmen es gelingen kann, die Klimagefahren zu verringern und die globale Erwärmung zu begrenzen.

Die Kernaussagen der drei Teilbände des sechsten Weltklimaberichtes machen eines sehr deutlich: dass die Menschheit mit ihren anhaltend hohen Treibhausgasemissionen eine lebenswerte Zukunft für aktuelle und kommende Generationen aufs Spiel setzt.



1.1 > Qualm steigt aus den Schornsteinen eines chinesischen Stahlwerkes in der Inneren Mongolei. Währenddessen schmelzen Arbeiter in einem Camp davor illegal Erz ein. China emittiert im weltweiten Vergleich das meiste Kohlendioxid (rund 30 Prozent der globalen Emissionen 2022), auch deshalb, weil Kohle immer noch die Hauptenergiequelle des Landes ist.

Eine rasante Erwärmung und ihre Folgen für das Klima der Erde

Nach Angaben des Weltklimarates lag die globale Oberflächentemperatur im Zeitraum von 2010 bis 2022 rund 1,15 Grad Celsius über dem Vergleichswert aus dem Zeitraum 1850 bis 1900. Die Erwärmung über Land fiel dabei deutlich höher aus als über dem Meer. Die Temperaturen über den Kontinenten stiegen im Mittel um 1,65 Grad Celsius, während sich die Luftmassen über dem Meer um 0,93 Grad Celsius erwärmten. Gut informierte Leserinnen und Leser mögen angesichts dieser Zahlen stutzen, weil andere Institutionen und bekannte Nachrichtenportale seit dem Jahr 2020 von einer globalen Erwärmung von 1,2 Grad Celsius sprechen. Vor diesem Hintergrund stellt sich deshalb die Frage: Arbeitet der Weltklimarat mit veralteten Daten? Mitnichten.

Globale Klimaberichte wie jene des Weltklimarates oder aber auch die regelmäßig erscheinenden Analysen der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) beziehen sich auf langfristige Veränderungen der Klimaparameter. In Bezug auf die globale Oberflächentemperatur analysieren sie deshalb nicht nur die Temperaturwerte eines spezifischen Jahres, weil diese durch kurzfristige natürliche Temperaturschwankungen beeinflusst sein könnten. Stattdessen nutzen IPCC-Autorinnen und -Autoren Messdaten aus den zurückliegenden 20 Jahren als Datenbasis. Auf diese Weise sind sie in der Lage, den tatsächlichen langfristigen Trend zu detektieren.

Und die Erwärmung der Erde beschleunigt sich: In den vergangenen 50 Jahren (1970 bis 2020) ist die globale Oberflächentemperatur schneller gestiegen als in jeder anderen 50-Jahres-Periode innerhalb der zurückliegenden 2000 Jahre. Betrachtet man die vergangenen vier Jahrzehnte im Detail (1980 bis 2020), dann war jede der vier Dekaden wärmer als die jeweils vorhergehende.

Diese Entwicklung führt dazu, dass viele Komponenten des Klimasystems der Erde Veränderungen in einer Geschwindigkeit erfahren, wie sie unser Planet seit vielen Jahrhunderten oder Jahrtausenden nicht erlebt hat. Das Ausmaß dieser Veränderungen ist jedoch nicht überall gleich. Einige Regionen sind stärker betroffen als andere. Hinzu kommt: Jedes weitere Zehntelgrad Erwärmung

wird dazu führen, dass sich der angestoßene Wandel verstärkt. Das heißt, das Ausmaß und die extreme Geschwindigkeit der Veränderungen sowie die damit verbundenen Risiken werden mit jedem weiteren Temperaturanstieg zunehmen, und sei er noch so klein. Dazu gehören insbesondere die Erwärmung, Versauerung und zunehmenden Sauerstoffverluste der Meere, die Zunahme extremer Hitzeereignisse über Land und in den Ozeanen, das Schmelzen der Eismassen, steigende Meeresspiegel sowie Veränderungen im Wasserkreislauf der Erde.

Eine zunehmende Erwärmung, Versauerung und Sauerstoffarmut der Meere und Ozeane

AKTUELLER STAND: Die Meere und Ozeane sind die größte Wärmebatterie unseres Planeten. Diese Batterie wird durch den Klimawandel und die damit verbundene Erwärmung der Atmosphäre ununterbrochen aufgeladen. Meere und Ozeane haben in den zurückliegenden 60 Jahren rund 90 Prozent der durch den Treibhauseffekt in der Erdatmosphäre gefangenen Wärme aufgenommen und in ihren Tiefen gespeichert. Infolgedessen hat sich der Wärmegehalt des Meeres vervielfacht, und die Wassertemperaturen steigen schneller als zu jedem anderen Zeitpunkt seit der letzten Eiszeit. Betrachtet man nur die Meeresoberflächentemperatur, so ist diese im Zeitraum von 1850 bis 1900 bis zum Jahr 2022 um durchschnittlich 0,93 Grad Celsius gestiegen.

Forschende bezeichnen den Anstieg der Meerestemperaturen als deutlichsten Indikator des menschengemachten Klimawandels – zum einen, weil der Weltozean den größten Teil der zusätzlichen Wärme aufnimmt, zum anderen aber auch, weil seine Oberflächentemperaturen geringeren Schwankungen von Jahr zu Jahr unterworfen sind als zum Beispiel die Atmosphäre. Der Erwärmungstrend ist somit leichter auszumachen.

Im Zuge der Meerese Erwärmung hat die Schichtung der Wassermassen in den oberen 200 Metern der Wassersäule zugenommen. Gleichzeitig hat die zunehmende Verdunstung von Wasser an der Meeresoberfläche dazu geführt, dass das ohnehin schon salzigere Oberflächenwasser in Verdunstungsregionen noch salziger geworden ist. In Meeresgebieten mit vielen Niederschlägen oder aber starkem Schmelzwasserzufluss haben die Süßwassereinträge hingegen zugenommen. Das heißt, hier ist der

ohnehin schon niedrige Salzgehalt des Oberflächenwassers weiter gesunken.

Beide Entwicklungen, die zunehmende Schichtung der Wassermassen und die Veränderungen des Salzgehaltes, führen seit den 1950er-Jahren zu einer abnehmenden dichtebedingten Durchmischung des Oberflächenwassers mit darunterliegenden Wassermassen und befeuern so die zunehmenden Sauerstoffverluste des Meeres. Die Sauerstoffarmut zeigt sich insbesondere in sogenannten Sauerstoffminimumzonen, die sich im Westpazifik, im Indischen Ozean sowie vor der Westküste des südlichen Afrikas unterhalb der sogenannten Deckschicht bilden, das heißt in Wassertiefen von mehr als 100 bis 200 Metern. In diesen Zonen enthält das Wasser weniger als 70 Mikromol Sauerstoff pro Kilogramm Wasser, sodass sauerstoffhungrige Meeresbewohner wie Haie und Thunfische dort keine Überlebenschance haben.

Die Meere und Ozeane nehmen jedoch nicht nur Wärme auf, sondern auch rund ein Viertel der vom Menschen freigesetzten Kohlendioxidmenge. Anders als Sauerstoff aber löst sich Kohlendioxid nicht einfach nur im Wasser, sondern durchläuft dort eine chemische Kettenreaktion. Als Ergebnis dieser Reaktion steigt der Säuregehalt des Wassers. Das heißt, das Meer versauert, wodurch sich die Lebensbedingungen für viele Meeresorganismen grundlegend verschlechtern. Expertinnen und Experten sprechen in diesem Fall von einem sinkenden pH-Wert – das Maß für den Säuregehalt des Meeres. Nach Angaben des Weltklimarates ist der pH-Wert des Oberflächenwassers in den zurückliegenden 40 Jahren in nahezu allen Meeresgebieten gesunken – und zwar in einem solchen Maß, dass die Versauerung heutzutage so hoch ist wie zu keinem anderen Zeitpunkt in den zurückliegenden 26 000 Jahren. Auch das Tempo, mit dem die Meere derzeit versauern, ist rekordverdächtig. Erschwerend kommt hinzu, dass die Versauerung nicht mehr nur allein das Oberflächenwasser betrifft, sondern seit etwa 30 Jahren auch im Ozeaninnern immer häufiger nachgewiesen werden kann.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Erwärmung der Meere und Ozeane wird sich fortsetzen, selbst wenn es der Menschheit gelingen sollte, die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Diese Tatsache erklärt sich durch die Trägheit des Systems Meer. Das heißt, wichtige Prozesse laufen so langsam ab, dass die Auswirkungen ein-

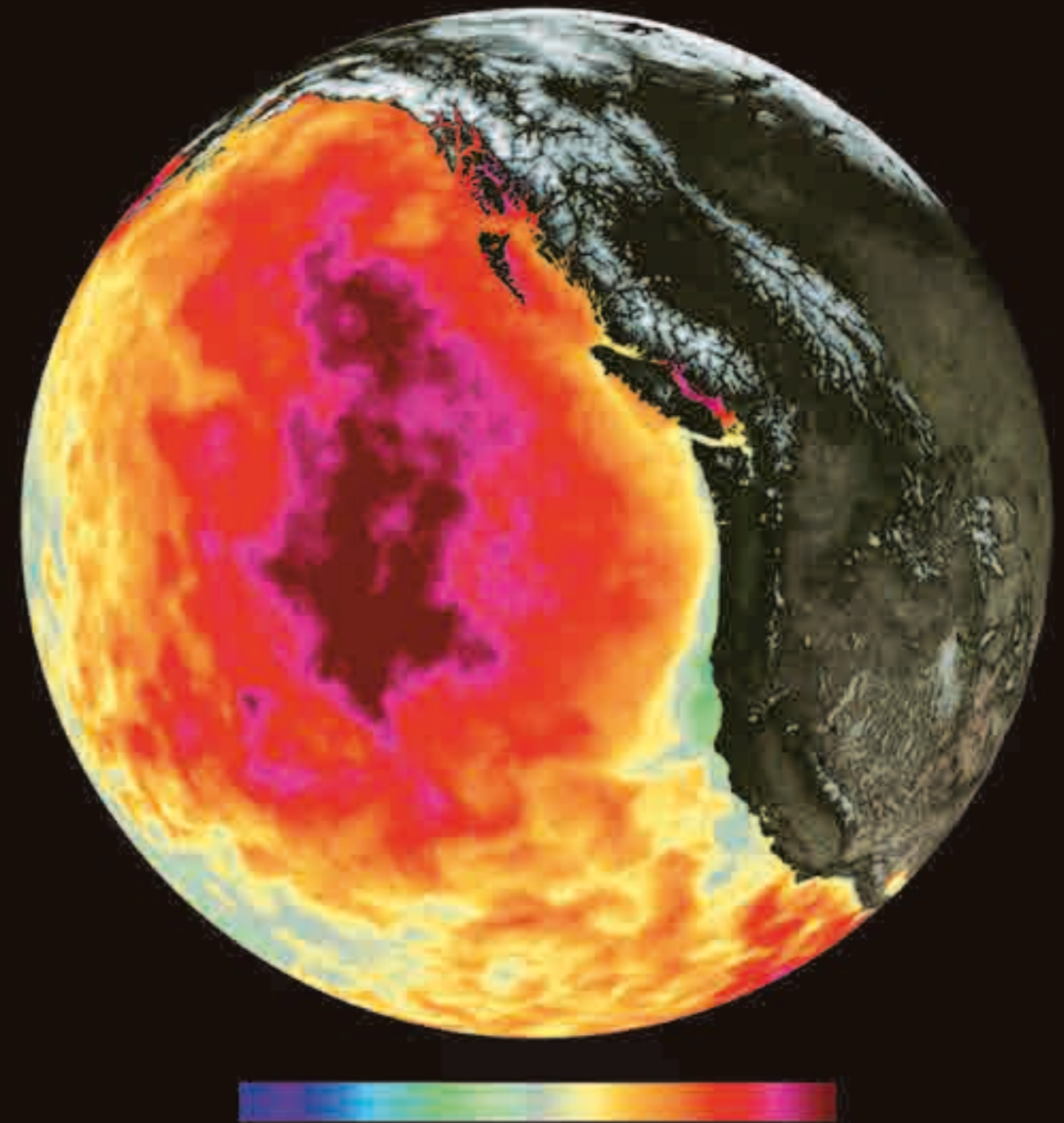
mal angestoßener Veränderungen über Jahrhunderte, wenn nicht sogar über Jahrtausende zu spüren sind und eine Umkehr ebenso viel Zeit braucht. Dennoch hat die Menschheit es in der Hand: Wie stark sich die Ozeane ab dem Jahr 2050 erwärmen werden, hängt einzig und allein davon ab, ob wir den Klimawandel bremsen können. Die künftige Temperatur des Wassers entscheidet auch darüber, wie viel Sauerstoff die Ozeane noch enthalten werden. Je wärmer das Meer, desto weniger Sauerstoff kann sich darin lösen.

Die Zunahme extrem warmer Temperaturen in allen Teilen der Welt

AKTUELLER STAND: Meteorologinnen und Meteorologen verzeichnen seit den 1950er-Jahren eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität extrem warmer Tage sowie eine Zunahme der Intensität und Dauer von Hitzewellen über Land. Neu ist, dass diese Wetterextreme mittlerweile Rekordtemperaturen erreichen, die ohne den menschengemachten Klimawandel unmöglich gewesen wären. Ein Beispiel stellt die extreme Hitzewelle dar, die Ende Juni 2021 den Nordwesten der USA und Kanada heimsuchte. Örtlich stiegen die Temperaturen damals auf bis zu 49,6 Grad Celsius und übertrafen alte Hitzerekorde an einigen Wetterstationen um bis zu 4,6 Grad Celsius. Forschung dazu belegt nun: Ohne den menschengemachten Klimawandel wäre diese Hitzewelle etwa zwei Grad Celsius niedriger ausgefallen. In einer Welt mit einer globalen Erwärmung von zwei Grad Celsius dagegen hätten die Temperaturhöchstwerte dieser Hitzewelle die 50-Grad-Marke überschritten. Zugleich steigt mit der globalen Erwärmung die Gefahr einer solchen Hitzewelle im Westen Nordamerikas. Lag die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens im Juni 2021 noch bei einem Ereignis alle 1000 Jahre, würde sich das Extremereignis in einer Welt mit einer globalen Erwärmung von zwei Grad Celsius bereits alle fünf bis zehn Jahre wiederholen.

Die Häufigkeit, Intensität und Dauer mariner Hitzewellen nehmen ebenfalls zu. Meereshitzewellen treten mittlerweile doppelt so häufig auf wie noch in den 1980er-Jahren und richten große Schäden in den Lebensgemeinschaften des Meeres an. Und auch hier können Forschende mittlerweile den Einfluss des Menschen klar identifizieren. Ohne Klimawandel hätte es höchstwah-

1.2 > Dunkelrot markiert sind jene Meeresregionen des Nordpazifiks, in denen die Wassertemperatur im Mai 2015 bis zu drei Grad Celsius wärmer war als normal. Die ursächliche Meereshitzewelle hielt mehr als 250 Tage an, kostete Abertausenden Fischen, Seevögeln und Meeressäugern das Leben und ist bis heute unter der Bezeichnung „The Blob“ bekannt.



1.3 > Von Hitze geschwächte Menschen in den klimatisierten Räumen eines Messezentrums in Portland, US-Bundesstaat Oregon. Die Veranstaltungsräume wurden während einer extremen Hitzewelle im Frühsommer 2021 geöffnet, damit die Menschen sich abkühlen und ausruhen können.



scheinlich auch jene Meereshitzewelle nicht gegeben, die in den Jahren 2013 bis 2015 das Leben im Nordostpazifik auf den Kopf stellte und unter dem Namen „The Blob“ in die Geschichtsschreibung einging. Damals verhungerten unter anderem eine Million Trottellummen (*Uria aalge*), weil die außergewöhnlich warmen Wassertemperaturen dazu geführt hatten, dass ihre Beutetiere in viel kleinerer Zahl vorkamen als unter normalen Bedingungen. Die Sterberate der Trottellummen stieg deshalb um das 1000-Fache. BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Intensität und Dauer der Hitzewellen an Land werden weiter zunehmen, selbst wenn es der Menschheit gelingen sollte, die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Meereshitzewellen werden ebenfalls häufiger auftreten. Erwärmt sich die Welt um durchschnittlich 1,8 Grad Celsius bis zum Jahr 2100, wird sich die Zahl der Meereshitzewellen in den kommenden 60 bis 80 Jahren verdoppeln bis vervielfachen. Steigt die globale Mitteltemperatur sogar um etwa 4,4 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit, werden Meereshitzewellen in den letzten zwei Jahrzehnten dieses Jahrhunderts drei- bis 15-mal so häufig auftreten wie im Zeitraum 1995 bis 2014, wobei die größten Veränderungen für die tropischen Gewässer und den Arktischen Ozean vorausgesagt werden.

Ein weltweiter Rückzug der Berggletscher

AKTUELLER STAND: So wenig Gletschereis wie heute gab es auf der Erde in den zurückliegenden 2000 Jahren nicht. Weltweit schrumpfen die Berggletscher seit den 1990er-Jahren in zunehmendem Tempo, weil sich die Luft auch in den Höhenlagen erwärmt. Der Temperaturanstieg hat zur Folge, dass weniger Schnee auf der Gletscheroberfläche den Sommer übersteht und in den Folgejahren in Eis umgewandelt werden kann. Gleichzeitig schmelzen die Berggletscher zunehmend an ihrer Oberfläche. Ihr Schmelzwasser hat in den zurückliegenden 120 Jahren im Mittel rund 6,72 Zentimeter zum Anstieg des globalen Meeresspiegels beigetragen.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Für die kommenden Jahrzehnte ist mit einer weiteren Abnahme der Schneebedeckung und Gletschereismassen in den Gebirgen der Erde zu rechnen. Außerdem wird der dauergefrorene Boden (Permafrost) in vielen Hochgebirgsregionen auftauen. Da es zeitgleich mehr Starkregen anstelle von anhaltendem Schneefall geben wird, prognostizieren die Forschenden für viele Bergregionen eine zunehmende Gefahr von Überflutungen und Erdbeben. Hinzu kommt: Mit dem Gletschereis schwinden wiederum wichtige Wasserreserven für Millionen Menschen entlang der

Flüsse, welche durch das Schmelzwasser der Berggletscher gespeist werden.

Ein deutlicher Rückgang des arktischen Meereises

AKTUELLER STAND: Die Arktis hat sich in den zurückliegenden Jahren mehr als doppelt so schnell erwärmt wie die gesamte Welt im Durchschnitt. Infolgedessen ist das Sommerminimum des arktischen Meereises – so nennt man die geringste Ausdehnung des Eises zum Ende der warmen Jahreszeit – mittlerweile rund 40 Prozent kleiner als noch zu Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979. Außerdem ist das verbleibende Eis deutlich dünner als früher, treibt deshalb schneller über den Arktischen Ozean und wird auch nur noch selten mehr als zwei Jahre alt, bevor es schmilzt.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Sommerschmelze des arktischen Meereises wird sich beschleunigen, gleichzeitig wird im Winter weniger Eis gefrieren. Beide Entwicklungen werden dazu führen, dass der Arktische Ozean bis zum Jahr 2050 mindestens einmal eisfrei sein wird zum Ende des Sommers – abgesehen von kleinen Resteisflächen in geschützten Buchten oder Fjorden, deren Gesamtfläche jedoch weniger als eine Million Quadratkilometer betragen wird.

Zunehmende Masseverluste der Eisschilde in Grönland und der Antarktis

AKTUELLER STAND: Der Eispanzer Grönlands hat im Zeitraum 1992 bis 2020 schätzungsweise 4890 Milliarden Tonnen Eis eingebüßt und mit deren Schmelzwasser 1,35 Zentimeter zum globalen Meeresspiegelanstieg beigetragen. Der Antarktische Eisschild hat im selben Zeitraum 2670 Milliarden Tonnen Eis verloren, wobei er die größten Verluste in seinem westlichen Teil, dem Westantarktischen Eisschild, verzeichnete. Sowohl dort als auch an der Antarktischen Halbinsel hat das Fließtempo der Gletscher in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten deutlich zugenommen. Das heißt, die Gletscher transportieren heutzutage deutlich mehr Eis von Land ins Meer als noch im Jahr 2000.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Beide großen Eisschilde der Welt werden mit zunehmender Erwärmung mehr Eis verlieren und verstärkt zum Anstieg des globalen Meeresspiegels beitragen. Sollte sich die Welt um mehr als zwei

Grad Celsius erwärmen, wird der Eispanzer der Westantarktis sehr wahrscheinlich zerfallen, und seine Eismassen werden in das Meer abrutschen. Wann und in welchem Tempo und Umfang ein solcher Zerfall erfolgen könnte, lässt sich bislang allerdings nur mit einer sehr geringen Gewissheit vorhersagen.

Ein beschleunigter Anstieg der Meeresspiegel

AKTUELLER STAND: Der mittlere globale Meeresspiegel ist im Zeitraum 1901 bis 2018 um 20 Zentimeter gestiegen, wobei seine Anstiegsrate seit den 1960er-Jahren kontinuierlich wächst. Das heißt, der Meeresspiegel steigt immer schneller. Im Zeitraum von 2006 bis 2018 betrug der globale Anstieg bereits 3,7 Millimeter pro Jahr. Betrachtet man den Zeitraum von 2013 bis 2022 waren es nach Angaben der WMO bereits 4,62 Millimeter. So schnell sind die Wasserstände in den zurückliegenden 3000 Jahren nicht angestiegen. Lokal und regional aber können die Pegel auch noch deutlich stärker steigen – etwa, weil sich das Land entlang der Küstenlinie gleichzeitig absenkt oder Wind und Meeresströmungen das Wasser vor der Küste auftürmen.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Entwicklung des globalen Meeresspiegels wird durch zwei Faktoren bestimmt – zum einen durch die Temperatur des Meerwassers (je wärmer das Wasser, desto stärker dehnt es sich aus und nimmt demzufolge mehr Raum ein); zum anderen durch Veränderungen der an Land gespeicherten Wassermenge (Eismassen, Grundwasser, Flüsse, Seen). Gelangt mehr Wasser vom Land in den Weltozean, steigen die Wasserpegel. An jedem lokalen Küstenabschnitt stellt sich zudem die Frage, ob das Küstengebiet selbst irgendwelchen Höhenveränderungen unterworfen ist – etwa, weil viel Grundwasser abgepumpt wird und der Untergrund deshalb absinkt (Subsidenz) oder geologische Prozesse zu einer Anhebung oder Absenkung der Landfläche führen. Veränderungen des lokalen Meeresspiegels können auch deshalb deutlich stärker oder aber schwächer ausfallen als der globale Trend.

Der Weltklimarat prognostiziert einen weiteren Anstieg des globalen Meeresspiegels, selbst wenn es der Menschheit gelingen sollte, ihre Treibhausgasemissionen innerhalb kurzer Zeit auf null zu reduzieren. Die Spanne der möglichen Anstiegsszenarien reicht von zusätzlichen

18 bis 23 Zentimetern bis zum Jahr 2050. Für das Ende des Jahrhunderts wird ein Anstieg von 38 bis 77 Zentimetern erwartet.

Veränderungen im Wasserkreislauf

AKTUELLER STAND: Die globale Erwärmung hat zur Folge, dass weltweit mehr Wasser verdunstet, über dem Meer ebenso wie über dem Land. Dadurch steigt zum einen die Wasserdampfmenge in der Atmosphäre und damit die Wahrscheinlichkeit, dass sich Regentropfen bilden. Zum anderen verliert das Erdreich im Zuge der Verdunstung wichtige Bodenfeuchtigkeit, die eigentlich für das Wachstum von Pflanzen benötigt wird. Beide physikalischen Prozesse verändern das Wetter und Klima nachhaltig: Schon seit den 1950er-Jahren lässt sich eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen beobachten – zumindest in jenen Regionen der Welt, in denen es eine kontinuierliche Wetteraufzeichnung gibt. Gleichzeitig steigt im Zuge des Klimawandels in einigen Regionen die Dürrefahr, weil Niederschläge vor allem in den trockensten Monaten des Jahres ausbleiben oder aber zu anderen Jahreszeiten fallen – und dann in so großen Mengen, dass das Wasser oberflächlich abläuft und nicht im Boden versickern kann. Ein großes Problem stellt zudem die Abnahme der Schneedecke dar. Weil es seit den 1950er-Jahren im Winter seltener schneit, bildet sich vielerorts keine Schneedecke mehr. Deren Schmelzwasser aber versorgte im Frühjahr Mensch und Natur und fehlt mittlerweile flächendeckend, vor allem in Bergregionen sowie in der Tundra.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Die Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen werden vielerorts weiter zunehmen, wodurch das Hochwasser- und Überflutungsrisiko steigt. Zunehmen werden zudem die Dürrefahr und die Zahl der Regionen, die künftig häufiger und länger anhaltend von Dürre betroffen sein werden. Die Schneedecke wird vor allem auf der Nordhalbkugel weiter schrumpfen, mit der Folge, dass Flüsse und Bäche temperaturbedingt zu einem früheren Zeitpunkt Schmelzwasser führen werden und diese Wassermengen auch geringer ausfallen können.

Mehr Taifune und Hurrikane

AKTUELLER STAND: In den zurückliegenden vier Jahrzehnten hat der Anteil tropischer Wirbelstürme der Kate-

gorie drei bis fünf auf der Saffir-Simpson-Hurrikan-Windskala (Windgeschwindigkeiten von mehr als 178 Stundenkilometern) zugenommen, und es kommt häufiger vor, dass sich ein eher schwacher Sturm innerhalb kurzer Zeit zu einem echten Hurrikan entwickelt. Über dem Westatlantik ziehen tropische Wirbelstürme mittlerweile langsamer vom offenen Meer Richtung Land. Das heißt, die Wirbelstürme verweilen länger an ein und demselben Ort und richten in der Regel auch größere Schäden an. Über dem Nordpazifik haben die außertropischen Wirbelstürme ihre Zugbahnen nordwärts verlagert und treffen nun anderswo auf Land als noch vor 40 Jahren.

Der Klimawandel in Zahlen:

Die sieben Klima-Indikatoren der WMO

Das Ausmaß des Klimawandels wird in den Medien und in der Politik in erster Linie über den Anstieg der mittleren globalen Oberflächentemperatur kommuniziert. Dabei reicht diese eine Kenngröße allein gar nicht aus, um den Zustand und mögliche Veränderungen des Erdklimas umfassend zu beschreiben. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) hat deshalb im Jahr 2018 sieben Schlüsselindikatoren ausgewählt, anhand derer sie fortan die globalen Veränderungen des Klimas der breiten Öffentlichkeit und Entscheidungstragenden vermittelt. Dazu gehören:

- (1) die mittlere globale Oberflächentemperatur,
- (2) die zusätzlich vom Ozean aufgenommene Wärmemenge,
- (3) die mittlere Veränderung des globalen Meeresspiegels,
- (4) die Ausdehnung des Meereises in der Arktis und der Antarktis,
- (5) die Eismasseveränderungen des Grönländischen und des Antarktischen Eisschildes,
- (6) der mittlere globale pH-Wert des Meerwassers (Ozeanversauerung),
- (7) die mittlere Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre.

Jeder dieser Indikatoren wird mindestens einmal pro Jahr wissenschaftlich erfasst und seine Messdaten mit weltweit einheitlichen Methoden erhoben. Gemeinsam spiegeln sie Veränderungen in der Atmosphäre sowie im Energiehaushalt der Erde wider und geben eine erste Vorstellung vom aktuellen Zustand des Erdklimas. Außerdem lassen sich alle sieben Indikatoren mithilfe einfacher Zahlenwerte beschreiben. Die aktuellsten Werte der sieben Indikatoren veröffentlicht die WMO in ihrem jährlich erscheinenden Bericht zum Zustand des Klimas. Im Zeitraum 2021/2022 erreichten vier der sieben Indikatoren neue Höchstwerte. Das heißt, nie zuvor seit Beginn der Wetter- und Klimaaufzeichnungen waren die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, der Meeresspiegelanstieg, die Ozeanversauerung und der Wärmegehalt des Ozeans so hoch wie in den Jahren 2021 und 2022.

1.4 > Ein Eisberg, abgebrochen vom Grönländischen Eisschild. Seit dem Jahr 1996 verliert der Eispanzer Grönlands mehr Eis durch Oberflächenschmelze und das Kalben von Eisbergen, als sich durch die Verdichtung neuen Schnees bilden kann.

BLICK IN DIE ZUKUNFT: Forschende gehen davon aus, dass sich die Zahl der Wirbelstürme insgesamt kaum verändern wird. Allerdings wird in den tropischen Regionen der Anteil besonders starker und damit zerstörerischer Stürme weiter zunehmen.

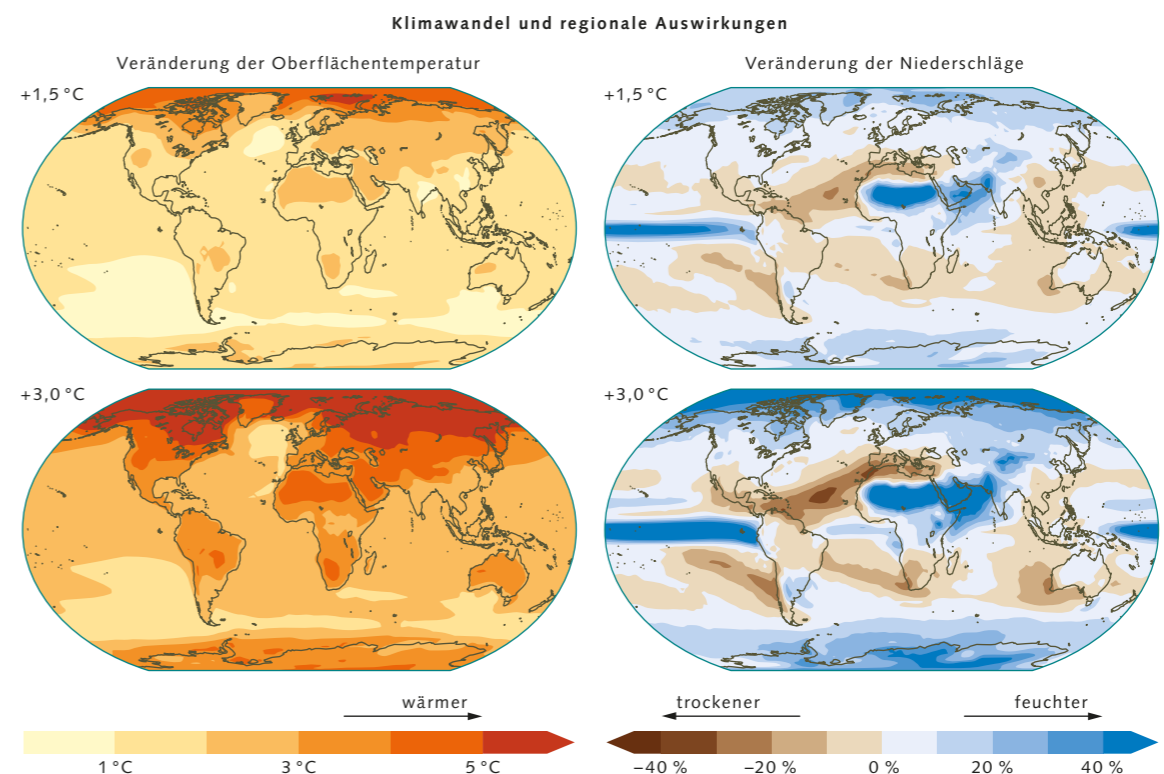
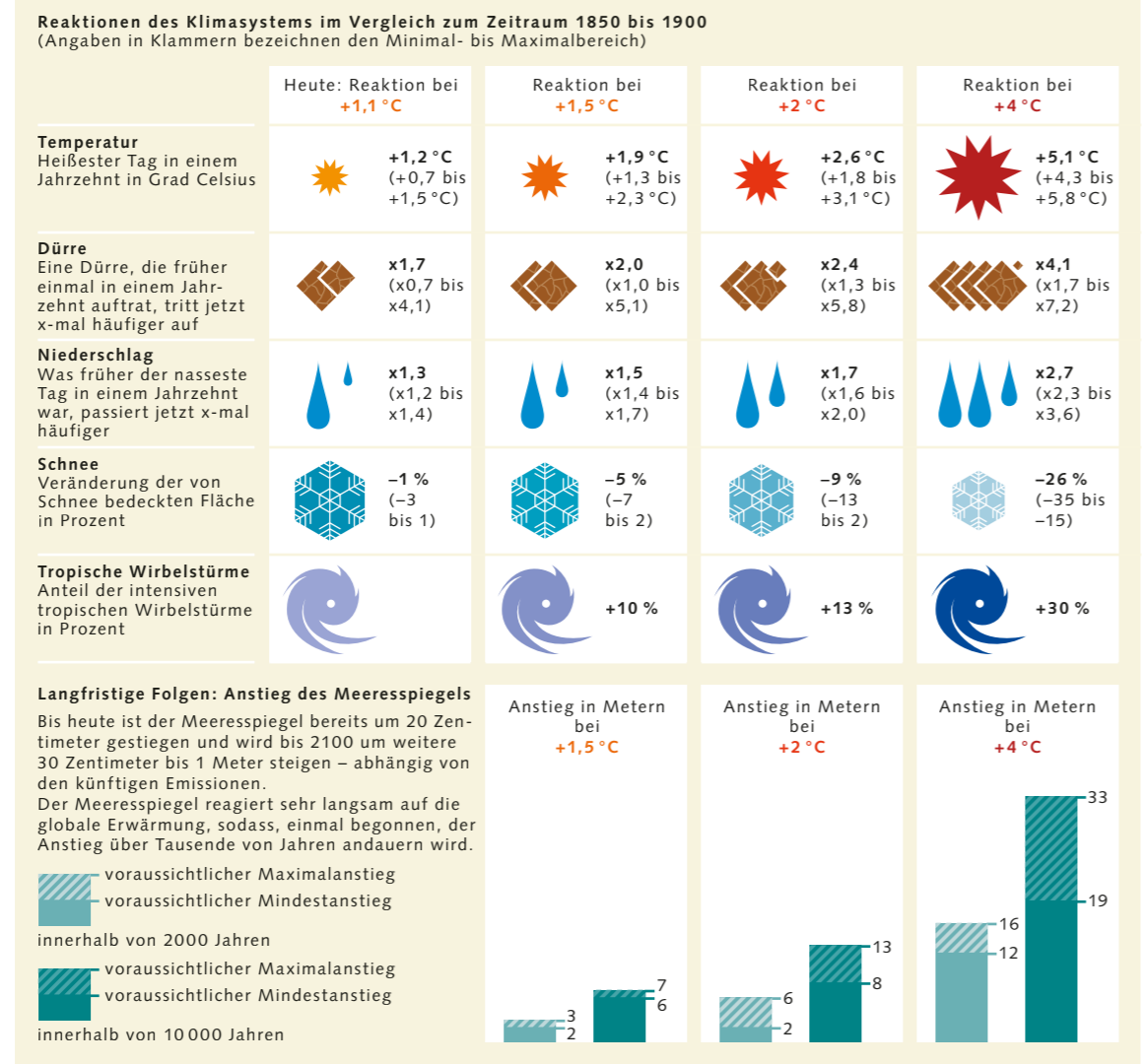
Wenn Extreme aufeinandertreffen

Im Zuge des Klimawandels wird die Welt nicht nur wärmer, Mensch und Natur sind auch immer häufiger Klima- und Wetterextremen ausgesetzt. Dazu gehören Hitzewellen, Starkregen, schwere Stürme, Dürren, Überflutungen

und Sturmfluten, die aufgrund der steigenden Meeresspiegel weite Küstengebiete überspülen. Immer häufiger kommt es dabei vor, dass zwei oder drei Wetterextreme gleichzeitig auftreten. In den zurückliegenden 100 Jahren wurden zum Beispiel mehr und mehr Hitzewellen beobachtet, die in Regionen auftraten, in denen zur gleichen Zeit bereits Dürre herrschte.

Überlagern sich solche Extreme, verstärken sich ihre Klimafolgen für Mensch und Natur. Das heißt, Dürre und Hitze richten gemeinsam viel größere Schäden an, als jedes Extremereignis für sich allein verursacht hätte. Das gilt nicht nur für die Kombination aus Hitze und Dürre,

1.5 > Viele Komponenten des Klimasystems reagieren schnell auf die globale Erwärmung – und je höher diese ausfällt, desto größer sind die Veränderungen. Andere Klimafolgen hingegen nehmen erst langsam Fahrt auf. Einmal in Gang gesetzt, lassen sie sich dann aber auch nicht mehr kurzfristig stoppen. Das prominenteste Beispiel: der Anstieg des Meeresspiegels.



1.6 > Der Klimawandel ruft nicht in allen Erdteilen die gleichen Veränderungen hervor. Stattdessen gibt es regionale Unterschiede, die mit zunehmender globaler Erwärmung immer deutlicher zum Vorschein treten. In den hohen Breiten, den Tropen und den Monsungebieten wird es beispielsweise mehr regnen, während die Subtropen weniger Niederschläge bekommen werden.

sondern auch für den Fall, dass Küstenregionen von schweren Stürmen heimgesucht werden, die sowohl eine Sturmflut (Meereshochwasser) als auch Starkregen (Überflutung an Land, Flusshochwasser) mit sich bringen. Gemeinsam führen Sturm, Sturmflut und Starkregen zu viel weiträumigeren Überflutungen als jedes Wetterextrem für sich allein genommen.

Die Gefahr, dass Extremereignisse gleichzeitig auftreten und sich gegenseitig in ihren Auswirkungen verstärken, steigt im Zuge des Klimawandels. Besonders gefährdet sind dabei flache Küstenregionen, die regelmäßig von Wirbelstürmen heimgesucht werden.

Die Folgen: Weitreichende Schäden für Mensch und Natur

Die physikalischen Klimaparameter bestimmen den großen Rahmen, innerhalb dessen Leben auf der Erde existieren kann. Verändern sich diese Parameter, wandeln sich nicht nur die Existenzbedingungen für Mensch und Natur, sondern auch für die vom Menschen erbaute Umwelt.

Schließlich halten auch Gebäude, Straßen, Stromnetze, Brücken und andere wichtige Infrastrukturen nur ganz bestimmten Umweltbedingungen stand. Die globale Erwärmung von 1,15 Grad Celsius hat bereits zu weitreichenden Schäden und Verlusten für Mensch und Natur geführt und jedes weitere Zehntelgrad Erwärmung wird das Schadensrisiko weiter erhöhen.

Die Aussagen des Weltklimarates zu den beobachteten und künftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die verschiedenen Formen des Lebens auf der Erde lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Eine Neuorganisation natürlicher Lebensgemeinschaften

Der Klimawandel führt zu drastischen und stetig zunehmenden Veränderungen in der Natur. Diese beeinflussen die Artenzusammensetzung der natürlichen Lebensgemeinschaften an Land, in Seen und Flüssen sowie im Meer und schwächen deren Funktions- und Widerstandsfähigkeit. Problematisch sind dabei sowohl langsam voranschreitende Veränderungen (Meeresspiegel, Ozeanversau-

erung) als auch die zunehmende Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen.

Steigende Temperaturen sowie Wetterextreme wie Dürren, Hitzewellen, Stürme, Starkregen und Überflutungen schaffen in allen Regionen der Welt klimatische Bedingungen, wie Tier- und Pflanzenarten sie seit Jahrtausenden noch nicht erlebt haben. Oft übersteigen die gemessenen Rekordtemperaturen schon heute die Belastungsgrenzen der Lebewesen. Hinzu kommt, dass die Wetterextreme mittlerweile so häufig auftreten, dass die Ökosysteme weniger oder gar keine Zeit mehr haben, sich von einem Hitzeschock zu erholen, bevor bereits der nächste folgt.

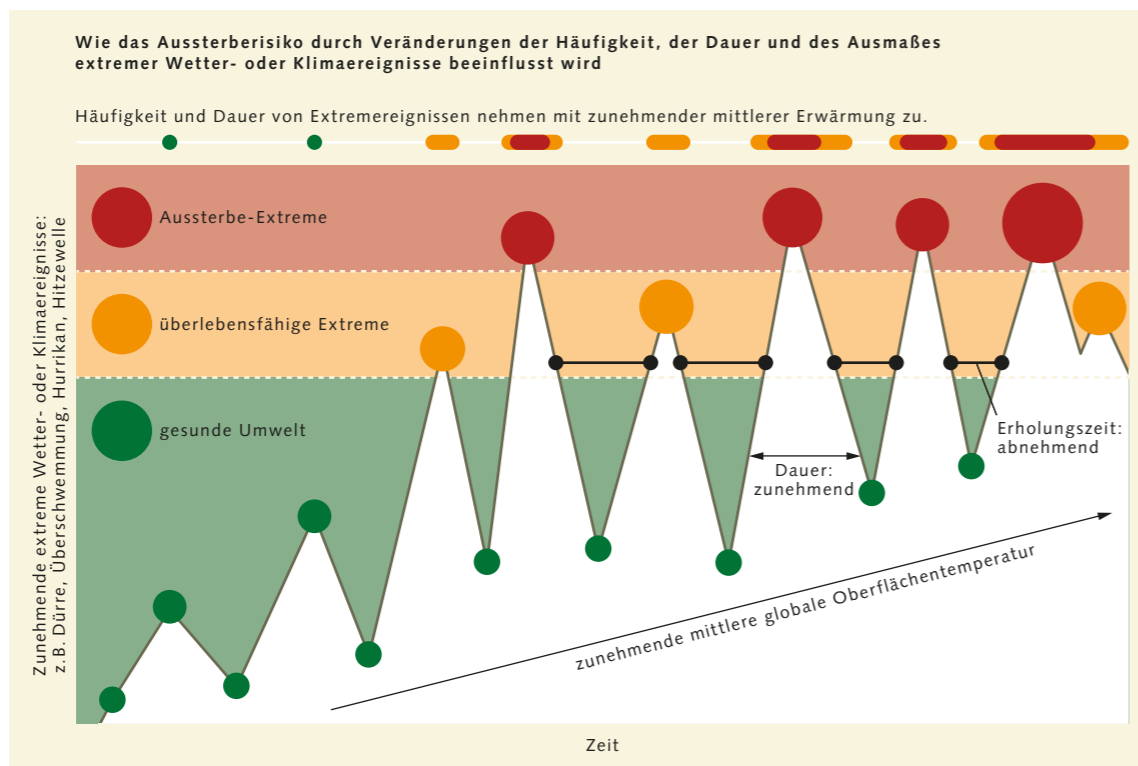
Tropische Korallenriffe beispielsweise benötigen mindestens zehn Jahre, um eine hitzebedingte Korallenbleiche zu überwinden. Betrachtet man jedoch das australische Great Barrier Reef, so hat dieses seit dem Jahr 2000 insgesamt sechs große Korallenbleichen erlebt, allein vier davon in den Jahren 2016 bis 2022. Bemerkenswert ist dabei, dass die Korallenbleiche im australischen Sommer 2021/22 die erste Bleiche unter La-Niña-Bedingungen war. Unter

diesen Umständen sind die Wassertemperaturen vor der Ostküste Australiens eigentlich kühler als normal. Dennoch zeigten 91 Prozent der Korallen im Great Barrier Reef Anzeichen großen Hitzestresses.

Weltweit sind seit dem Jahr 2009 rund 14 Prozent der Korallenriffe abgestorben. Das entspricht einer Rifffläche von 11 700 Quadratkilometern. Meereshitzewellen waren dabei die Hauptursache. Massensterben dokumentiert die Wissenschaft allerdings auch bei Bäumen, beispielsweise in borealen Wäldern und Mischwäldern im westlichen Nordamerika. Dürre- und hitzegeplagt gehen sie an Krankheiten oder Schädlingen zugrunde, fallen Waldbränden zum Opfer oder aber vertrocknen.

Neue Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels sowie ein besseres Verständnis der natürlichen Prozesse lassen den Weltklimarat außerdem zu dem Schluss kommen, dass der Umfang und die Größenordnung der Klimafolgen für die Natur viel größer sind, als man in der Vergangenheit angenommen hat. Die meisten klimabedingten Veränderungen, die wir heute bereits sehen, treten schneller auf, als es noch vor 20 Jahren vorhergesagt

1.7 > Die zunehmende Häufigkeit und Intensität der Extremereignisse stellen eine echte Gefahr für Tiere und Pflanzen dar. Je öfter eine einzelne Art oder ein ganzes Ökosystem von einem Extremereignis betroffen ist und je weniger Zeit die Lebewesen haben, sich von diesem Schock zu erholen, desto höher ist das Risiko, dass sie lokal aussterben.



worden ist. Sie richten weitaus mehr Schaden an und betreffen viel größere Gebiete.

Im Zuge des Klimawandels verschiebt sich zum Beispiel der biologische Kalender vieler Lebensgemeinschaften, sodass ehemals fein aufeinander abgestimmte Ereignisse oder Abläufe nicht mehr zueinanderpassen. Im Meer beispielsweise blühen Algen jetzt früher, als Fischlarven aus dem Ei schlüpfen, denen sie eigentlich als Nahrung dienen. Ist der Fischnachwuchs dann endlich so weit entwickelt, dass er auf Futtersuche gehen kann, ist die Algenblüte längst abgeklungen. An Land wachen Winterschläfer verfrüht aus ihrer Winterruhe auf und suchen dann vergeblich nach Essbarem. Bäume und Blumen blühen, bevor Insekten sie bestäuben können, und Vogelküken reißen zu einem Zeitpunkt hungrig ihre Schnäbel auf, an dem die Elternpaare kaum noch ausreichend Insekten finden.

Um der zunehmenden Wärme zu entkommen, verlassen Tiere und Pflanzen auf der ganzen Welt ihre angestammten Lebensräume oder aber sterben lokal aus. Rund die Hälfte der Abertausend untersuchten Arten zei-

gen entsprechende Reaktionen. Meeresbewohner wandern polwärts oder in größere Tiefe ab, in der Hoffnung, dort die gewohnten Umgebungstemperaturen zu finden. Dabei verlagern sie ihre Lebensräume mittlerweile mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 59 Kilometern pro Jahrzehnt. Die Meereseerwärmung ist jedoch nicht der einzige Stressfaktor, der auf Tiere und Pflanzen einwirkt. Die Lebensbedingungen verschlechtern sich auch durch die zunehmende Versauerung und Sauerstoffarmut der Meere. Gemeinsam haben alle drei Faktoren in den zurückliegenden 50 Jahren zu einer Neuorganisation des Lebens im Meer geführt, auch und insbesondere an der Meeresoberfläche.

Lebewesen an Land ziehen ebenfalls Richtung Pol oder aber in höhere Lagen. Organismen, die nur langsam oder gar nicht Reißaus nehmen können, laufen Gefahr, zumindest lokal auszusterben. Das gilt für die Lebensgemeinschaften auf den Kontinenten ebenso wie für jene im Meer. Besonders geringe Überlebenschancen haben Organismen, die entweder in geografisch eng begrenzten Lebensräumen wie Tümpeln und Seen leben und somit



1.8 > Eine Korallenkolonie vor der Korallenbleiche (rechts) und danach (links). Wird das Wasser zu warm, stoßen die Korallen ihre Algen, die sie mit Nahrung versorgen, ab und verlieren deshalb ihre Farbe. Dauert dieser Zustand länger an, verhungert die Koralle.

keine Chance zur Abwanderung haben, oder diejenigen, die an die kalten Lebensbedingungen der Polar- und Hochgebirgsregionen angepasst sind. Diese Kälte-Spezialisten werden künftig kaum noch geeignete Rückzugsräume auf der Erde finden.

Erschwerend zu all dem kommt hinzu, dass die Folgen des Klimawandels für Natur und Artenvielfalt einhergehen mit anderen vom Menschen verursachten Stressfaktoren. Dazu gehören in erster Linie die weiträumige Zerstörung natürlicher Lebensräume durch das Abholzen von Wäldern, das Trockenlegen von Feuchtgebieten, die Verbauung der Küsten, das Überfischen der Meere und der Abbau von Rohstoffen. Eine wichtige Rolle spielen aber auch die Umweltverschmutzung, die unkontrollierte Flächenversiegelung sowie die Ausbreitung eingeschleppter Arten. Wo immer sich diese Stressfaktoren überlagern, verstärken sie sich gegenseitig in ihren Auswirkungen und schwächen die Widerstandskraft der natürlichen Ökosysteme. Der Klimawandel stellt somit für viele Lebensgemeinschaften einen Gefahrenmultiplikator dar. Mit zunehmender Erwärmung wird dieser für viele von ihnen sogar zu einer tödlichen Bedrohung. Denn eines steht fest: Mit jedem Zehntelgrad Erwärmung steigen die Auswirkungen und Klimarisiken für die Ökosysteme an Land und im Meer.

Die Weltmeere beispielsweise steuern infolge des Zusammenwirkens von Klimawandel und der Übernutzung des Meeres durch den Menschen auf ein Massenaussterben zu. Es wäre das sechste der jüngeren Erdgeschichte. Neue Forschung belegt: Sollten die Temperaturen in Atmosphäre und Meer weiter ansteigen, werden die Artenverluste infolge von Hitzestress und Sauerstoffmangel im Meer innerhalb der kommenden 75 Jahre genauso groß sein wie die Verluste durch Überfischung, Verschmutzung und Lebensraumzerstörung. In der Summe würden bei einem globalen Temperaturanstieg von bis zu 4,9 Grad Celsius bis zum Ende dieses Jahrhunderts so viele marine Arten aussterben, dass die Definitionsbedingungen eines Massenaussterbens erfüllt sind.

Besonders hoch wäre die Aussterberate dabei in den Polarregionen, weil sich die kälteadaptierten Organismen in Anbetracht der Geschwindigkeit der Veränderungen kaum anpassen können. Den höchsten Vielfaltsrückgang

aber würden die heute noch artenreichen Tropen verzeichnen. Deren Bewohner leben schon heute an ihrer oberen Temperaturgrenze. Die Forschung aber zeigt auch: Gelingt es, die Erderwärmung auf unter zwei Grad Celsius zu begrenzen, sinkt die Gefahr eines Massenaussterbens deutlich.

Gefahrenmultiplikator Klimawandel

Die Umwälzungen in der Natur haben weitreichende Auswirkungen auf uns Menschen. Stück für Stück versagen uns die Ökosysteme ihre elementar wichtigen Dienste (Ökosystemleistungen). Getreide, Obstbäume und andere Nutzpflanzen werden nicht mehr umfassend bestäubt; Rinder, Schafe und Ziegen finden nicht mehr ausreichend zu fressen; Küstenfischer holen vor allem in den warmen, tropischen Regionen immer öfter leere Netze ein, weil die Fischschwärme in kühlere Regionen abwandern. Außerdem werden Wasser und Luft in geringerem Umfang gereinigt, die Küsten weniger wirksam vor Erosion geschützt, beliebte Urlaubsorte verlieren mit den Wäldern, schneebedeckten Berghängen oder Korallenriffen ihre Hauptattraktionen. Parallel dazu leidet die psychische Gesundheit vieler Menschen, die im Wald spazieren gehen oder aber an das Meer fahren, um sich zu erholen. Kurz gesagt: Je umfassender sich die Ökosysteme verändern, desto mehr seiner Lebensgrundlagen verliert der Mensch.

Wasser: Entweder viel zu viel oder viel zu wenig

Die Auswirkungen des Klimawandels treffen uns Menschen und die von uns gebaute Umwelt aber auch unmittelbar: Mit der zunehmenden Häufigkeit von Starkregenereignissen steigt zum Beispiel das Hochwasserrisiko entlang von Flüssen in einigen Regionen der Welt. Das Schadenspotenzial solcher Naturkatastrophen ist Berechnungen zufolge in einer vier Grad Celsius wärmeren Welt vier- bis fünfmal höher, als wenn es gelingen würde, die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Doch selbst in einer 1,5 Grad Celsius wärmeren Welt werden mehr Menschen ihr Leben und ihr Hab und Gut an Hochwasser verlieren, als es aktuell noch der Fall ist. In Kolumbien, Brasilien und Argentinien beispielsweise würde die Zahl der von Flusshochwassern betroffenen Menschen

um 100 bis 200 Prozent zunehmen; in Ecuador betrüge dieser Anstieg 300 Prozent, in Peru sogar 400 Prozent.

Die steigenden Frühlings- und Wintertemperaturen wiederum führen zu einer verfrühten Schneeschmelze in den Gebirgen und somit zu Veränderungen der gewohnten Wasserstände in Gebirgsbächen und -flüssen. Für uns Menschen bedeutet diese Entwicklung, dass die Flüsse unter Umständen zu jenen Zeiten viel Wasser führen, wenn es kaum gebraucht wird, später im Jahr aber die Flusspegel zu niedrig sind, als dass die benötigte Menge entnommen werden kann.

Schon heute leidet mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung pro Jahr mindestens einen Monat lang unter akuter Wasserknappheit, die zumindest in Teilen vom Klimawandel verursacht wird – etwa durch extreme Trockenheit oder aber durch Überflutungen, Stürme und Starkregenereignisse, deren Folgen ebenfalls die Trinkwasserversorgung vielerorts gefährden. Besonders betroffen sind Dörfer, Städte und Gemeinden, deren Bewohner auf das Schmelzwasser der schrumpfenden Berggletscher angewiesen sind, sowie Menschen, die in Gebieten wohnen, in denen es keine zentrale Wasserversorgung gibt. Treten hier Flüsse über ihre Ufer oder versiegt eine natürliche Quelle aufgrund von Dürre, stehen oftmals Abertausende ohne Trinkwasser da.

Neben der Landwirtschaft, dem größten Wasserverbraucher der Welt, trifft die Wasserknappheit auch den Energiesektor: Seit den 1980er-Jahren hat die weltweit durch Wasserkraft erzeugte Strommenge aufgrund sinkender Wasserpegel und Durchflussmengen um vier bis fünf Prozent abgenommen. Stellenweise droht Wasserkraftwerken wegen Wassermangels sogar die Abschaltung. Wie ernst die Lage werden kann, zeigte bis zum Winter 2022/23 die Situation am Lake Powell, dem zweitgrößten Stausee der USA. Er liegt direkt auf der Grenze der beiden US-Bundesstaaten Utah und Arizona, wird durch den Colorado River gespeist und versorgt gemeinsam mit dem weiter flussabwärts liegenden Stausee Lake Mead rund 40 Millionen Menschen mit Trinkwasser. Gleichzeitig entnehmen Farmen entlang des gesamten Flusslaufes Wasser, um ihre Felder und Plantagen zu bewässern. Nach 22 Jahren Dürre im Westen der USA und einer stets zu hohen Wasserentnahme aus dem Colorado River war der Stausee Ende März 2022 nur noch zu

24 Prozent gefüllt. Sein Wasserpegel fiel allein im Zeitraum von 2019 bis 2022 um mehr als 30 Meter und damit fast unter einen kritischen Grenzwert, ab dem das Wasserkraftwerk am Staudamm des Sees keine Elektrizität mehr erzeugen kann. Die zuständige Bundesbehörde entschied deshalb, im weiteren Jahresverlauf weniger Wasser aus dem See abzulassen als gewöhnlich und weiter flussaufwärts die Stautore eines weiteren Reservoirs zu öffnen. Dadurch sollen zusätzliche Wassermassen in den Stausee geleitet werden. Die Dürre im Westen der USA zog sich über 22 Jahre und gilt mittlerweile als trockenste Periode der zurückliegenden 800 Jahre.

Ernährung: Harte Zeiten für Ackerbau, Tierhaltung und Aquakultur

Wo es viel zu viel oder mittlerweile nicht mehr zur richtigen Jahreszeit regnet, wird es schwieriger, Ackerbau zu betreiben und Nutztiere zu halten. Nach Angaben des Weltklimarates erleben Land- und Forstwirte, Fischer und Aquakulturfarmen weltweit schon heute so weitreichende negative Auswirkungen des Klimawandels, dass sie nicht mehr ausreichend Grundnahrungsmittel und Holz produzieren können, um die Bedürfnisse aller Menschen zu decken.

Die zunehmende Hitze und Trockenheit lassen Getreide und Tierfutter auf den Feldern verdorren, Krankheiten breiten sich aus. Im Meer fällt es Fischerfamilien aufgrund der zunehmenden Ozeanversauerung, steigender Wassertemperaturen und vieler Algenblüten (durch Überdüngung) immer schwerer, Muscheln und andere Meeresfrüchte großzuziehen. Gleichzeitig wird es im Zuge der Erwärmung immer aufwendiger und damit teurer, verderbliche Lebensmittel wie Obst und Gemüse sicher zu transportieren, zu lagern, zu verkaufen und auch zu Hause noch für ein paar Tage aufzubewahren. Der Klimawandel trifft somit nicht nur die Erzeuger, sondern die gesamte Handelskette bis hin zum Endkunden – und gefährdet auf diese Weise die Ernährungssicherheit auf der ganzen Welt.

Besonders groß fallen die Verluste aus, wenn Regionen von Extremereignissen wie Dürren, Überflutungen und Hitzewellen getroffen werden. Die Häufigkeit solcher plötzlichen Ernte- oder Produktionsausfälle an Land und im Meer hat seit den 1950er-Jahren stetig zugenommen

Massenaussterben
Von einem Massenaussterben spricht die Wissenschaft, wenn in einem Zeitraum von zumeist weniger als zwei Millionen Jahren mehr als 75 Prozent der Tier- und Pflanzenarten aussterben und ihre Rollen im Ökosystem nicht zeitnah wieder durch neue oder andere Arten ersetzt werden. In den zurückliegenden 540 Millionen Jahren war dies bereits fünfmal nachweislich der Fall, wobei sich die einzelnen Ereignisse über Zeitspannen von bis zu mehreren Millionen Jahren erstreckten.

und führt vielerorts zu Dominoeffekten. Wenn Ernten ausfallen, verlieren Bauernfamilien ihre Nahrungs- und Einkommensgrundlage. Gleichzeitig sind weniger Grundnahrungsmittel verfügbar, weshalb die Preise steigen und sich vor allem einkommensschwache Familien wichtige Nahrungsmittel nicht mehr leisten können. Die Folgen sind Hunger und Mangelernährung, unter denen vor allem Kinder gesundheitlich leiden. Entsprechende Entwicklungen lassen sich unter anderem in Asien, Zentral- und Mittelamerika, in den Regionen südlich der Sahara, in der Arktis sowie in den kleinen Inselstaaten beobachten – und abermals treffen die Auswirkungen des Klimawandels die Kleinbauern und Kleinfischer besonders hart.

Mit zunehmender Erwärmung wird sich die Situation zuspitzen – unter anderem, weil bei größerer Wärme mehr Wasser über die Blätter und aus dem Boden verdunstet. Das heißt, der Wasserbedarf der Landwirtschaft wird weiter zunehmen. Da gleichzeitig in vielen Regionen deutlich weniger Wasser in der Wachstumsperiode zur Verfügung stehen wird, vervielfachen sich die Risiken entsprechend. Drei Beispiele:

- Sollte sich die Welt bis zum Jahr 2100 um zwei Grad Celsius erwärmen, steigt die Wahrscheinlichkeit extremer Dürren in großen Teilen des nördlichen Südamerikas, im Mittelmeerraum, im Westen Chinas sowie in den hohen Breiten Europas und Nordamerikas um 150 bis 200 Prozent.
- Waren im Zeitraum von 1981 bis 2005 etwa 40 Prozent der landwirtschaftlichen Flächen (rund 3,8 Millionen Quadratkilometer) von Wasserknappheit betroffen, werden es einer neuen Studie zufolge bis zum Jahr 2050 mehr als 80 Prozent sein – selbst dann, wenn sich die Erde bis 2050 nur um 1,6 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit erwärmen sollte.
- Im selben Zeitraum werden allein die Folgen des Klimawandels dazu führen, dass voraussichtlich acht bis 80 Millionen Menschen in Südasien, Zentralamerika und südlich der Sahara nicht mehr ausreichend zu essen haben und Hunger leiden werden. Ihre genaue Zahl hängt vom Erwärmungsniveau und damit vom Ausmaß des künftigen Klimawandels ab.

Gesundheit: Die Grenze des menschlich Erträglichen

Die Folgen des Klimawandels beeinträchtigen sowohl die physische als auch die psychische Gesundheit von Menschen in allen Regionen der Welt. Über starke psychische Belastungen klagen vor allem Menschen, die extremen Wetterereignissen ausgesetzt oder aber währenddessen als Rettungskräfte im Einsatz waren. Ferner diejenigen, die infolge des Klimawandels ihren Lebensunterhalt verlieren oder sogar ihr Zuhause, ihre Heimat oder aber kulturelle Werte aufgeben müssen. Die physische Gesundheit wird vor allem durch Hitzeextreme beeinträchtigt. Steigende Lufttemperaturen sowie heißere und länger andauernde Hitzewellen haben weltweit zu mehr Erkrankungen und einer erhöhten Sterblichkeit geführt, auch in den mittleren Breiten. Leidtragende sind vor allem Alte und Kranke sowie im Freien arbeitende Menschen. Letztere verdienen überdies vielerorts kein Geld, wenn extreme Hitze die Arbeit auf Feldern oder Baustellen unmöglich macht.

Besonders gefährlich wird extreme Wärme, wenn sie zusammen mit sehr hoher Luftfeuchtigkeit auftritt. Ist die Luft nämlich so feucht, dass Wasser und demzufolge auch Schweiß nicht mehr richtig verdunsten können, versagt die körpereigene Kühlung des Menschen. Unser Körper heizt sich dann mehr und mehr auf, bis irgendwann der Kreislauf kollabiert. Im Extremfall droht dann sogar der Hitzetod.

Die Hitzetoleranz-Grenze des Menschen kann mithilfe der sogenannten Kühlgrenztemperatur bestimmt werden. Sie berücksichtigt sowohl die Umgebungstemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit. Bislang ging man davon aus, dass ein gesunder Mensch eine Kühlgrenztemperatur von 35 Grad Celsius nicht viel länger als sechs Stunden überleben kann. Diese Grenze ergibt sich aus der Kombination von Temperatur und Luftfeuchte und entspricht 35 Grad Celsius bei 100 Prozent Luftfeuchte oder 46 Grad Celsius bei 50 Prozent Luftfeuchtigkeit.

Als Forschende der US-amerikanischen Pennsylvania State University diese Annahme nun erstmals in Belastungsexperimenten überprüft, stellte sich heraus, dass die theoretisch gezogene Grenze viel zu hoch angesetzt war. In Klimakammern mit hoher Luftfeuchtigkeit reichte schon eine Raumtemperatur von 30 bis 31 Grad Celsius

aus, um die Körper-Kerntemperatur junger, gesunder Testpersonen gefährlich ansteigen zu lassen. Entgegen aller Erwartungen führte auch ein leichtes Absinken der Luftfeuchtigkeit nicht zu einer steigenden Hitzetoleranz der Probanden. Stattdessen lag die kritische Kühlgrenztemperatur unter diesen Bedingungen sogar bei 25 bis 28 Grad Celsius und damit fast zehn Grad niedriger als bis dato in der Wissenschaft angenommen. Als Grund führte das Forscherteam an, die Probanden hätten trotz geringerer Luft-

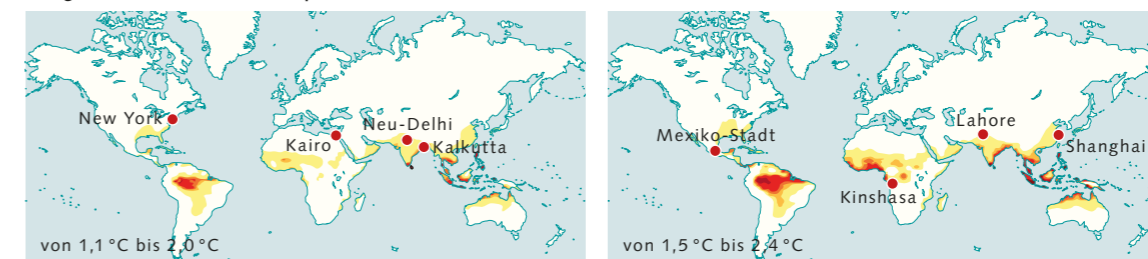
feuchtigkeit ihre Schweißproduktion ab einem bestimmten Temperaturwert nicht weiter erhöht.

Angesichts des fortschreitenden Klimawandels sind diese Forschungsergebnisse besorgniserregend. Sie zeigen, dass die Hitzegefahr für Menschen bislang unterschätzt wurde und es mit zunehmender globaler Erwärmung immer mehr Regionen geben wird, in denen der Hitzestress zeitweise so groß sein wird, dass man ihn ohne zusätzliche Kühlung nicht überleben wird.

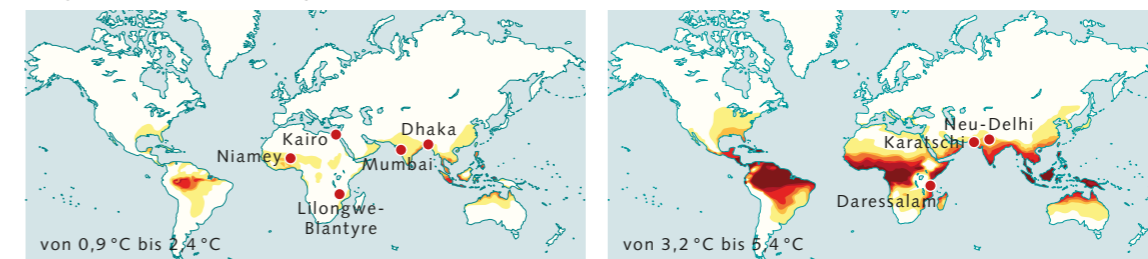
Dauer der Hyperthermiephasen infolge extremer Hitze und Luftfeuchtigkeit



Dauer der Hyperthermiephasen infolge extremer Hitze und Luftfeuchtigkeit bei einem Anstieg der globalen Oberflächentemperatur Mitte des 21. Jahrhunderts (2050)



Dauer der Hyperthermiephasen infolge extremer Hitze und Luftfeuchtigkeit bei einem Anstieg der globalen Oberflächentemperatur Ende des 21. Jahrhunderts (2100)



1.9 > Trifft extreme Hitze auf hohe Luftfeuchtigkeit, können Menschen schnell überhitzt – ein lebensgefährlicher Zustand. Diese Grafik des Weltklimarates zeigt, in welchen Regionen der Erde Menschen künftig an wie vielen Tagen im Jahr unter „Hyperthermie“, so der Fachausdruck, leiden werden. Die Kernaussage: Je schneller der Klimawandel gebremst wird, desto weniger Menschen werden dieser Lebensgefahr ausgesetzt sein.

Besonders schwierig dürfte die Situation langfristig für all jene Menschen werden, die in den Millionenstädten der Tropen und Subtropen leben. Zum einen sind dort die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit nahezu das ganze Jahr hindurch hoch; zum anderen kommt der sogenannte Wärmeinseleffekt zum Tragen. Er besagt, dass sich am Tag die Luft in städtischen Ballungsräumen stärker erwärmt als in deren unbebauter Umgebung. Nachts kühlt sie zudem weniger schnell ab. Daraus folgt, dass es in den Millionenstädten der Tropen und Subtropen nur eines vergleichsweise kleinen Temperatursprungs bedarf, um die innerstädtische Lufttemperatur so weit in die Höhe zu treiben, dass sie die Hitzetoleranz-Grenze vieler Menschen überschreitet.

Hinweise darauf, dass Stadtbewohner in der Regel viel höheren Temperaturen ausgesetzt sind, als sie für eine Region angegeben sind, existieren mittlerweile viele. Als zum Beispiel Indien und Pakistan im Mai 2022 von einer schweren Hitzewelle mit Tageshöchsttemperaturen von bis zu 51 Grad Celsius getroffen wurden, war es in Indiens Hauptstadt Neu-Delhi und in benachbarten Städten auch mitten in der Nacht noch 35 bis 39 Grad Celsius heiß,

während sich die Luft über den umliegenden Feldern und Wäldern auf erträgliche 15 Grad Celsius abgekühlt hatte. Anschließende Analysen eines internationalen Forscherteams ergaben: Der menschengemachte Klimawandel hatte die Wahrscheinlichkeit einer solchen Rekord-Hitzewelle verdreißigfacht.

Der Klimawandel ermöglicht aber auch eine Ausbreitung vieler Infektionskrankheiten. Dürren zum Beispiel erhöhen das Risiko, dass Brunnen versiegen, extreme Niederschläge dagegen, dass sie geflutet oder verschmutzt werden. Pumpen die Menschen ihr Trinkwasser in beiden Fällen aus verunreinigten Quellen, steigt die Gefahr, an bakteriellen Infektionskrankheiten wie Cholera zu erkranken. Die zunehmende Wärme ermöglicht es *Aedes*-Stechmücken, ihr Verbreitungsgebiet von den Tropen aus Richtung Norden und Süden auszuweiten. Die Insekten übertragen unter anderem Dengue- und Gelbfieberviren. Das Risiko, an Denguefieber zu erkranken, steigt bereits weltweit. Infolge von Waldbränden, die mittlerweile häufiger auftreten und größere Flächen betreffen, nimmt in den betroffenen Regionen die Gefahr von Atemwegs-erkrankungen zu.

Meeresspiegel: Land unter!

Infolge der steigenden Meeresspiegel werden sich die Klimarisiken für Mensch, Natur und gebaute Strukturen in den Küstenregionen der Welt bis zum Jahr 2100 mindestens verzehnfachen, vor allem weil extrem hohe Fluten häufiger auftreten werden. Besonders gefährlich werden die steigenden Pegel den Abermillionen Menschen, die in niedrig gelegenen Küstenregionen sowie auf kleinen Inseln leben. Steigende Meeresfluten zerstören die artenreichen Ökosysteme im Gezeitenbereich, versalzen Grundwasserreservoirs und überspülen große Landflächen – Küstenwälder und Ackerland ebenso wie die küstennahen Stadtteile vieler Küstenmetropolen. Deren unkontrolliertes Wachstum trägt dazu bei, dass die stetig steigenden Meeresspiegel über die Zeit betrachtet immer mehr Menschen gefährden. In Afrika beispielsweise werden bereits im Jahr 2030 zwischen 108 und 116 Millionen Menschen in Regionen mit hohem Überflutungsrisiko leben. Im Jahr 2000 waren es nur 54 Millionen.

Global betrachtet liegt die Zahl der Betroffenen um ein Vielfaches höher: Nach Angaben des Weltklimarates



1.11 > Bunte Collage auf der Titelseite des sechsten Weltklimaberichts zu Klimafolgen, Anpassung und Verwundbarkeit. Erschienen ist er im Februar 2022. Seine wichtigste Botschaft: Die Menschheit weiß, was zu tun ist, um die Folgen des Klimawandels zu mindern. Was fehlt, ist entschlossenes Handeln weltweit.

1.10 > *Aedes*-Stechmücken werden auch Gelbfieber- oder Denguemücken genannt, denn sie übertragen beide Krankheiten. Im Zuge des Klimawandels wächst ihr Verbreitungsgebiet. Ursprünglich nur in den Tropen und Subtropen beheimatet, kommen die Insekten jetzt auch weiter nördlich und südlich vor.



werden im Jahr 2050 weltweit mehr als eine Milliarde Menschen in Küstenstädten und küstennahen Ballungszentren mit einem hohen Überflutungsrisiko leben. Ihnen drohen nicht nur wiederkehrende Sturmfluten, sondern auch die dauerhafte Überflutung ihrer Dörfer und ihrer Stadtteile.

Klimaanpassung: Die Welt ist unvorbereitet

Um die Folgen und Risiken des Klimawandels zu reduzieren, müssen sich Mensch und Natur an die neuen Umweltbedingungen anpassen. Für uns Menschen bedeutet das in erster Linie, Maßnahmen zu ergreifen, die unser Leben sowie unser Hab und Gut vor hohen Temperaturen, Wetterextremen und steigenden Meeresspiegeln schützen. Gelingen kann das, indem wir aus gefährdeten Regionen wegziehen oder aber unser Leben vor Ort verändern – beispielsweise indem wir Siedlungen und Städte begrünen, um den Wärmeinseleffekt zu minimieren, oder indem wir mit Wasser so sparsam haushalten, dass unsere Reserven auch für Dürrezeiten reichen.

Die Liste der Lösungsvorschläge ist lang. Dennoch kommt der Weltklimarat zu dem Schluss, dass weltweit bisher weitaus weniger Schutzvorkehrungen geplant und umgesetzt wurden, als notwendig sind, um alle Menschen wirkungsvoll und nachhaltig zu schützen. Dabei ist das Bewusstsein für die zunehmenden Gefahren durchaus gestiegen. Mehr als 170 Staaten und viele Städte haben mittlerweile Pläne zur Klimaanpassung aufgestellt. Unternehmen und Akteure der Zivilgesellschaft setzen sich ebenfalls für mehr Anpassung ein. Vielerorts werden auch Pilotprojekte durchgeführt. Diese aber zielen oft nur darauf ab, das lokale Sturm-, Flut-, Hitze- oder Dürreerisiko zu minimieren, und führen daher nur zu kleinen Veränderungen mit regional und zeitlich begrenzter Wirksamkeit.

Um den drohenden Klimagefahren langfristig trotzen zu können, bedarf es ganzheitlicher Konzepte und grundlegender Anpassungen in unserer Lebensweise, wie wir arbeiten, wie wir unsere Nahrung erzeugen und die Natur behandeln und wie wir unsere Städte und Siedlungen planen und bauen. Derzeit, so das Fazit des Weltklimarates, sei die Menschheit vollkommen unvorbereitet auf all das,

Das Klima-Gerechtigkeitsproblem: Die größte Last tragen die Armen

Der Klimawandel stellt die Menschheit vor ein wachsendes Gerechtigkeitsproblem. Unter den Folgen globaler Erwärmung und zunehmender Extremereignisse leiden nämlich vor allem einkommensschwache und gesellschaftlich ausgegrenzte Bevölkerungsgruppen. Für sie stellt der Klimawandel oftmals ein existenzielles Problem dar, denn er multipliziert ihre ohnehin schon großen wirtschaftlichen, sozialen und gesundheitlichen Sorgen und Probleme um ein Vielfaches. Die erhöhte Verwundbarkeit einkommensschwacher und gesellschaftlich ausgegrenzter Bevölkerungsgruppen für Klimagefahren speist sich aus drei Quellen:

- Die Ärmsten leben in der Regel in Gebieten, in denen sie Wetterextremen und anderen Naturgefahren im besonderen Maß ausgesetzt sind. Dazu zählen Slums entlang von Flussläufen (Hochwassergefahr), illegal erbaute Häuserzüge an Berghängen (Erdbehrtschgefahr nach Starkregen) oder auch Siedlungen ohne alte Baumbestände, die in extrem heißen Phasen Schatten und Kühlung spenden könnten.
- Einkommensschwachen Familien fehlen häufig das Geld und zumeist auch die infrastrukturellen Voraussetzungen, um Klima- und Wetterextremen erfolgreich trotzen zu können. Dazu gehören eine stabile Energie- und Trinkwasserversorgung, Zugang zu sanitären Einrichtungen und Schutzräumen, eine gute Gesundheitsversorgung sowie eine verlässliche Versorgung mit allen wichtigen Grundnahrungsmitteln. Zudem arbeiten einkommensschwache Bevölkerungsgruppen sehr häufig in Berufsfeldern, in denen sowohl ihr Verdienst als oft auch ihre Nahrungsmittelversorgung stark vom Klima abhängen – so zum Beispiel in der Landwirtschaft oder in der Fischerei.
- Einkommensschwache und gesellschaftlich ausgegrenzte Bevölkerungsgruppen werden in politische Entscheidungsprozesse häufig nicht mit einbezogen und ihre Bedürfnisse werden wenig oder gar nicht berücksichtigt. Der Weltklimarat kommt unter anderem zu dem Schluss, dass in einkommensschwachen Gebieten die Kluft zwischen den notwendigen Maßnahmen zur Klimaanpassung auf der einen und den tatsächlich umgesetzten Maßnahmen auf der anderen Seite deutlich größer ist als in jenen Gegenden, in denen Menschen mit höherem Einkommen leben.

Weltweit leben mittlerweile 3,3 bis 3,6 Milliarden Menschen in Gebieten mit einer besonders hohen Anfälligkeit für die Folgen des Klimawandels. Was das heißt, zeigen unter anderem die Sterblichkeitsraten: In Regionen mit hoher Verwundbarkeit für die Folgen des Klimawandels starben

im zurückliegenden Jahrzehnt zum Beispiel 15-mal mehr Menschen an den Folgen von Stürmen, Überflutungen und Dürren als in Ländern mit geringerer Klimaverwundbarkeit. Gleichzeitig sind einkommensschwache Menschen vergleichsweise häufiger extremer Hitze ausgesetzt, eben weil sie als Bauern, Landschaftsgärtner, Bauarbeiter oder Handwerker viel im Freien arbeiten.

Anpassung und Teilhabe:

Die Widerstandskraft verwundbarer Gruppen stärken

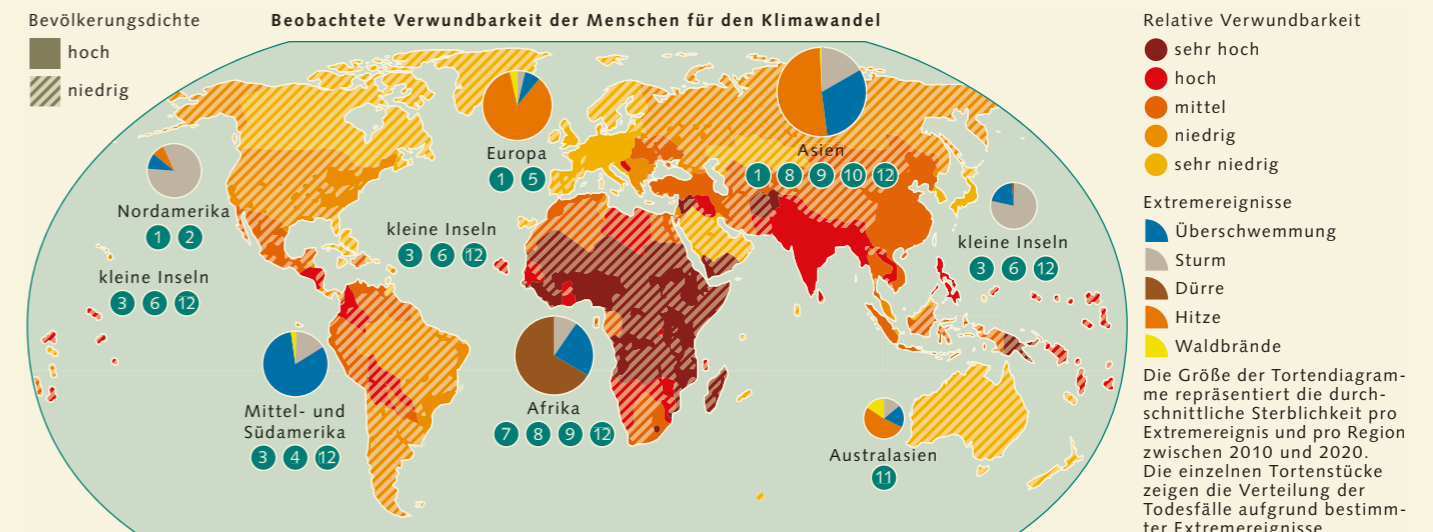
Basierend auf diesen Erkenntnissen hat der Weltklimarat ein Konzept für eine klimaresiliente Entwicklung erstellt, welches vorwiegend auf die Bedürfnisse der besonders gefährdeten Bevölkerungsgruppen eingeht. Im Kern kombiniert dieses Konzept Strategien zur Klimaanpassung und Treibhausgasreduktion so geschickt miteinander, dass gleichzeitig auch viele andere gesellschaftliche Herausforderungen angegangen werden können – etwa der Kampf gegen Hunger und Armut und gegen die Benachteiligung von Frauen.

Eine erfolgreiche Umsetzung ist jedoch an eine Vielzahl von Bedingungen geknüpft, die im Grunde eine Transformation des menschlichen Miteinanders sowie eine Abkehr von aktuellen Wertvorstellungen, Wirtschaftssystemen und Lebenszielen erfordern. Wenn es gelingen soll, die Erde als lebenswerten Planeten für Mensch und Natur zu erhalten, muss die Menschheit ab sofort:

- *mindestens 30 bis 50 Prozent der Land- und Meeresflächen schützen und nachhaltig nutzen:* Das heißt, es dürfen nur so viele natürliche Rohstoffe (Fisch, Holz etc.) entnommen werden, wie auch wieder nachwachsen können;
- *bei Entscheidungen alle betroffenen Bevölkerungsgruppen von Anfang an in die Debatte mit einbeziehen:* Das setzt transparente, demokratisch organisierte Prozesse voraus, in denen über alle gesellschaftlichen Grenzen hinweg zusammengearbeitet und unterschiedliche Interessen, Werte und Weltansichten auf faire Weise gegeneinander abgewogen werden;
- *alle Entscheidungen auf Grundlage von Expertenwissen treffen:* Gehört werden müssen neben Vertretern aus Wissenschaft und Ingenieurwesen auch die der lokalen Expertise und lokalen Interessenverbände sowie Ureinwohnerinnen und Ureinwohner;
- *Fragen der Gerechtigkeit und Fairness eine hohe Priorität einräumen:* Nur wenn einkommensschwache oder aber ausgegrenzte Bevölkerungsgruppen eine Stimme erhalten und diese Stimme auch gehört und berücksichtigt wird, kann sich an ihrer prekären Situation etwas ändern. Zu diesen bislang ausgegrenzten Bevölkerungsgruppen zählen vielerorts vor allem Frauen, Jugendliche und Ureinwohner;

- *ausreichend Geld für Maßnahmen zur Klimafolgenanpassung sowie für eine Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft zur Verfügung stellen;*
- *grenz- und staatenübergreifend zusammenarbeiten.*

Eine solche Transformation wäre schon in einer Welt ohne Klimawandel eine gigantische gesellschaftliche Herausforderung. Berechnet man die vom Klimawandel verursachten Schäden und Verluste mit ein, verschärft sich die Ausgangslage, denn mit jedem Zehntelgrad zusätzlicher Erwärmung verkleinert sich unser Handlungsspielraum. Der Weltklimarat bringt klar auf den Punkt, was auf dem Spiel steht, indem er schreibt: In einer mehr als zwei Grad wärmeren Welt hat die Menschheit vermutlich keine Chance mehr, eine lebenswerte Zukunft für alle Erdenbürger zu gestalten.



Innerhalb der Länder kann die Verwundbarkeit variieren. Beispiele für besonders verwundbare lokale Gruppen sind:

- 1 indigene Völker der Arktis: Ungleichheit die Gesundheit betreffend, eingeschränkter Zugang zu ursprünglichen Jagdgründen und Lebensgewohnheiten
- 2 städtische ethnische Minderheiten: strukturelle Ungleichheit, Marginalisierung, Ausschluss von Planungs- und Entscheidungsprozessen
- 3 kleinbäuerliche Kaffeeproduzenten: begrenzter Marktzugang und -stabilität, Abhängigkeit von nur einer Pflanzenart, begrenzte institutionelle Unterstützung
- 4 indigene Völker im Amazonasgebiet: Landdegradation, Entwaldung, Armut, fehlende Unterstützung
- 5 ältere Menschen, insbesondere arme und sozial isolierte: Gesundheitsprobleme, Behinderungen, begrenzte Hilfe und Unterstützung
- 6 Inselgemeinschaften: begrenztes Land, Bevölkerungswachstum und Verschlechterung der Küstenökosysteme
- 7 Kinder in ländlichen Gemeinden mit niedrigem Einkommen: Ernährungsunsicherheit, Anfälligkeit für Unterernährung und Krankheiten
- 8 Menschen, die durch Konflikte im Nahen Osten und in der Sahelzone entwurzelt wurden: verlängerter ungesicherter Status, eingeschränkte Mobilität
- 9 Frauen und non-binäre Menschen: begrenzter Zugang zu und eingeschränkte Kontrolle über Ressourcen, zum Beispiel Wasser, Land, Kredite
- 10 Migranten: informeller Status, begrenzter Zugang zu Gesundheitsdiensten und Unterkünften, Ausschluss von Entscheidungsprozessen
- 11 Aborigines und Torres-Strait-Inselbewohner: Armut, Ernährungs- und Wohnungsunsicherheit, räumliche Trennung von der Gemeinschaft
- 12 Menschen, die in informellen Siedlungen oder Slums leben: Armut, begrenzte Grundversorgung und oft in Gebieten mit hohen Klimagefahren lebend

1.12 > Überall auf der Welt sind die Menschen den Folgen des Klimawandels ausgesetzt. Allerdings gibt es besonders vulnerable Gruppen, die Extremereignissen wie Hitzewellen, Dürrephasen, Stürmen, Überschwemmungen und Waldbränden weniger als andere entgegensetzen haben.



1.13 > Ein eindrücklicher Vergleich: In der US-amerikanischen Metropole Los Angeles gibt es nur in jenen Stadtvierteln ausreichend Schatten spendende Straßenbäume, in denen die Anwohnenden genügend Geld haben, sich um den Erhalt der Bäume zu kümmern (oben). In ärmeren Vierteln hingegen fehlen die Bäume, weil auch die Stadtverwaltung nicht in Straßenbäume investiert. Die Menschen dort finden bei Hitze deshalb keinen kühlenden Baumschatten vor ihrer Haustür.

was uns im Zuge des Klimawandels noch bevorsteht – vor allem, wenn sich die Welt um mehr als 1,5 Grad Celsius erwärmt. Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sprechen in diesem Zusammenhang von einer Anpassungslücke. Diese ist vor allem in jenen Regionen besonders groß, in denen die Menschen arm und in besonderem Maß den Klimagefahren ausgesetzt sind. Hinzu kommt: Vergleicht man die derzeit in Planung befindlichen Anpassungsmaßnahmen mit den wissenschaftlich vorhergesagten Klimafolgen, so ist heute schon absehbar, dass diese Anpassungslücke stetig wachsen wird.

Die Grenzen der Anpassung

Neu ist auch die Klarheit, mit welcher der Weltklimarat mittlerweile die Grenzen der menschlichen Anpassung an den Klimawandel beschreibt. Dabei unterscheidet er zwischen harten und weichen Grenzen. Harte Grenzen lassen sich durch keinerlei Maßnahmen mehr überwinden. Wenn beispielsweise eine Atollinsel im Zuge des Meeresspiegelanstieges von Wellen überspült wird und alle Trinkwasserreserven vollständig versalzen sind, gibt es für die Inselbewohner langfristig keine andere Option mehr, als ihre Heimat zu verlassen. Gleiches gilt für Pflanzen und Tiere, die bereits an ihrer oberen Temperaturgrenze leben. Erwärmt sich ihr Lebensraum weiter, müssen sie zwangsläufig abwandern.

Weiche Grenzen hingegen lassen sich überwinden. Dazu bedarf es jedoch eines politischen Willens, ausreichend Geldes sowie wissenschaftlichen und lokalen Know-hows. Wenn alle vier Faktoren gegeben sind, können zum Beispiel Bauern in von Dürren geplagten Regionen neue, trockenresistente Arten anbauen und moderne Bewässerungssysteme installieren, sodass ihr Wasserverbrauch Seen, Flüsse oder aber Grundwasserspeicher schont.

Allerdings lässt sich heute schon konstatieren, dass viele Tier- und Pflanzenarten ihre harten Anpassungsgrenzen bereits erreicht haben oder kurz davor stehen. Sollten sie lokal aussterben, bedeutet das für die Abermillionen Bauern-, Fischer- und Hirtenfamilien, die von ihnen abhängen, das Ende ihres bisherigen Einkommenserwerbs. Der zunehmende Schnee- und Gletscherrückgang wird ab einer globalen Erwärmung von 1,5 Grad Celsius

dazu führen, dass Menschen, deren Wasserversorgung vom Schmelzwasser abhängt, nicht mehr ausreichend Trinkwasser haben werden. Und ab einer Erwärmung von zwei Grad Celsius wird es in vielen Getreideanbaugebieten der Welt deutlich schwieriger, erfolgreich Ackerbau zu betreiben.

Diese wenigen Beispiele für Anpassungsgrenzen zeigen: Je schneller die Menschheit den Klimawandel eindämmt, umso mehr Möglichkeiten verbleiben ihr, sich an die neuen Lebensbedingungen anzupassen, und desto wirksamer werden diese Optionen sein. Maßnahmen, die in einer 1,5 Grad wärmeren Welt noch funktionieren, können in einer zwei Grad wärmeren Welt bereits völlig wirkungslos sein. Daher muss die Effektivität aller Anpassungsaktivitäten auch stetig überwacht und die Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen regelmäßig kontrolliert werden.

Klima, Mensch und Natur gewinnen nur zusammen

Der sechste Sachstandsbericht des Weltklimarates betont zudem das neue Grundverständnis, welches die Wissenschaft mittlerweile für die engen Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Natur, Menschheit und Klima entwickelt hat. Schwächt der Mensch beispielsweise die Artenvielfalt, indem er die natürlichen Lebensräume rabiat zerstört und ihre Ressourcen rigoros ausbeutet, beraubt er sich damit seines wichtigsten Partners im Kampf gegen den Klimawandel. Gleichzeitig forciert die Menschheit durch ihren anhaltend hohen Ausstoß von Treibhausgasen den klimabedingten Niedergang der natürlichen Ökosysteme.

Aus dieser Konfliktspirale auszubrechen und bisherige Fehlentwicklungen umzukehren, muss fortan Ziel allen menschlichen Handelns sein. Das bedeutet unter anderem, Mensch, Natur und Klima im Einklang miteinander zu denken – tagtäglich und bei jeder einzelnen Entscheidung, ganz egal, ob nun auf lokaler, nationaler oder internationaler Ebene. Nur so kann es gelingen, Lösungen zu finden, die langfristig allen drei Systemen zugutekommen und heutigen ebenso wie kommenden Generationen eine lebenswerte Zukunft auf dem Planeten Erde garantieren.

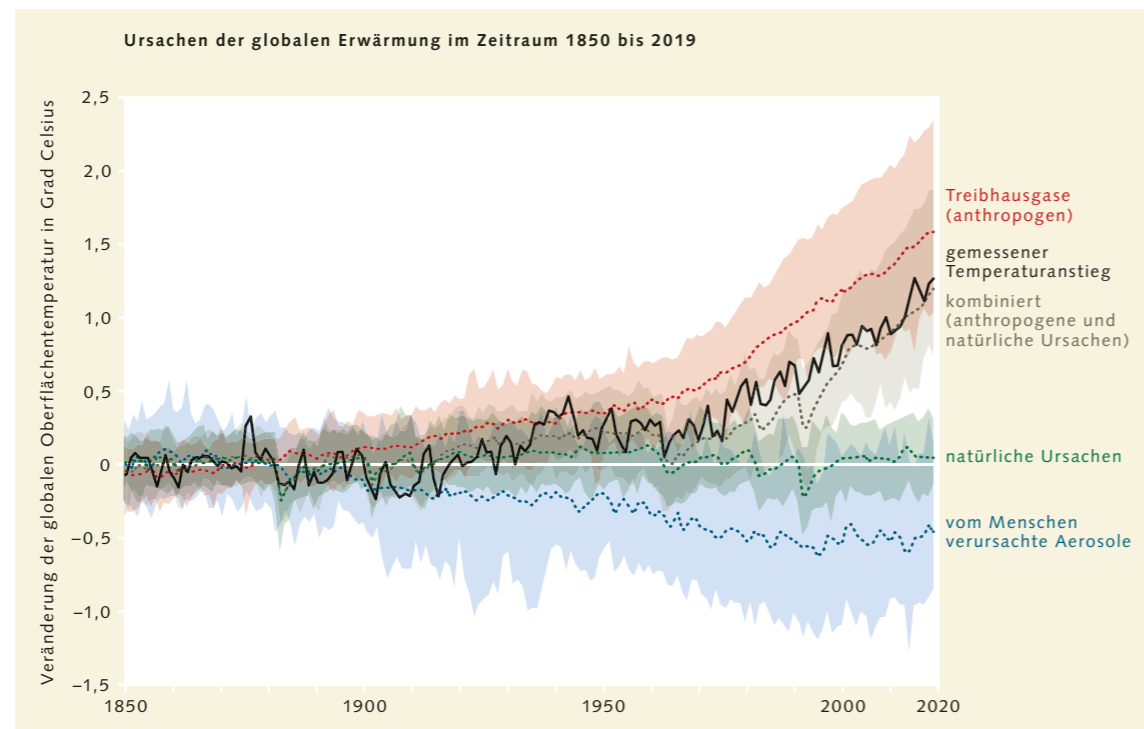
Lösungen für das Treibhausgas-Problem?

> Der Klimawandel ist menschengemacht und eindeutig auf den ungebremsten Ausstoß von Treibhausgasen zurückzuführen. Ein Emissionsstopp ist daher der einzige Ausweg aus der Klimakrise. Vorschläge, wie die Menschheit einen Großteil ihrer Emissionen vermeiden kann, gibt es inzwischen zuhauf. Allerdings ist auch gewiss, dass sich bis zum Jahr 2050 nicht alle Emissionen vermeiden lassen werden – selbst bei größter Anstrengung nicht. Diese Restmengen wird die Menschheit ausgleichen müssen: durch eine gezielte Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre.

Der Mensch allein verantwortlich den Klimawandel und seine Folgen

Den Klimawandel und seine drastischen Folgen zu stoppen ist Aufgabe des Menschen, denn er allein hat die bisherige globale Erwärmung zu verantworten. Der Klimawandel ist menschengemacht, daran gibt es keinerlei Zweifel mehr. Nach Angaben des Weltklimarates kann die globale Erwärmung der zurückliegenden 120 bis 170 Jahre eindeutig auf vom Menschen freigesetzte Treibhausgase zurückgeführt werden. Zu diesen zählen in erster Linie Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid (Lachgas), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) sowie 16 weitere Chemikalien.

Angereichert in der Atmosphäre bewirken diese Treibhausgase, dass unser Planet Erde zunehmend weniger Wärmeenergie in das Weltall abstrahlen kann. Die Wärme verbleibt stattdessen in der Erdatmosphäre und heizt zunächst deren Luftmassen, später auch den Ozean auf. Das physikalische Prinzip dahinter ist dasselbe wie in einem Gartengewächshaus. Aus diesem Grund werden die physikalischen Auswirkungen steigender Treibhausgaskonzentrationen auch als Treibhauseffekt bezeichnet. Wichtig ist zu wissen: Einen Teil der durch Treibhausgase ausgelösten Gesamterwärmung spüren Mensch und Natur noch nicht, weil er durch kühlend wirkende Aerosole wie Rußpartikel und Schwefeldioxyde sowie durch Veränderungen des Reflexionsvermögens der Erdoberfläche maskiert wird.



1.14 > Die Menschheit verantwortet den Klimawandel. Das weiß man, weil sich die gemessene Erderwärmung (schwarze Linie) nur dann realistisch in Klimamodellen darstellen lässt, wenn die Modelle sowohl die natürlichen als auch alle menschlichen Einflussfaktoren berücksichtigen (graue gepunktete Linie und Schattierung).

1.15 > Die globale Erwärmung ist auf die Treibhausgasemissionen des Menschen zurückzuführen. Kühlend wirken bislang vor allem vom Menschen zu verantwortende Aerosole, die sich vor allem aus Schwefel- und Stickoxid bilden und einfallendes Sonnenlicht ins Weltall zurückstrahlen.

Ohne diese kühlende Komponente betrüge die globale Erwärmung bereits heute 1,5 Grad Celsius.

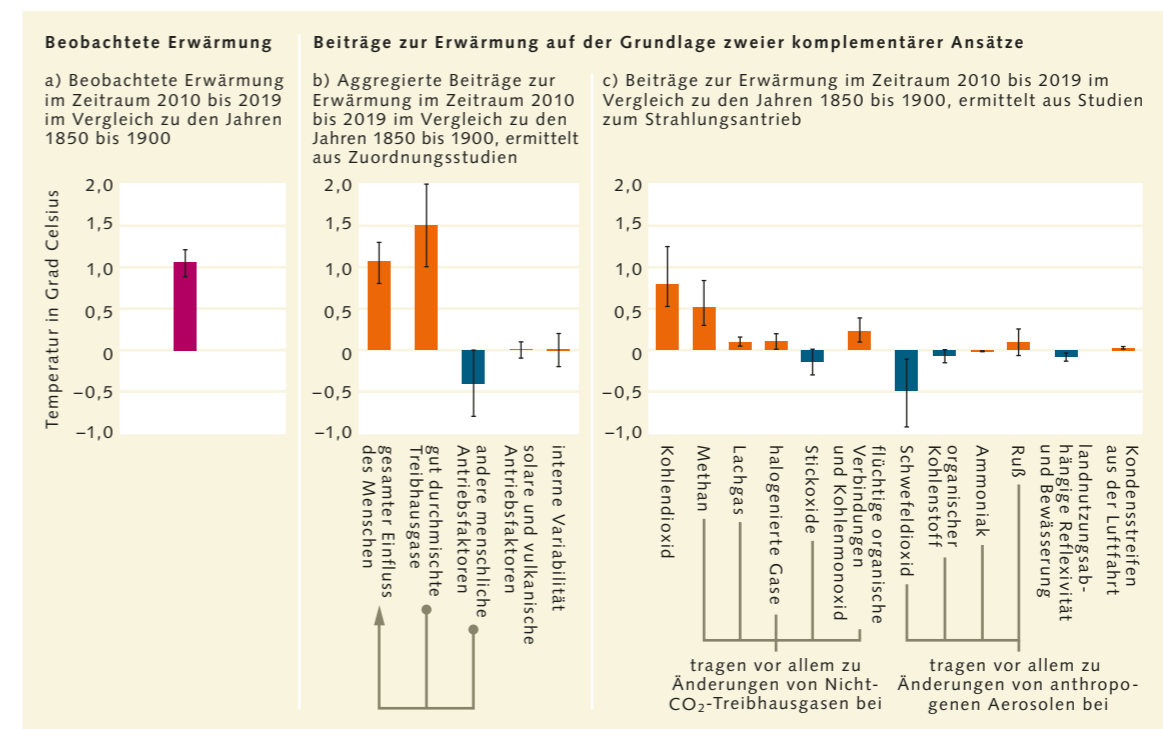
Die Konzentration der Treibhausgase in der Erdatmosphäre wird weltumspannend überwacht – etwa von Forschungseinrichtungen wie der US-amerikanischen Ozean- und Atmosphärenbehörde NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Diese veröffentlicht in jedem Jahr den sogenannten NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI), einen Treibhausgas-Index. Dieser bringt in einer Zahl zum Ausdruck, wie viel zusätzliche Wärmeenergie infolge der vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 in der Erdatmosphäre verblieben ist – und demzufolge die globale Erwärmung vorantreibt. Im Jahr 2022 stieg der NOAA-Treibhausgas-Index auf einen Wert von 1,49. Das bedeutet: Vom Menschen freigesetzte Treibhausgase hielten im Jahr 2022 sage und schreibe 49 Prozent mehr Wärmeenergie in der Erdatmosphäre gefangen als noch im Referenzjahr.

Den größten Anteil an diesem zunehmenden Wärmestau – rund 80 Prozent – hatte Kohlendioxid (chemische Formel: CO₂). Dieses Treibhausgas ist besonders langlebig. Es wird in der Atmosphäre nicht chemisch abge-

baut, sondern nur im Zuge verschiedener Prozesse (zum Beispiel CO₂-Aufnahme von Pflanzen) aus der Atmosphäre entnommen. Aus diesem Grund verbleibt Kohlendioxid mitunter bis zu 1000 Jahre lang in der Erdatmosphäre und entfaltet eine entsprechend lange Klimawirkung.

Kohlendioxid wird bei nahezu allen menschlichen Aktivitäten ausgestoßen. Es entsteht in erster Linie:

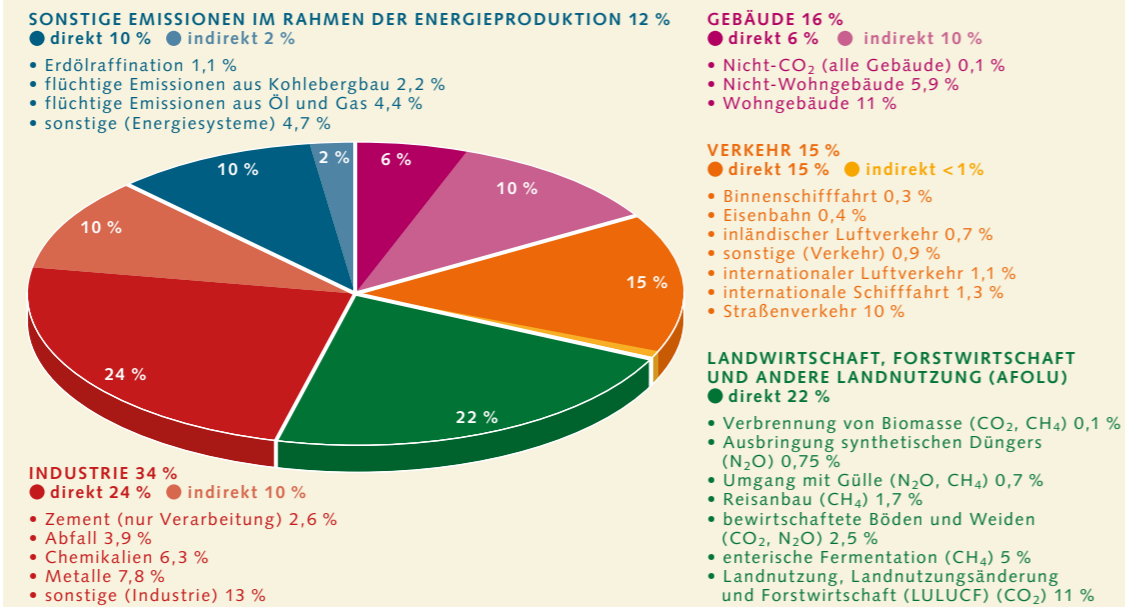
- bei der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas: Nach Angaben des Weltklimarates entstanden im Jahr 2019 rund 34 Prozent der weltweiten Kohlendioxidemissionen im Energiesektor; das Verkehrs- und Transportwesen schlug mit einem Anteil von 15 Prozent zu Buche, der Industriesektor mit 24 Prozent;
- bei der Zersetzung organischen Materials (Tier- und Pflanzenreste) aufgrund von Landnutzungsänderungen: Die Land- und Forstwirtschaft sowie anderweitige Landnutzungsänderungen verursachten im Jahr 2019 rund 22 Prozent der weltweiten Emissionen von Kohlendioxid;



1.15 > Die globale Erwärmung ist auf die Treibhausgasemissionen des Menschen zurückzuführen. Kühlend wirken bislang vor allem vom Menschen zu verantwortende Aerosole, die sich vor allem aus Schwefel- und Stickoxid bilden und einfallendes Sonnenlicht ins Weltall zurückstrahlen.

1.16 > Übersicht über die direkten und indirekten Treibhausgasemissionen der einzelnen Sektoren im Jahr 2019. Die Emissionen sind in Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet. Aufgrund von Rundungen ergeben die gelisteten Prozentangaben in der Summe nicht immer die vollen 100 Prozent.

Gesamte vom Menschen verursachte direkte und indirekte Treibhausgasemissionen für das Jahr 2019 (in GtCO₂e) nach Sektoren und Teilsektoren



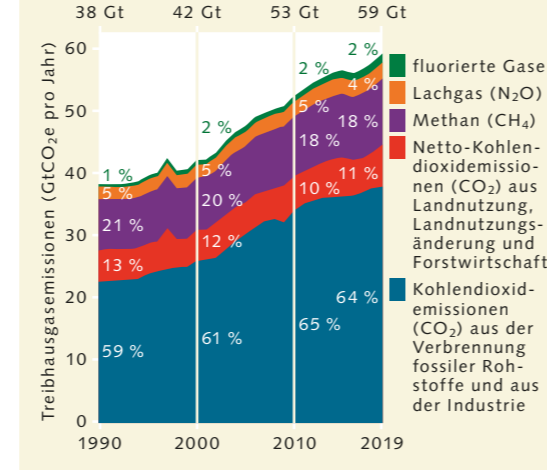
Direkte und indirekte Emissionen

Direkte Emissionen stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit Aktivitäten innerhalb eines klar abgesteckten Raumes oder einer Region, eines Sektors oder Unternehmens (zum Beispiel: CO₂-Emissionen durch Ölverbrennen in der Ölheizung eines Gebäudes). Indirekte Emissionen hingegen entstehen außerhalb des definierten Raumes (Beheizen eines Gebäudes mit Fernwärme: Indirekte Emissionen entstehen bei Verbrennung im entfernt gelegenen Gas- oder Kohlekraftwerk).

- bei industriellen Prozessen wie zum Beispiel der Herstellung von Zement: Zement besteht aus Kalkstein, der bei Temperaturen von 1450 Grad Celsius gebrannt wird, um die gewünschten Materialeigenschaften zu entwickeln. Bei diesem Brennvorgang entweicht Kohlendioxid in großen Mengen aus dem Ausgangsmaterial. Allein diese prozessbedingten Emissionen der Zementproduktion machten im Jahr 2019 rund 2,6 Prozent der globalen Kohlendioxid-Gesamtemissionen aus. Unberücksichtigt blieben dabei indirekte Emissionen, wie sie u.a. bei der Energiebereitstellung sowie beim Transport entstehen. In Deutschland ist die Herstellung einer Tonne Zement mit Kohlendioxidemissionen von rund 600 Kilogramm verbunden. Etwa zwei Drittel davon entfallen auf rohstoffbedingte Prozessemissionen, ein Drittel auf Brennstoffemissionen.

Pro Jahr summieren sich die weltweiten Kohlendioxidemissionen infolge von Zementherstellung und der Verbrennung fossiler Rohstoffe mittlerweile auf rund 36 Milliarden Tonnen CO₂. Hinzu kommen die Emissionen aus der Land- und Forstwirtschaft sowie aus der veränderten Landnut-

Globale vom Menschen verursachte Netto-Treibhausgasemissionen im Zeitraum 1990 bis 2019

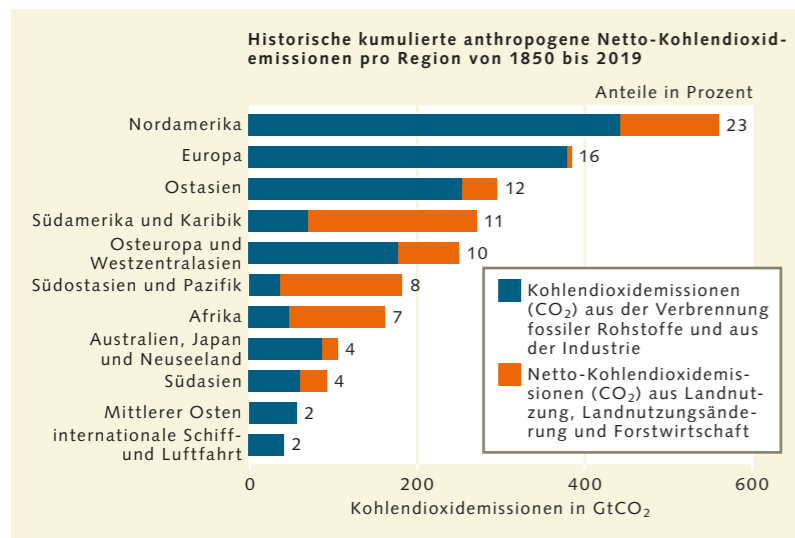
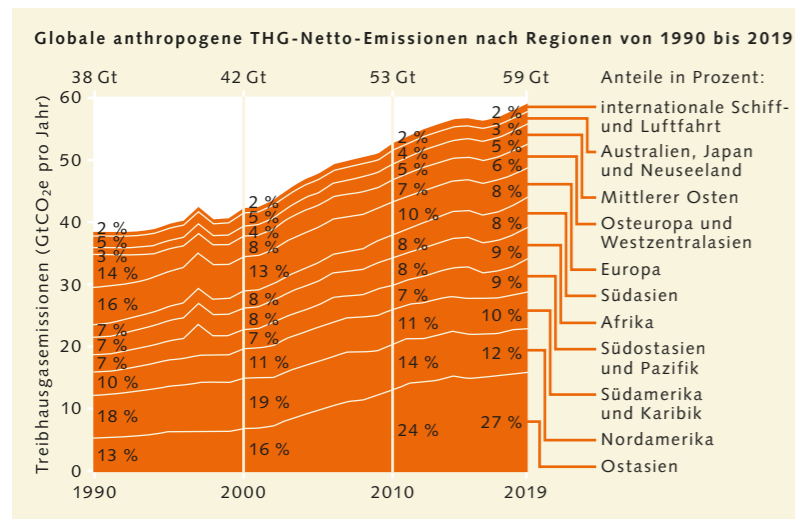


1.17 > Die Mengen aller relevanten, anthropogenen Treibhausgase ist im Zeitraum von 1990 bis 2019 stetig gestiegen.

zung in Höhe von etwa vier Milliarden Tonnen Kohlendioxid. Global betrachtet steigen die Emissionen somit seit 270 Jahren, auch wenn sich ihr Wachstum mittlerweile verlangsamt hat.



1.18 > In einem chinesischen Steinbruch wird Schotter produziert. Industrieunternehmen wie dieses verantworten zusammen mehr als ein Drittel der weltweiten Treibhausgasemissionen.



1.19 und 1.20 > Die Regionen der Welt tragen in einem sehr unterschiedlichen Maß zum Treibhausgasausstoß bei – aktuell ebenso wie in der Rückschau, bei der alle Emissionen addiert werden.

Rekordwerte – in jedem Jahr

Der stetig hohe Ausstoß führt dazu, dass die Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre kontinuierlich ansteigt. Im Mai 2023 verzeichnete die Kohlendioxid-Messstation am Mauna-Loa-Observatorium auf Hawaii erstmals einen Monatshöchstwert von 424 parts per million (ppm) – ein Plus von drei ppm im Vergleich zu Mai 2022 und die höchste bislang gemessene Kohlendioxidkonzentration der zurückliegenden zwei Millionen Jahre.

Kohlendioxid ist zweifelsohne der stärkste Motor des Klimawandels, jedoch nicht der einzige. Neben dem

langlebigen Kohlendioxid setzt die Menschheit auch zunehmend mehr kurzlebige klimawirksame Schadstoffe wie Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und fluorierte Treibhausgase frei. Diese werden im Gegensatz zu Kohlendioxid in der Atmosphäre chemisch abgebaut. Das heißt, sie bleiben in der Regel nicht länger als 20 Jahre klimawirksam. So lange sie sich aber in der Atmosphäre befinden, tragen die kurzlebigen Treibhausgase maßgeblich zum Klimawandel bei. Methan beispielsweise hält über einen Zeitraum von 20 Jahren gerechnet mehr als 80-mal mehr Wärme in der Erdatmosphäre als die gleiche Menge Kohlendioxid.

Der Weltklimarat kommt in seinem aktuellen Bericht zu dem Schluss, dass die steigenden Emissionen von Methan von 1850 bis 2019 für etwa 0,5 Grad Celsius der in dieser Zeit beobachteten globalen Erwärmung verantwortlich waren. Rechnet man die Methankonzentration und ihre Klimawirksamkeit in das entsprechende Kohlendioxid-Äquivalent um, dann machten die vom Menschen verursachten Methanemissionen im Jahr 2019 rund 18 Prozent der Gesamtemissionen aus.

Direkt gemessen wird die Methankonzentration in der Erdatmosphäre seit dem Jahr 1983. Nach Angaben der NOAA betrug die durchschnittliche Methankonzentration im Jahr 2022 genau 1911,8 parts per billion (ppb, Teile pro Milliarde). Im Jahr 1750, so belegen es Klimaarchive, waren es noch 729 ppb. Das bedeutet, die Lufthülle der Erde enthält mittlerweile 162 Prozent mehr. So hoch war die Methankonzentration in den zurückliegenden 800 000 Jahren nicht.

Methan entweicht zum einem aus natürlichen Quellen wie Mooren, Mangrovenwäldern, Salzmarschen und Seegraswiesen. Zum anderen wird es durch menschliche Aktivitäten freigesetzt, vor allem:

- *in der Landwirtschaft:* Verdauungsprozesse von Wiederkäuern, Reisanbau, Umgang mit Wirtschaftsdünger, Gülle und Gärresten;
- *im Energiesektor:* Kohleförderung, Erdöl- und Erdgasförderung und -transport, Verbrennen von Biomasse und Biotreibstoffen sowie
- *in der Abfall- und Abwasserwirtschaft:* Entweichen aus Müllhalden, Abwässern und Klärschlamm.

Diese vom Menschen zu verantwortenden Methanemissionen lassen sich mit verhältnismäßig wenig Aufwand reduzieren. Da atmosphärisches Methan zudem in einem Zeitraum von etwa neun bis zwölf Jahren chemisch abgebaut wird und somit seine Klimawirkung verliert, gelten Lösungen zur Eindämmung der Methanfreisetzung als besonders vielversprechende Maßnahmen im Kampf gegen den Klimawandel. Neuerer Forschung zufolge ließen sich zum Beispiel bis zum Jahr 2050 etwa 0,25 Grad Celsius zusätzliche Erwärmung verhindern, wenn die Menschheit ab sofort alle bekannten Optionen zur Eindämmung selbst verursachter Methanemissionen umsetzen würde.

Wann überschreitet die globale Erwärmung das 1,5-Grad-Ziel?

Jede zusätzliche Tonne freigesetzter Treibhausgase treibt die Erderwärmung weiter voran. Diesen fast linearen

Zusammenhang kann die Wissenschaft zumindest für Kohlendioxid mittlerweile sehr gut belegen. So weiß man inzwischen, dass Kohlendioxidemissionen in Höhe von 1000 Milliarden Tonnen (tausend Gigatonnen) die globale Oberflächentemperatur um weitere 0,27 bis 0,63 Grad Celsius steigen lassen – und zwar jedes Mal, wenn sich eine solche Menge Kohlendioxid neu in der Atmosphäre anreichert.

Viel häufiger aber geht es in der Klimawandel-Debatte um die Frage, wann ein bestimmtes Erwärmungsniveau erreicht wird. Das Pariser Klimaabkommen aus dem Jahr 2015 zum Beispiel erklärt eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf weit unter zwei Grad Celsius als Ziel, nach Möglichkeit auf 1,5 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit. Die Schwierigkeit dabei ist jedoch, dass das Abkommen weder nähere Angaben dazu macht, wie die spezifischen Erwärmungsniveaus definiert sind, noch, welcher Zeitraum mit dem Wort „vorindustriell“ gemeint ist.

Kohlendioxid-Äquivalent

Um die Wirkung verschiedener Treibhausgase vergleichen zu können, berechnen Forschende, wie viel Kohlendioxid man bräuhete, um über einen bestimmten Zeitraum denselben Effekt auf einen ausgewählten Klimaparameter zu erzeugen wie mit einer gegebenen Menge Methan, Lachgas oder einem Mix anderer Treibhausgase. Diese errechnete Menge CO₂ wird dann als Kohlendioxid-Äquivalent bezeichnet.



1.21 > Bauern in der pakistanischen Provinz Sindh treiben ihre Ziegen über geflutetes Gelände. Starkregen und Sturzfluten setzten im Juli und August 2022 große Teile Pakistans unter Wasser und richteten in der Hälfte aller Provinzen schwere Schäden an.

1.22 > Der Klimawandel ließe sich wirkungsvoll eindämmen, wenn es der Menschheit gelänge, ihren Methanausstoß zu reduzieren. Wie, ist hinlänglich bekannt. Die Lösungsansätze müssten nur flächendeckend umgesetzt werden.

Sektor	Ausgewählte Maßnahmen zur Reduktion von Menschen verursachter Methanemissionen
Landwirtschaft: Tierhaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz eines vorbehandelten, leichter verdaulichen Tierfutters • Verfüttern von Meeresalgen und anderer emissionsreduzierender Zusatzstoffe • verbessertes Herdenmanagement • verbesserter Umgang mit Gülle (z.B. Abdeckung) • Einführung anaerober Vergärungsanlagen für Rinder- und Schweinegülle • Verwendung der Gülle in Biogasanlagen • Zucht von Nutztieren, die weniger Methan produzieren • Verhaltensänderung: weitgehender Verzicht auf Fleisch und Umstellung auf pflanzenbasierte Ernährung
Landwirtschaft, insbesondere Reisanbau	<ul style="list-style-type: none"> • verbesserte Bewässerungs- und Anbautechniken, u.a. Reisfelder regelmäßig fluten und auch wieder trockenfallen lassen • Nutzung neuer Reissorten • Maßnahmen zur Bodenverbesserung • Verhaltensänderung: Reduktion der Lebensmittelabfälle
Erdöl-, Erdgas- und Kohleförderung	<ul style="list-style-type: none"> • Rückgewinnung und Nutzung von entweichendem Gas • Schließung von Methanleckagen an aktiven Bohrlöchern und Pipelines • Vermeiden von Methanleckagen beim Öl- und Gastransport • Verschließen nicht mehr genutzter Bohrlöcher • Einsatz moderner Pumpen- und Fördertechnik • Flutung stillgelegter Kohlebergwerke • Stopp der Nutzung und Förderung fossiler Brennstoffe
Abfall- und Abwasserwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • keine Deponierung organischer Abfälle, stattdessen Verwertung derer in Biogasanlagen • Rückgewinnung von Deponiegasen und deren direkte Nutzung für die Energieproduktion • Recycling industrieller und kommunaler Abfälle • Umstellung von offener Kanalisation auf aerobe Abwasserbehandlung • Umstellung der Behandlung häuslicher Abwässer auf anaerobe Behandlung mit Biogasrückgewinnung und -verwertung • Umstellung der Behandlung von Industrieabwässern und Klärschlamm auf einen zweistufigen Prozess – anaerobe Behandlung mit Biogasrückgewinnung, gefolgt von aerober Behandlung

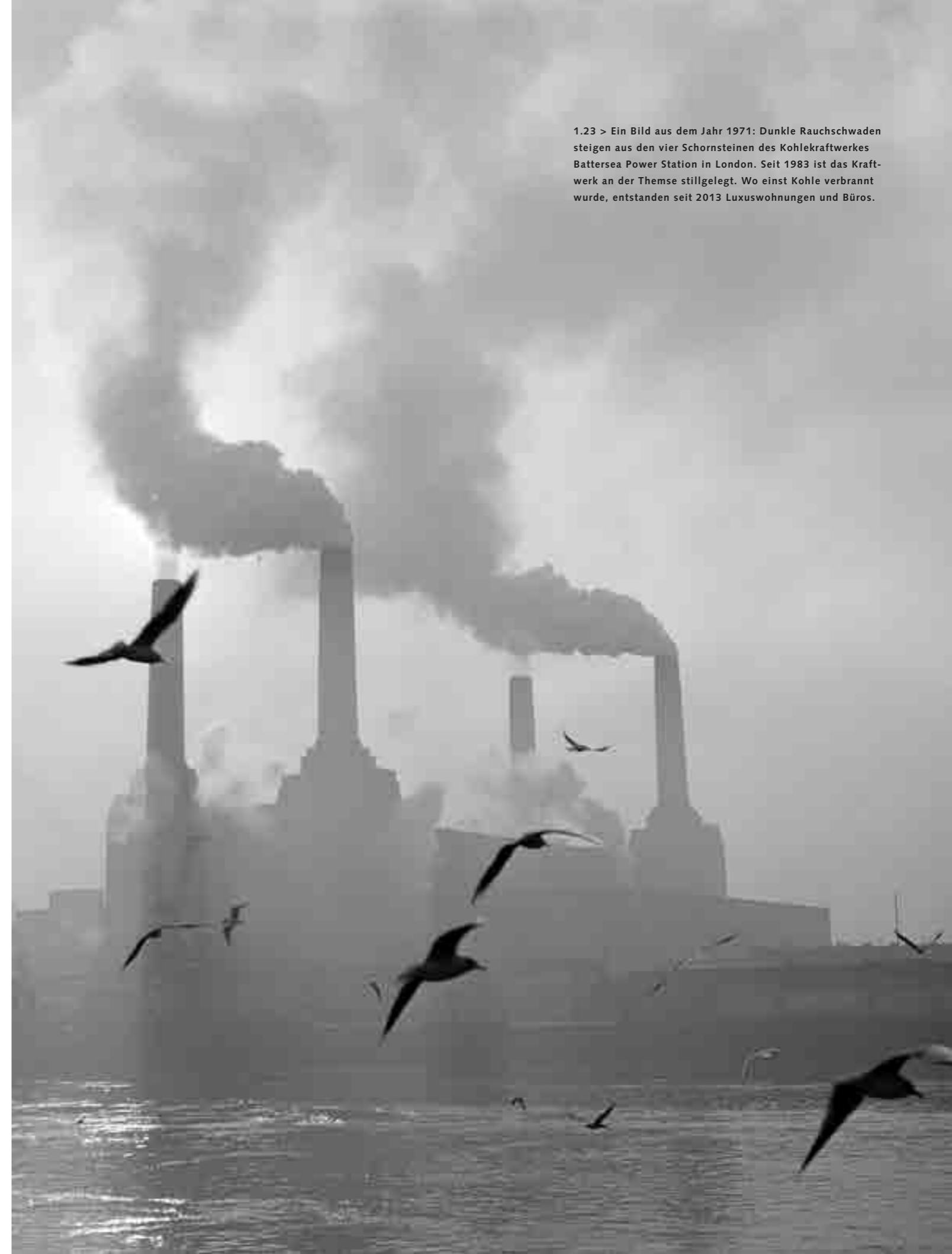
Die Klimaforschenden haben sich deshalb auf eine gemeinsame Ausgangsbasis geeinigt. Sie definieren die Erwärmungsniveaus im Vergleich zum Zeitraum von 1850 bis 1900 – im vollen Bewusstsein, dass die Industrialisierung bereits 100 Jahre früher begonnen hat und damals die Kohlendioxidemissionen bereits rapide angestiegen waren, vor allem in Großbritannien. Allerdings reichen die Daten zur globalen Oberflächentemperatur der Erde nur bis zum Jahr 1850 in zufriedenstellender Qualität zurück. Daher entschieden sich die Forschenden für die Vergleichsperiode von 1850 bis 1900.

Bei einer Antwort auf die Frage, wann die globale Erwärmung eine bestimmte Temperaturgrenze überschreitet, muss zudem bedacht werden, dass die Erwärmung stets als Durchschnittswert für einen Zeitraum von 20 Jahren berechnet wird. Das heißt aus Sicht der Klima-

forschung: Die 1,5-Grad-Grenze ist erreicht, wenn über einen Zeitraum von 20 Jahren die durchschnittliche Oberflächentemperatur 1,5 Grad Celsius über dem Durchschnittswert des Vergleichszeitraumes 1850 bis 1900 gelegen hat. Wann genau aber wird das sein?

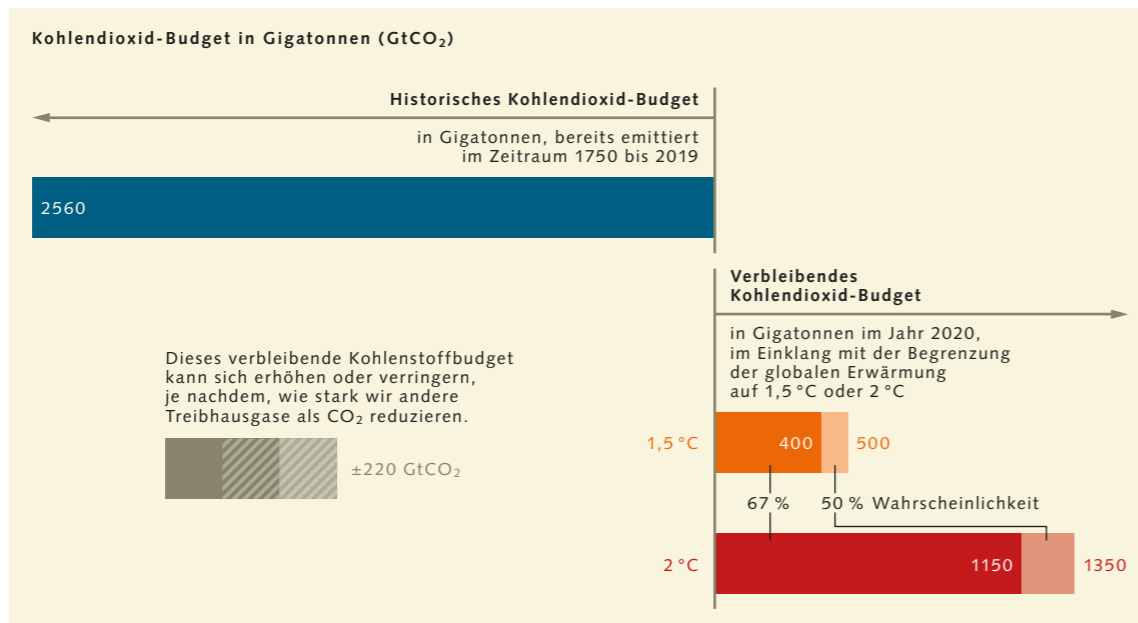
Die genaue Temperaturentwicklung vorherzusagen, ist noch immer schwierig, weil die Höhe der künftigen Erwärmung von vier Faktoren abhängt: von der Menge künftiger Treibhausgasemissionen, von der internen Variabilität des Klimasystems (gemeint sind die natürlichen Schwankungen), von der Klimasensitivität sowie von den Unsicherheiten in der Bestimmung des Temperaturniveaus für den Referenzzeitraum 1850 bis 1900.

Als Klimasensitivität bezeichnen Forschende die langfristige Klimaerwärmung, ausgelöst durch eine plötzliche Verdopplung der Konzentration von Kohlendioxid in der



1.23 > Ein Bild aus dem Jahr 1971: Dunkle Rauchschwaden steigen aus den vier Schornsteinen des Kohlekraftwerkes Battersea Power Station in London. Seit 1983 ist das Kraftwerk an der Themse stillgelegt. Wo einst Kohle verbrannt wurde, entstanden seit 2013 Luxuswohnungen und Büros.

1.24 > Da Kohlendioxid sich in der Atmosphäre anreichert, können Forschende berechnen, welche Mengen noch freigesetzt werden dürfen, bis ein bestimmtes Erwärmungsniveau erreicht ist. Im Jahr 2020 waren es noch 400 Gigatonnen Kohlendioxid, wenn die Welt das 1,5-Grad-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 Prozent erreichen möchte.



Erdatmosphäre. Ihr Wert liegt nach aktuellen Angaben des Weltklimarates mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit zwischen zwei und fünf Grad Celsius, wobei jedoch mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte vergehen können, bis sich diese Erwärmung einstellt und das Klimasystem nach der Störung (Verdopplung der Kohlendioxidkonzentration) wieder in einen Gleichgewichtszustand zurückfindet.

Klimamodelle kommen aufgrund dieser Spanne von drei Grad Celsius zu verschiedenen Ergebnissen: Verwenden Forschende in ihren Klimamodellierungen eine mittlere Klimasensitivität, deuten Berechnungen auf Basis der fünf sogenannten Sozioökonomischen Entwicklungspfade (Shared Socioeconomic Pathways) darauf hin, dass das 20-Jahres-Temperaturmittel im Zeitraum von 2020 bis 2039 auf jeden Fall die 1,5-Grad-Grenze erreichen wird – ganz ungeachtet dessen, welche Treibhausgasemissionen die Menschheit in den kommenden Jahren freisetzen wird. Bleiben die Emissionen auf ihrem aktuell hohen Niveau oder steigen sie weiter, wird die globale Erwärmung bis zum Jahr 2050 sogar die Zwei-Grad-Grenze überschreiten.

Wie viel Zeit noch bleibt, den Klimawandel einzudämmen, lässt sich aber auch in Form sogenannter Kohlendioxid-Budgets beantworten, welche die Menschheit noch emittieren darf, bis ein bestimmtes Erwärmungsniveau

erreicht ist. Die entsprechenden Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass die globale Oberflächentemperatur um etwa 0,45 Grad Celsius (0,23 bis 0,65 Grad Celsius) ansteigt, wann immer die Menschheit weitere 1000 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre freisetzt. Berücksichtigt werden außerdem die bisherige Erwärmung, der Anteil anderer Treibhausgase als Kohlendioxid an der künftigen Erwärmung sowie die Frage, wie lange die Erwärmung noch voranschreiten würde, wenn es der Menschheit gelänge, ihre Kohlendioxidemissionen eines Tages auf null zu reduzieren.

Im Zeitraum von 1750 bis 2019 hat die Menschheit etwa 2560 Milliarden Tonnen Kohlendioxid emittiert. Zieht der Weltklimarat alle methodischen Unsicherheiten mit in Betracht, reicht diese Treibhausgasmenge seiner Ansicht nach vermutlich schon aus, um die 1,5-Grad-Marke zu erreichen. Das bedeutet: Das verbleibende Kohlendioxid-Budget betrüge null – wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit, so die Experten. Verwenden die Fachleute bei ihren Berechnungen jedoch sogenannte „beste Schätzungen“ für die wichtigsten Parameter, fallen die verbleibenden Kohlendioxid-Budgets größer als null aus.

Klein sind sie dennoch, wie die Ergebnisse zeigen: Will die Menschheit die globale Erwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 Prozent auf 1,5 Grad Celsius

beschränken, darf sie, seit dem 1. Januar 2020 gerechnet, nur noch 400 Milliarden Tonnen Kohlendioxid freisetzen. Das entspricht in etwa jener Menge Kohlendioxid, welche die Staatengemeinschaft im zurückliegenden Jahrzehnt (2010 bis 2019) emittiert hat. Das Guthaben bis zum Zwei-Grad-Ziel beträgt 1150 Milliarden Tonnen. Angesichts aktueller Emissionen von rund 40 Milliarden Tonnen pro Jahr wären beide Budgets bei gleichbleibenden Emissionen bis zum Jahr 2030 beziehungsweise bis 2050 aufgebraucht.

Wie wenig Spielraum uns Menschen noch bleibt, zeigt auch die folgende Statistik: Würde die Menschheit alle im Jahr 2018 bereits in Betrieb befindlichen fossilen Infrastrukturen – also Kohle- und Erdgaskraftwerke, Erdölraffinerien, Hochöfen, Motoren etc. – bis zum Ende ihrer jeweiligen Lebenszeit in gleicher Auslastung weiterlaufen lassen wie bisher, würden in den kommenden Jahrzehnten zusätzliche 660 Milliarden Tonnen Kohlendioxid freigesetzt. Erweitert man diese Rechnung dann auch auf alle im Jahr 2018 geplanten oder im Bau befindlichen Anlagen, kämen noch einmal 187 Milliarden Tonnen Kohlendioxid hinzu. Eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf unter zwei Grad Celsius wäre unter diesen Bedingungen ernsthaft in Gefahr. Ein Verbot neuer Kohle- oder Erdgaskraftwerke wäre somit ein wichtiger Schritt, zukünftige Emissionen zu vermeiden.

Das große Ziel: Treibhausgasneutralität

Die globale Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten auf 1,5 Grad zu begrenzen, ist mittlerweile kaum noch möglich – zumindest nicht, ohne dabei für einige Jahrzehnte über das Temperaturziel hinauszuschießen (Überschuss-Szenario). Mit großen Anstrengungen aber kann es gelingen, die globale Erwärmung auf unter zwei Grad Celsius zu beschränken. Benötigt werden dazu eine sofortige, tiefgreifende Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen sowie das Erreichen einer sogenannten Netto-Null der Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2050.

Ideen für weitreichende Emissionseinsparungen gibt es für jeden Sektor. Nach Angaben des Weltklimarates ist es auf Grundlage vorhandener Lösungsoptionen möglich, die globalen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 zu halbieren. Mehr als die Hälfte dieses Einsparpo-

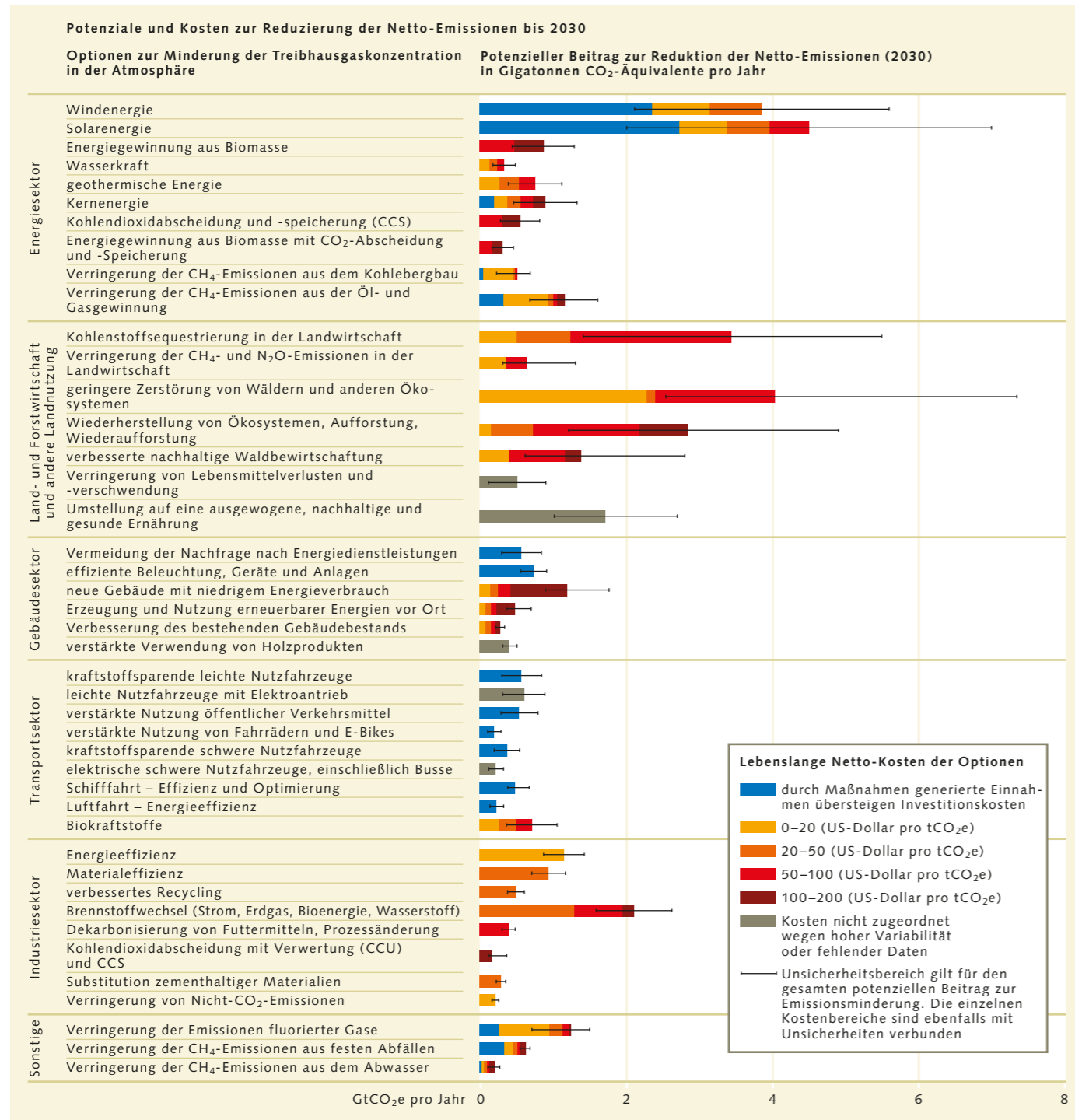
tenzials ließe sich dabei mit Maßnahmen realisieren, deren Kosten sich auf weniger als 20 US-Dollar pro eingesparter Tonne Kohlendioxid belaufen – ein Fakt, der vor allem für ärmere Länder besonders wichtig ist. Beispiele wären der weltweite Ausbau von Windkraft- und Fotovoltaikanlagen zur Gewinnung von Strom aus erneuerbaren Quellen, ein Ende der Waldrodungen und Trockenlegung von Feuchtgebieten, verbesserte Kohlenstoff-Speicherkapazitäten vieler Äcker und Felder durch eine nachhaltige und bodenschonende Landwirtschaft, ein weitgehender Verzicht auf Fleisch, der Bau energieeffizienter Gebäude, der Einsatz alternativer Treibstoffe in der Industrie sowie Maßnahmen zur Eindämmung von Emissionen von Methan.

Ein durchaus realisierbares Programm, könnte man meinen. Tatsächlich aber erfordert eine erfolgreiche Umsetzung einen umfassenden strukturellen und gesellschaftlichen Wandel, einen Umbau und ein Umdenken auf allen Ebenen, einschließlich neuer Vorstellungen darüber, was der Mensch zum Leben braucht (und konsumieren muss) und was nicht. Hinzu kommt: Eine Halbierung der Emissionen wäre nur der erste Schritt.

Im Anschluss müsste der Treibhausgasausstoß so weit reduziert werden, dass schnellstmöglich eine Treibhausgasneutralität erreicht würde. Sowohl der Begriff Treibhausgasneutralität als auch die synonym verwandte Bezeichnung Netto-Null der Treibhausgasemissionen beschreiben eine Welt, in der die Menschheit oder auch vereinzelte Akteure wie Staaten und Unternehmen nur noch so viel Treibhausgase freisetzen, wie sie der Erdatmosphäre auch wieder entnehmen können. Fachleute unterscheiden dabei bewusst zwischen den Begriffen Kohlendioxidneutralität (Netto-Null der Kohlendioxidemissionen) und Treibhausgasneutralität (Netto-Null aller Treibhausgasemissionen, einschließlich Kohlendioxid). Der Grund: Klimaphysikalisch betrachtet, ließe sich die globale Oberflächentemperatur stabilisieren, wenn die Menschheit nur noch so viel Kohlendioxid freisetzen würde, wie sie der Atmosphäre auch wieder entnehmen kann, und sie gleichzeitig die Freisetzung kurzlebiger Luftschadstoffe wie Methan und Lachgas auf ein bestimmtes Maß reduzieren würde. Gelänge es ihr dagegen, alle Treibhausgasemissionen auf Netto-Null zu reduzieren, würde die globale Temperatur langfristig

Überschuss-Szenario
Als Überschuss-Szenario wird eine Entwicklung bezeichnet, in der die globale Oberflächentemperatur zunächst für einen Zeitraum von einem Jahrzehnt bis mehreren Jahrzehnten über ein definiertes Klimaziel (zum Beispiel 1,5-Grad-Ziel) hinauschießt, im Anschluss aber wieder unter die gesetzte Temperaturgrenze fällt. Letzteres gelingt allerdings nur, wenn die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre tatsächlich sinkt, weil ihr Kohlendioxid entnommen wurde.

Pariser Klimaabkommen
Das Pariser Klima-abkommen wurde am 12. Dezember 2015 auf der 21. Klimakonferenz in Paris verabschiedet und trat am 4. November 2016 in Kraft. Bis September 2022 hatten 194 Staaten und die Europäische Union das Abkommen unterzeichnet und ratifiziert.



1.25 > Für alle Bereiche des Lebens gibt es mittlerweile Ansätze, mit denen sich der Treibhausgasausstoß der Menschheit bis zum Jahr 2030 wirksam verringern ließe. Diese Abbildung des Weltklimarates listet die wirksamsten Maßnahmen auf und zeigt, zu welchem Preis die Einsparungen möglich wären. Wichtig dabei: In Einsparungen zu investieren, kostet deutlich weniger, als die Folgen des fortschreitenden Klimawandels zu beheben.

sogar leicht sinken. Eine Netto-Null der Kohlendioxid-emissionen ist somit die große Grundvoraussetzung für ein Ende der globalen Erwärmung. Mithilfe einer Netto-Null aller Treibhausgasemissionen hingegen würde es sogar gelingen, die Erderwärmung ein kleines Stück zurückzuschrauben.

Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme

Die für eine Kohlendioxid-Entnahme infrage kommenden Methoden werden von Fachleuten unter dem Stichwort Carbon Dioxide Removal (CDR, Kohlendioxid-Entnahme) diskutiert und erforscht. Es gibt zwar auch erste Ideen zur Entnahme von Methan. Eine wissenschaftliche Beurteilung ihres Machbarkeitspotenzials ist aber aufgrund fehlender Forschung zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht möglich.

Die Bezeichnung CDR umfasst ein ganzes Paket an Verfahren, mit denen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnommen und anschließend dauerhaft eingelagert werden kann. Als Speicherstätten kommen dabei sowohl der tiefe geologische Untergrund infrage als auch die Ozeane sowie Lagerstätten an Land, hier insbesondere Böden und Vegetation. Eine vierte Option wäre, das entnommene Kohlendioxid für die Herstellung von Produkten aus Kohlenstoff zu nutzen.

Kohlendioxid-Entnahme: Ein Ausgleich für schwer vermeidbare Restemissionen

Klimaforschende gehen davon aus, dass die Staatengemeinschaft selbst bei sehr ambitionierter Klimapolitik auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch mehrere Milliarden Tonnen Treibhausgas-Restmengen (Kohlendioxid, Methan, Lachgas) emittieren wird. Diese schwer vermeidbaren Restemissionen werden zum Beispiel bei der Zement- und Stahlherstellung, im Flug- und Schwerlasttransport, aber auch in der Landwirtschaft und bei der Müllverbrennung entstehen.

Um Treibhausgasneutralität zu erreichen, müssen diese Restemissionen durch Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme ausgeglichen werden. Dafür gibt es verschiedene Lösungsideen, die entweder auf den Ausbau der natürlichen Kohlenstoffsenken setzen oder aber technologische

Ansätze darstellen. Fachleute ordnen die vielen CDR-Methoden vier Kategorien zu:

- eine Verstärkung der biologischen Kohlendioxidsenken an Land, zum Beispiel durch Wiederaufforstung,
- eine Verstärkung der biologischen Kohlendioxidsenken im Meer, zum Beispiel durch die Wiederherstellung geschädigter oder abgestorbener Mangrovenwälder und Seegraswiesen,
- geochemische Verfahren sowie
- chemische Methoden.

Wichtig ist dabei: Es zählen nur Methoden, bei denen Handlungen des Menschen zu einer verstärkten Kohlendioxidaufnahme aus der Atmosphäre führen. Bäume, die sich auf natürliche Weise irgendwo ansiedeln, Fotosynthese betreiben und Kohlendioxid aufnehmen und binden, dürfen nicht mit in die CDR-Bilanz aufgenommen werden. Die offizielle CDR-Definition des Weltklimarates ist sogar so eng gefasst, dass Ansätze, bei denen Kohlendioxid aus fossilen Quellen an der Emissionsquelle aufgefangen und im Anschluss im Untergrund gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS) oder aber zu Produkten verarbeitet wird (Carbon Capture and Utilisation, CCU), nicht als CDR bezeichnet werden dürfen. Im Zuge dieser wird Kohlendioxid nämlich nicht aus der Atmosphäre entnommen, sondern nur sein Entweichen in dieselbige verhindert.

Einige CDR-Methoden wendet der Mensch seit Jahrhunderten an, wenn auch nicht mit dem Ziel, Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen. Dazu gehören das Wiederaufforsten abgeholzter Waldflächen, eine nachhaltige Bewirtschaftung bestehender Waldflächen, der Schutz von Mooren und Feuchtgebieten sowie regenerative Formen der Landwirtschaft, die dazu führen, dass der Humus- oder Kohlenstoffgehalt des Bodens steigt, indem der Atmosphäre Kohlendioxid und andere klimaschädliche kohlenstoffhaltige Verbindungen entzogen und meist in Form von organischem Material (Pflanzenreste, Mist etc.) im Boden eingelagert werden. Zu den bekanntesten Verfahren der Kohlenstoffanreicherung im Boden zählen zum Beispiel der Anbau mehrjähriger Gräser und Leguminosen, verbesserte Fruchtfolgen einschließlich des Anbaus von Zwischenfrüchten, der Eintrag von Kompost und Mist sowie eine reduzierte Bodenbearbeitung.

CDR-Definition des Weltklimarates
Als Kohlendioxid-Entnahmeverfahren dürfen nur jene Verfahren bezeichnet werden, bei denen das entnommene Kohlendioxid aus der Atmosphäre stammt, seine anschließende Speicherung dauerhaft erfolgt und die Entnahme ein Resultat menschlichen Handelns ist und demzufolge zusätzlich zu den natürlichen Kohlendioxid-Aufnahmeprozessen der Erde erfolgt ist.

Aufforstung und Wiederaufforstung
Als „Aufforstung“ bezeichnet der Weltklimarat das Pflanzen von Bäumen auf einem Areal, welches in der Vergangenheit nicht bewaldet war. Man könnte also auch von „Bewaldung“ sprechen. „Wiederaufforstung“ hingegen meint das Pflanzen junger Bäume in einem Gebiet, dessen einstiger Waldbewuchs durch Rodungen, Feuer oder andere menschliche Aktivitäten zerstört worden ist.

Andere CDR-Methoden hingegen sind vergleichsweise neu und dienen einzig und allein dem Ziel, die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre zu senken. Gemeint sind Methoden wie das Abscheiden von Kohlendioxid aus der Luft und seine anschließende Einlagerung (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) oder aber die Erzeugung von Bioenergie mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -einlagerung (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS). Die Erfahrungen mit und das Wissen über diese Ansätze nehmen zwar zu, noch aber werden sie in einem vergleichsweise kleinen Maßstab eingesetzt.

Des Weiteren unterscheiden sich CDR-Methoden darin, für wie lange das Kohlendioxid der Atmosphäre entzogen wird. Der mögliche Zeitraum reicht von einigen Jahrzehnten bis zu Jahrmillionen und hängt unmittelbar vom Speicherort ab. Kohlendioxid, das vom Meer aufgenommen oder aber in tief liegenden Gesteinsschichten eingelagert wird, verbleibt dort meist über längere Zeiträume als Kohlendioxid, welches von Wäldern an Land

sequestriert wird. Natürliche Speicherstätten an Land sind zudem störungsanfälliger. Feuchtgebiete beispielsweise können trockenfallen, Wälder abbrennen. Im Zuge beider Prozesse würde das Kohlendioxid wieder freigesetzt werden und in die Atmosphäre entweichen. Etwas geringer fällt das Freisetzungsrisiko aus, wenn Bäume gefällt und als langlebiges Bauholz (zum Beispiel als Dachstuhl) verwendet werden oder aber wenn aus abgeschiedenem Kohlendioxid Produkte mit langer Lebensdauer hergestellt werden.

Zu guter Letzt unterscheiden sich die verschiedenen CDR-Methoden darin, in welchem Größenmaßstab sie angewendet werden können, wie viel Kohlendioxid der Atmosphäre mit ihrer Hilfe entnommen werden kann, welche möglichen Risiken und Vorteile ein Einsatz mit sich brächte, welche Kosten im Falle eines großflächigen Einsatzes entstünden und ob die dazu benötigte Technik überhaupt schon entwickelt und einsatzbereit ist. Antworten auf diese und viele andere Fragen sucht die Wissenschaft derzeit in verschiedenen Forschungsprojekten.



1.26 > Auf Island gelingt es bereits in sehr kleinem Maßstab, Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen und im Untergrund einzulagern. Dazu wird das abgeschiedene Gas in Frischwasser gelöst und in das vulkanisch-warme Basaltgestein eingeleitet. Dessen Bestandteile reagieren chemisch mit dem Kohlendioxid, sodass es mineralisiert – das heißt, selbst zu Gestein wird.

Klimaziele: Fortschritte im Schneckentempo

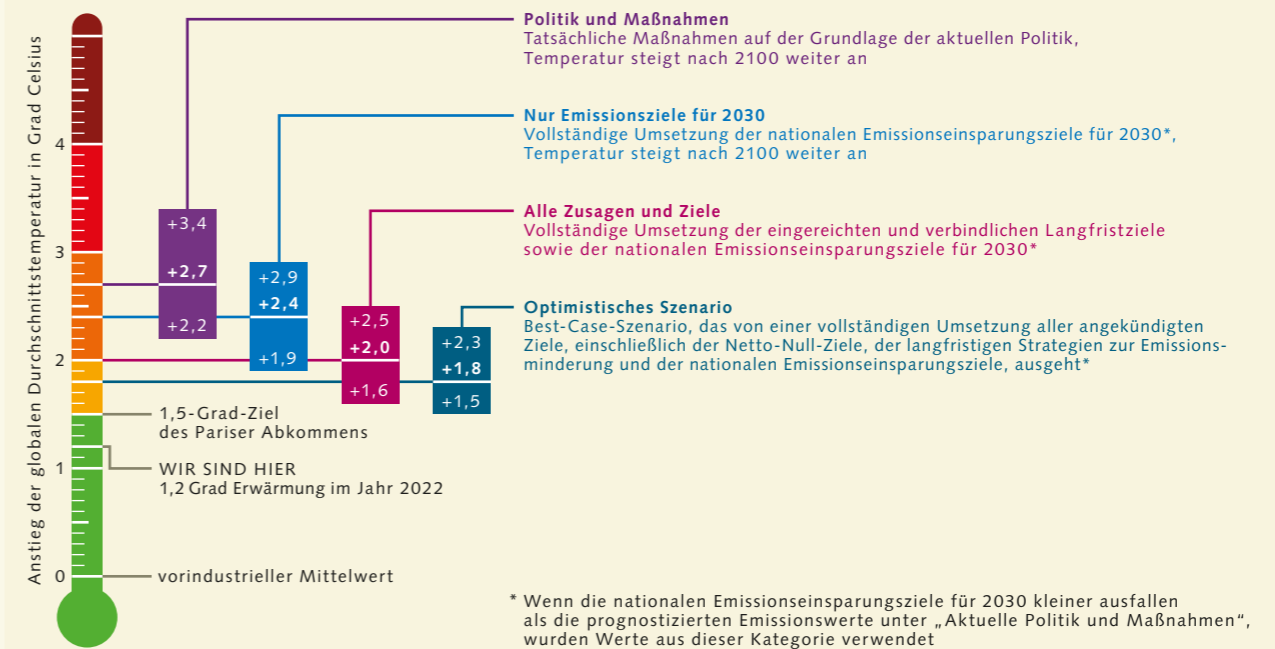
Im Pariser Klimaabkommen haben sich alle Unterzeichnerstaaten dazu verpflichtet, die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius zu begrenzen. Voraussetzung dafür ist eine Netto-Null der Treibhausgasemissionen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Um dieses Ziel zu erreichen, sind alle Staaten aufgefordert, eine nationale Klima-Langfriststrategie zu entwickeln sowie alle fünf Jahre nationale Emissionseinsparungsziele (Nationally Determined Contributions, NDCs) festzulegen und zu veröffentlichen.

Mehr als 140 Staaten sind dieser Aufgabe bereits nachgekommen. Die Bundesrepublik Deutschland beispielsweise hat sich dazu verpflichtet, bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral zu sein. Den Weg dorthin ebnet das im Juni 2021 novellierte Klimaschutzgesetz, welches der Energiewirtschaft, der Industrie, der Landwirtschaft, dem Verkehrswesen und dem Gebäudebereich verbindliche Emissionsobergrenzen vorschreibt. Bis zum Jahr 2030, so der Plan, sollen die deutschen Treib-

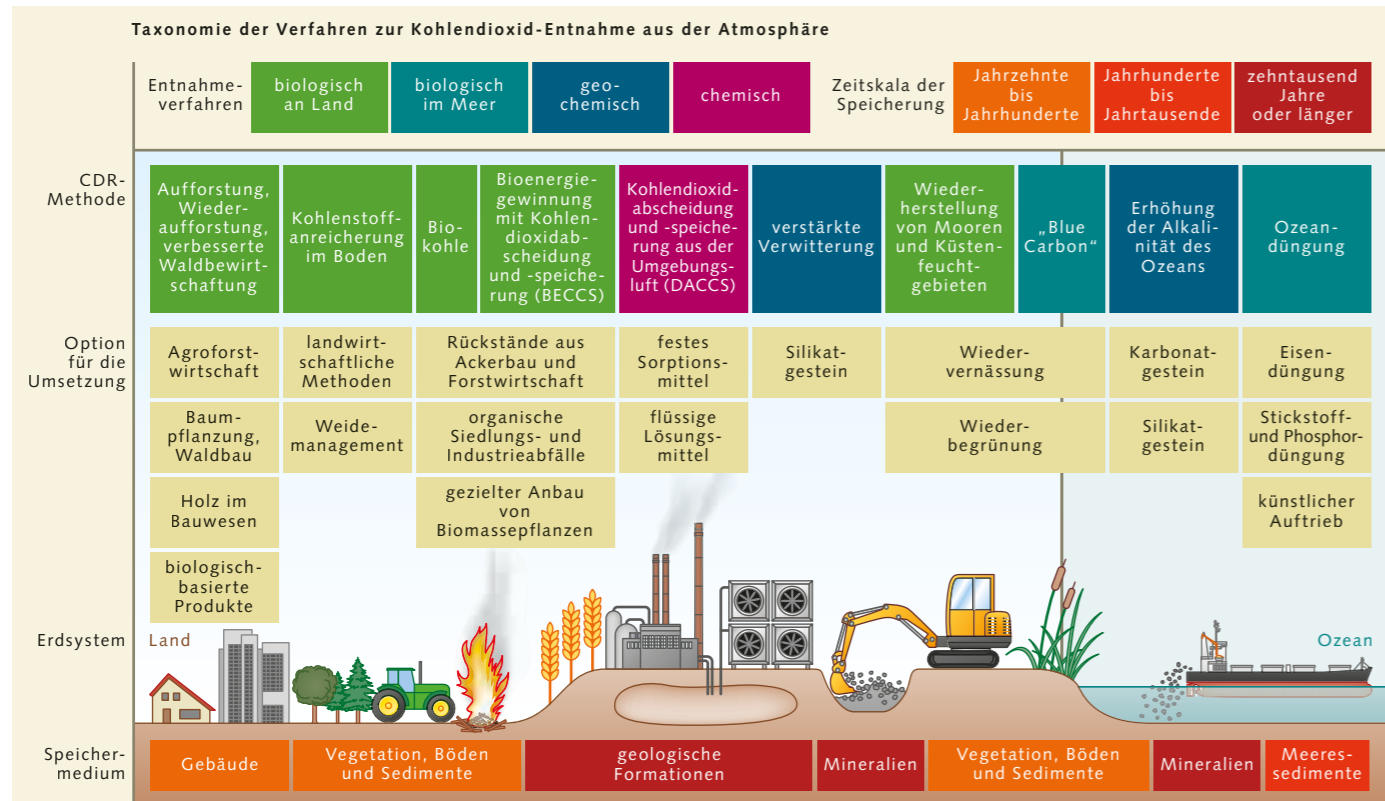
hausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 bereits um 65 Prozent gesunken sein.

In der Umsetzung der selbst gesteckten Klimaschutzziele aber hinken Deutschland und viele andere Staaten den eigenen politischen Vorgaben hinterher. Fortschritte im Kampf gegen den Klimawandel gibt es weltweit weiterhin nur im Schneckentempo. Auf Grundlage aktuell geltender Klimaschutz-Gesetze und -Maßnahmenkataloge sagen Fachleute eine globale Erwärmung von zwei bis 3,6 Grad Celsius bis zum Jahr 2100 vorher. Mehr Einsatz, politischer Wille und Investitionen in den Klimaschutz sind deshalb vonnöten. Im Jahr 2022 waren nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) fast 89 Prozent der rekordverdächtig hohen globalen Kohlendioxidemissionen im Energiesektor auf die Verbrennung fossiler Rohstoffe und die dazugehörigen Industrieprozesse (Förderung, Verarbeitung) zurückzuführen. Die Menschheit steckt demzufolge noch immer tief im fossilen Zeitalter fest.

Globaler Temperaturanstieg bis zum Jahr 2100, berechnet von Fachleuten des Climate Action Tracker (Stand: November 2022)



1.27 > Fachleute des Climate Action Tracker analysieren regelmäßig die internationale Klimapolitik und berechnen auf Grundlage der getroffenen und versprochenen Klimaschutzmaßnahmen aller Staaten, auf welche Erwärmung die Erde bis zum Jahr 2100 zusteuert. Im November 2022 deuteten die bis dato umgesetzten Maßnahmen auf eine Erwärmung von 2,2 bis 3,4 Grad Celsius hin.



1.28 > Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre könnten sowohl an Land als auch im Meer eingesetzt werden. Dieses Schaubild zeigt die verschiedenen Ansätze, gegliedert nach Art der Entnahme und nach anschließendem Speichermedium.

Kein Ersatz für umfassende Emissionseinsparungen

Angesichts des enormen Tempos, mit dem sich das Klima der Erde mittlerweile verändert, stellt sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht mehr die Frage, ob die Menschheit der Erdatmosphäre Kohlendioxid entnehmen muss, um die globale Erwärmung auf ein für Mensch und Natur erträgliches Minimum zu begrenzen. Die einhellige Antwort darauf lautet Ja! Ungeklärt sind dagegen die Fragen, wie, in welchem Umfang, mit welchen Zielen und unter welchen Rahmenbedingungen die Entnahme erfolgen soll und kann.

Fest steht: Wenn die Menschheit das Pariser Klimaziel erreichen will, dürfen Maßnahmen zur Kohlendioxid-Entnahme niemals als Ersatz für tiefgreifende Emissionsreduktionen dienen. Dafür sei die Menge der einzusparenden Treibhausgasemissionen viel zu groß, sagt der Weltklimarat. Denkbar sei der Einsatz von CDR-Methoden vor allem, um schwer vermeidbare Emissionen auszuglei-

chen. In naher Zukunft ließen sich so die vom Menschen verursachten Netto-Emissionen schneller reduzieren. Langfristig würde CDR der Menschheit helfen, sowohl unvermeidbare Kohlendioxid-Restemissionen auszugleichen als auch die Restemissionen anderer Treibhausgase. Im besten Fall gelänge es eines Tages, sogenannte netto-negative Emissionen zu erzielen. Das heißt, man würde der Atmosphäre mehr Kohlendioxid entnehmen, als an Äquivalenten freigesetzt wird. Als Folge dessen würden die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre und im zweiten Schritt auch die globale Oberflächentemperatur sinken.

Der erste Meilenstein auf diesem Weg aber wäre das Erreichen der Netto-Null-Kohlendioxidemissionen. Das Ziel einer umfassenden Treibhausgasneutralität würde etwa zehn bis 40 Jahre oder aber viel später folgen – abhängig von der Menge der restlichen Treibhausgasemissionen (Methan, Lachgas etc.), die durch die Kohlendioxid-Entnahme ausgeglichen werden müsste.

Für eine globale Netto-Null der Kohlendioxidemissionen müssten auch nicht alle Länder ihre Restemissionen

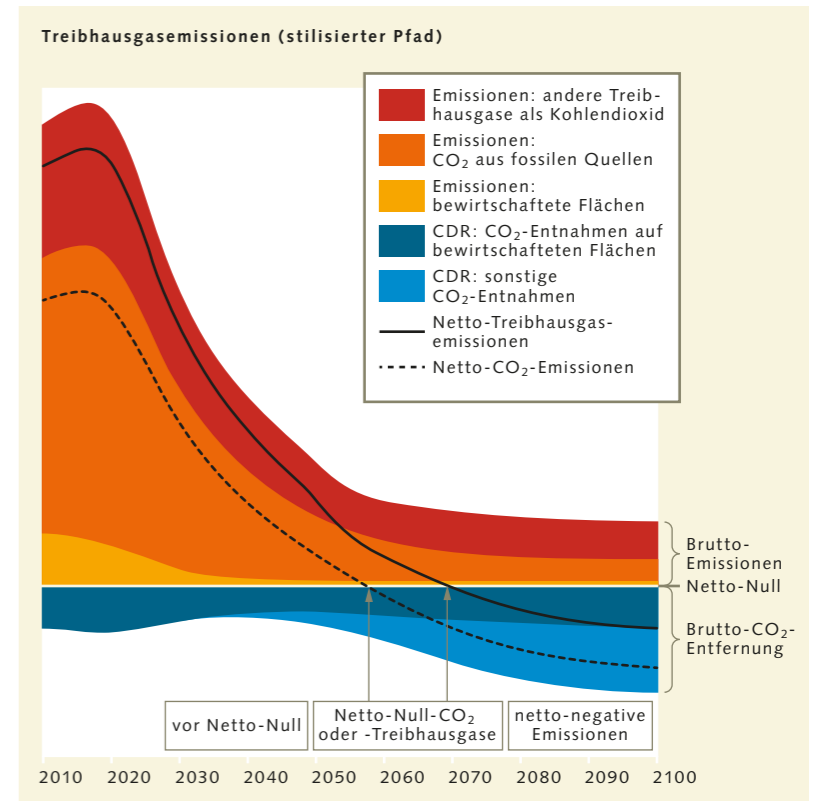
ausgleichen. Wenn es einigen Staaten gelänge, der Atmosphäre mehr Kohlendioxid zu entnehmen, als sie durch Emissionen freisetzen, entstünden sogenannte netto-negative Emissionen, also ein Emissionsguthaben. Andere Staaten könnten dieses Guthaben einlösen. Ihnen bliebe dann etwas mehr Zeit, ihren eigenen Treibhausgasausstoß zu reduzieren, ohne dass die Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre und somit auch die globale Durchschnittstemperatur weiter steigen würde.

Große Bedenken und viele ungeklärte Fragen

Bislang haben nur einige wenige Staaten andere CDR-Methoden als Aufforstung und Wiederaufforstung in ihre Klima-Langfriststrategien aufgenommen. Dennoch herrscht nach Aussage des Weltklimarates vielerorts die Sorge, dass allein die theoretische Möglichkeit und Machbarkeit einer verstärkten Kohlendioxid-Entnahme Regierungen und andere gesellschaftliche Akteure veranlassen könnte, ambitionierte Pläne für Treibhausgaseinsparungen nur halbherzig zu verfolgen oder aber im Kampf gegen den Klimawandel auf Technologien zu setzen, die noch nicht ausreichend entwickelt und erforscht sind.

Eine weitere Befürchtung lautet, dass die Hoffnung auf effektive CDR-Maßnahmen Entscheidungstragende veranlassen könnte, die Herausforderung der drastischen Treibhausgaseinsparungen nicht konsequent anzugehen und sie stattdessen in die Zukunft zu verschieben. Auf diese Weise müssten sich dann kommende Generationen mit dem stetig wachsenden Problem auseinandersetzen. Ungeklärt ist zudem, wie Kosten, Risiken und Lasten großflächiger CDR-Einsätze gleichmäßig verteilt werden könnten und wie sich negative Auswirkungen verhindern ließen – etwa auf die Nahrungsmittelproduktion, auf die Artenvielfalt und auf die Verfügbarkeit von Land.

Gebraucht würden zudem verlässliche und weltweit einheitliche Methoden, mit denen sich eine durch CDR-Maßnahmen erzielte Kohlendioxid-Entnahme und -einlagerung messen, verifizieren und bilanzieren ließen. Erst wenn diese Voraussetzungen erfüllt wären, könnte ein transparenter und funktionierender Markt entstehen, auf dem Emissionsguthaben gehandelt und finanzielle Mittel für die Umsetzung von CDR-Maßnahmen generiert werden könnten.



Nach Ansicht des Weltklimarates gilt es noch viele Herausforderungen zu meistern, bevor CDR-Methoden jenseits von Wiederaufforstung großflächig zum Einsatz kommen könnten. Dazu gehören die vielen noch offenen Forschungsfragen, die fehlende technische Entwicklungsreife, hohe Kosten sowie die Tatsache, dass ein möglicher künftiger Einsatz neuartiger CDR-Verfahren auch mit den übergreifenden Entwicklungs- und Nachhaltigkeitszielen der Menschheit im Einklang stehen muss. Aus diesem Grund bräuchte es geeignete Gesetze und Vorschriften sowie dazugehörige politische Entscheidungsprozesse, bevor neuartige CDR-Verfahren eingesetzt werden können.

Wie viel CDR wird künftig gebraucht?

Die Wissenschaft untersucht Ansätze und Ideen für den Kampf gegen den Klimawandel mithilfe integrierter Assessment-Modelle (Integrated Assessment Models, IAMs). Diese werden entwickelt, um zu verstehen, wie sich bestimmte gesellschaftliche oder ökonomische Ent-

1.29 > Eine aktive Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre wird benötigt, um kurzfristig die Netto-Emissionen des Menschen zu reduzieren, mittelfristig die Ziele der Kohlendioxid- und Treibhausgasneutralität zu erreichen sowie um langfristig die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre durch negative Emissionen zu senken.

1.30 > Durch Brandrodungen des Amazonas-Regenwaldes wurde hier, in der Nähe der brasilianischen Stadt Porto Velho, Ackerland für den Anbau von Soja gewonnen. Mit den Wäldern gehen riesige Kohlenstofflagerstätten verloren, denn die Bäume speichern Kohlenstoff sowohl in ihrer Holz- und Blattmasse als auch im Waldboden.



wicklungen auf die Natur und das Klima auswirken. Aus diesem Grund fließen in jedes dieser Modelle sowohl Informationen zum System Erde als auch zur Gesellschaft ein. Das heißt, die Modelle berücksichtigen Naturgesetze ebenso wie Verhaltensänderungen der Menschen und berechnen auch unerwünschte Nebenwirkungen oder aber beabsichtigte Vorteile bestimmter Maßnahmen und Entscheidungen. Die Modellaussagen sind zwar immer mit einer gewissen Unsicherheit belastet, dennoch liefern IAMs wertvolle Einsichten. Sie zeigen zum Beispiel auf, wie sich unsere Wirtschaft, Gesellschaft und Energieversorgung verändern müssten, wenn ein bestimmtes Klimaziel erreicht werden soll, oder aber welche Effekte bestimmte Emissionsreduktionen für Mensch und Natur hervorrufen würden.

Für den sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarates haben Forschende der IPCC-Arbeitsgruppe III Tausende solcher integrierter Assessment-Modelle ausgewertet. Dabei wurde deutlich, dass alle Modelle, die eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf zwei Grad Celsius oder weniger prognostizieren, den Einsatz von Methoden zur Kohlendioxid-Entnahme fest mit einpla-

nen – und zwar in einem deutlich größeren Ausmaß als alles, was heutzutage bereits praktiziert wird.

In welchen Mengen Kohlendioxid künftig der Atmosphäre entnommen werden muss, um das Klima zu stabilisieren, ist noch nicht genau geklärt. Die Modellergebnisse erlauben nur grobe Schätzungen. Diese aber bewegen sich für landbasierte biologische Methoden wie zum Beispiel für Aufforstung und Wiederaufforstung im Bereich von 900 Millionen Tonnen Kohlendioxid netto im Jahr 2030. Netto bedeutet dabei, dass die Kohlendioxid-Entnahme durch (Wieder-)Aufforstung 900 Millionen Tonnen höher sein muss als die Summe der zur gleichen Zeit entstehenden globalen Landnutzungsemissionen (etwa durch Entwaldung in bestimmten Regionen). Zwei Jahrzehnte später müsste die Netto-Entnahmemenge dann schon fast drei Milliarden Tonnen Kohlendioxid betragen, wenn die globale Erwärmung langfristig auf unter zwei Grad Celsius begrenzt werden sollte. Hinzu kämen ähnlich hohe Kohlendioxid-Entnahmemengen durch die Energiegewinnung aus Biomasse sowie durch Direct Air Capture. Bei beiden Methoden müsste das abgeschiedene Kohlendioxid anschließend irgendwo sicher und dauerhaft eingelagert werden.

Der Weltklimarat kommt angesichts dieser hohen Schätzungen zu dem Schluss, dass bereits existierende Programme zur landbasierten Kohlendioxid-Entnahme massiv und sehr schnell ausgebaut werden müssten. Ob dies im erforderlichen Rahmen gelingen wird, sei jedoch fraglich.

Bislang sind die vom Weltklimarat untersuchten Assessment-Modelle noch nicht in der Lage, meeresgestützte Methoden der Kohlendioxid-Entnahme zu berücksichtigen. Daher liefert der sechste IPCC-Sachstandsbericht auch keine Angaben dazu, in welcher Größenordnung sie zum Erreichen des Pariser Klimaabkommens beitragen könnten. Erste Forscherteams haben es sich jedoch schon zur Aufgabe gemacht, IAMs mit der Komponente meeresbasierter Kohlendioxid-Entnahme zu entwickeln – darunter auch Forschende aus Deutschland. Ihre Arbeitsmotivation speist sich aus der Erkenntnis, dass der Ozean in der Vergangenheit bereits ein Viertel der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen aufgenommen und gespeichert hat – mit weitreichenden Folgen für Mensch und Natur.

CONCLUSIO

Die Klimakrise kennt nur eine Lösung: Treibhausgasneutralität

Durch den Ausstoß von Treibhausgasen hat die Menschheit in den zurückliegenden 120 bis 170 Jahren einen Anstieg der globalen Oberflächentemperatur um 1,15 Grad Celsius verursacht. Infolge dieser Erwärmung haben sich viele Komponenten des Erdklimas in einer Geschwindigkeit verändert, wie sie unser Planet seit Jahrtausenden nicht erlebt hat. Die Folgen dieser Klimaveränderungen schaden Mensch und Natur in einem zunehmenden Maß und berauben sie Stück für Stück ihrer Lebensgrundlagen. Dazu zählen in erster Linie Gesundheit und Unversehrtheit sowie ausreichend Wasser und Nahrung.

Alle Gebiete der Erde sind mittlerweile vom Klimawandel betroffen. Das Ausmaß der Veränderungen und die damit verbundenen Folgen und Risiken für Mensch und Natur unterscheiden sich jedoch von Region zu Region. Besondere Gefahren gehen von den zunehmenden Extremereignissen aus. Treten Hitzewellen, Starkregen, schwere Stürme, Dürren oder Überflutungen zudem gleichzeitig auf, vergrößert sich das Gesamtrisiko und es fällt Mensch und Natur schwerer, wirksame Schutzmaßnahmen zu treffen. Der Klimawandel erhöht zudem die Risiken anderer menschengemachter Stressfaktoren wie Umweltzerstörung, Ressourcenübernutzung und Verstädterung und verringert so die Anpassungsmöglichkeiten aller Bewohner der Erde.

Jedes weitere Zehntelgrad Erwärmung wird dazu führen, dass sich der angestoßene Klimawandel verstärkt. Das heißt, das Ausmaß und die extreme Geschwindigkeit der Veränderungen sowie die damit verbundenen Folgen und Risiken werden mit jedem weiteren Temperaturanstieg zunehmen. Begrenzen lässt sich eine Eskalation der Klima- und Artenvielfaltskrise nur durch wirkungsvolle Anpass-

sungsmaßnahmen sowie durch eine Vermeidung jeglicher weiterer Treibhausgasemissionen (Treibhausgasneutralität).

Klimaforschende gehen jedoch davon aus, dass die Staatengemeinschaft selbst bei sehr ambitionierter Klimapolitik auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch Treibhausgas-Restmengen emittieren wird, darunter Kohlendioxid-Restmengen, vor allem aber Methan und Lachgas. Diese schwer vermeidbaren Emissionen werden zum Beispiel bei der Zement- und Stahlherstellung, im Flug- und Schwerlasttransport aber auch in der Landwirtschaft und bei der Müllverbrennung entstehen.

Um die globale Erwärmung zu stoppen, müssen diese Restemissionen ausgeglichen werden. Das heißt, Kohlendioxid muss im selben Umfang der Erdatmosphäre entnommen werden. Entsprechende Lösungsideen existieren: Sie setzen entweder auf den Ausbau der natürlichen Kohlenstoffsenken oder aber stellen technologische Ansätze dar. Zudem unterscheiden sich die Entnahmemethoden darin, für welchen Zeitraum sie das Kohlendioxid der Atmosphäre entziehen und in welchem Größenmaßstab sie angewendet werden können.

Unklar ist in vielen Fällen jedoch, welche möglichen Risiken ein Einsatz mit sich brächte, welche Kosten entstünden und ob die benötigte Technik überhaupt schon entwickelt und einsatzbereit ist. Es fehlt somit elementares Wissen über Maßnahmen, die schon bald im industriellen Maßstab durchgeführt werden müssen, wenn die Menschheit ihr Ziel einer treibhausgasneutralen Zukunft erreichen will. Eines aber steht heute schon fest: Maßnahmen zur Kohlendioxid-Entnahme dürfen niemals als Ausrede dafür dienen, vermeidbare Treibhausgasemissionen fortzusetzen, denn im Kampf gegen die Klima- und Artenvielfaltskrise zählt am Ende jede einzelne Tonne eingespartes Kohlendioxid.

2 Die Rolle des Ozeans im Kohlenstoffkreislauf der Erde

> Der Weltozean ist der zweitgrößte Kohlenstoffspeicher der Erde. Er enthält etwa 40 000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Mit diesem Reservoir übertrifft der Ozean den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre um mehr als das 50-Fache. Meer und Atmosphäre wiederum stehen in einem steten Kohlenstoffaustausch. Je mehr die Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre steigt, desto mehr Kohlendioxid nimmt der Ozean auf und reduziert damit das Tempo des Klimawandels.



Wie der Ozean Kohlendioxid aufnimmt

> Der Weltozean hat in den zurückliegenden Jahrzehnten rund 25 Prozent der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen aufgenommen und den Klimawandel somit maßgeblich gebremst. Dieser Klimaservice gelingt mithilfe dreier natürlicher Kohlenstoffpumpen, deren Funktionsweise durchaus komplex erscheinen mag. Gemeinsam aber sind sie der Grund, warum der Weltozean der zweitgrößte Kohlenstoffspeicher der Erde ist – auch wenn er mit der Ozeanversauerung einen hohen Preis dafür zahlt.

Kohlenstoff: Ein lebenswichtiges Element

Kohlenstoff ist ein essenzieller Baustein des Lebens auf unserem Planeten. Aus kohlenstoffhaltigen Verbindungen besteht alles von Lebewesen produzierte Gewebe und damit Pflanzen, Tiere und auch der Mensch. Kohlenstoff lässt tierische und pflanzliche Zellen arbeiten. Er steckt in unserer Nahrung, in Holz und Kohle, Marmor und Kalkstein sowie in erdölbasierten Kunst- und Kraftstoffen. Diese Formenvielfalt ist auf die Bindungsfähigkeit der Kohlenstoffatome zurückzuführen. Besonders häufig treten sie

in Verbindung mit Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff oder Phosphor auf. Fachleute kennen mittlerweile weit mehr als eine Million verschiedene Kohlenstoffverbindungen, und mit jedem Jahr kommen neue hinzu, sodass ihre Erforschung eine eigene Fachrichtung in der Chemie bildet: die Organische Chemie.

Aufgrund seiner chemischen Eigenschaften und weiten Verbreitung wird Kohlenstoff zu jedem Zeitpunkt überall auf der Welt auf natürliche Weise aufgenommen oder freigesetzt, chemisch gebunden oder aber umgewandelt. Zudem ist er in nahezu alle biologischen Prozesse invol-

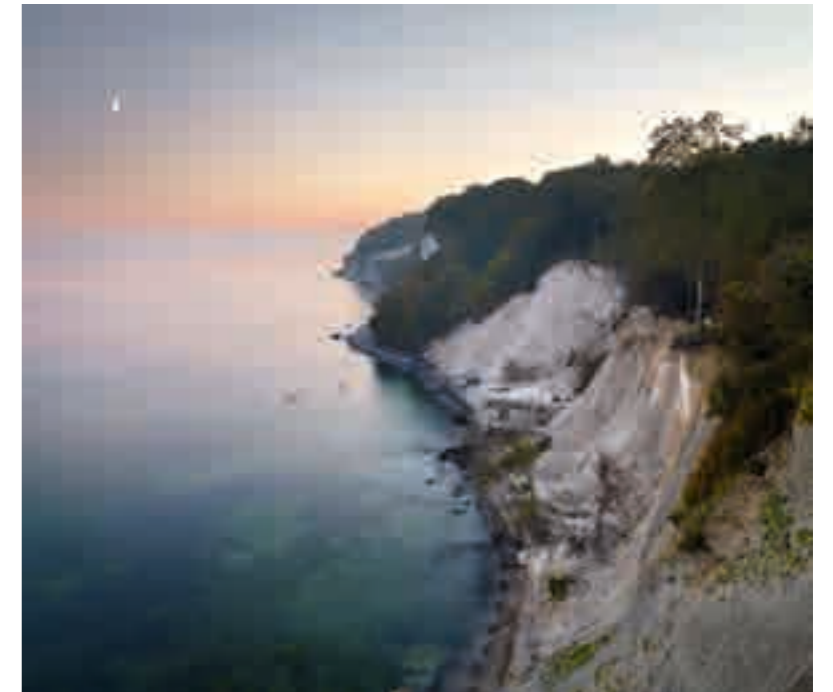
viert, in denen Energie produziert oder aber konsumiert wird. Dazu gehören zum Beispiel die Photosynthese, die Sauerstoffatmung und die Chemosynthese. Das bedeutet, Kohlenstoff ist ständig in Bewegung und wandert im Laufe der Zeit durch alle Komponenten des Erdsystems. Für jeden Schritt dieser Reise, die auch als Kohlenstoffkreislauf bezeichnet wird, benötigt der Kohlenstoff unterschiedlich viel Zeit. Mal werden er oder seine Verbindungen innerhalb weniger Minuten freigesetzt (Atmung, Verbrennung, Vulkanausbruch) oder aufgenommen (Fotosynthese, Lösung im Meerwasser); mal wird er für Jahrtausende oder Jahrmillionen an einem Ort eingelagert (Permafrost, Entstehung fossiler Rohstoffe). Dabei verändert sich auch sein Aggregatzustand: Kohlenstoff und seine Verbindungen treten in Gasform auf, zum Beispiel als Kohlendioxid und Methan, oder als Flüssigkeit sowie im festen Zustand.

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

Kohlenstoffspeicher Ozean

Der Ozean ist nach der Gesteinshülle der Erde (Sedimentgesteine an Land und im Meeresboden) der zweitgrößte Kohlenstoffspeicher unseres Planeten. Er enthält etwa 40 000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, wobei der größte Teil im Meerwasser gelöst ist. Mit diesem Kohlenstoffreservoir übertrifft der Ozean den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre um mehr als das 50-Fache. Beide Systeme stehen in einem steten Kohlenstoffaustausch. Pro Jahr wandern mehr als 150 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Form des Treibhausgases Kohlendioxid zwischen Ozean und Atmosphäre hin und her. Bei einem Umrechnungsfaktor von 3,664 umfasst der jährliche globale Gasaustausch zwischen Meer und Atmosphäre demzufolge mehr als 549 Milliarden Tonnen Kohlendioxid.

Weil die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre aufgrund der vom Menschen verursachten Emissionen steigt, absorbiert auch der Ozean mehr Kohlendioxid. Im Gegensatz zur vorindustriellen Zeit nimmt er nun mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf, als er an anderer

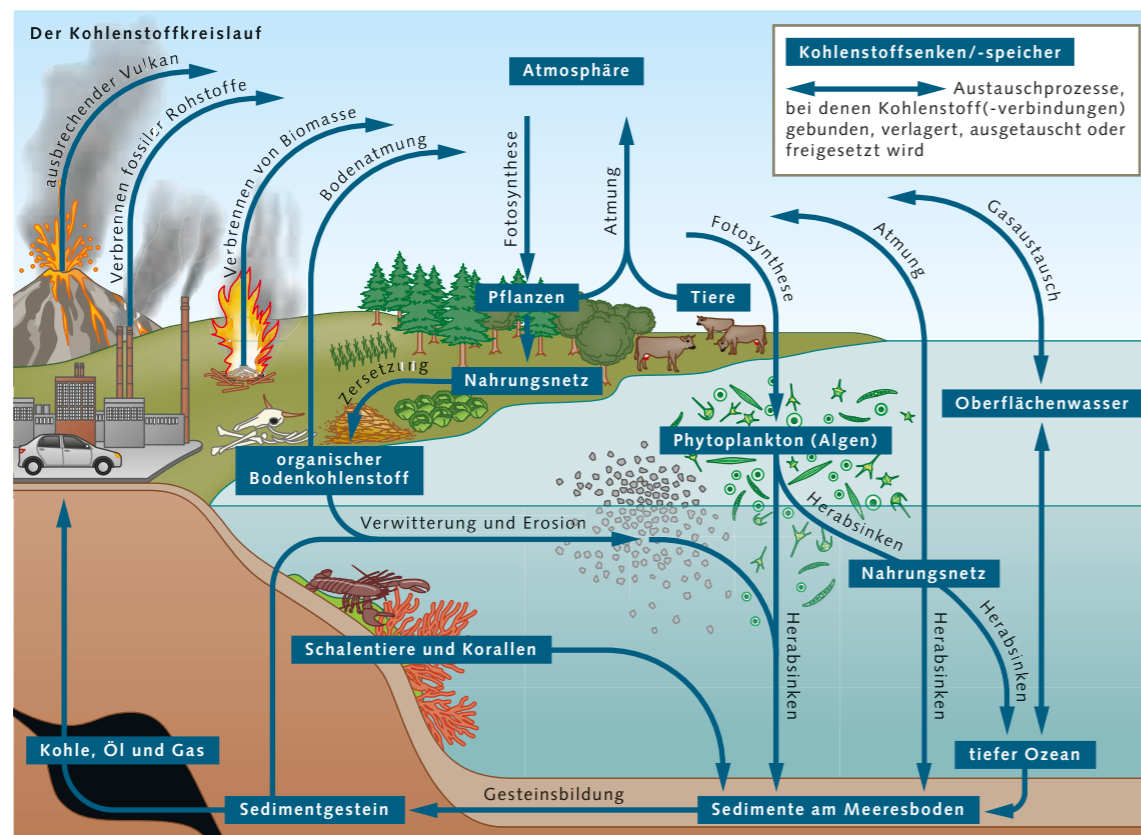


Stelle abgibt. Somit hat der Weltozean in den zurückliegenden Jahrzehnten etwa 25 Prozent der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen aus der Atmosphäre aufgenommen und so die Erderwärmung maßgeblich gebremst. Schätzungsweise 40 Prozent dieser vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen im Weltozean wurden vom Südlichen Ozean absorbiert. Dessen besonders hohe Aufnahmefähigkeit unterliegt allerdings großen natürlichen Schwankungen, was eine genaue Bilanzierung der Kohlendioxidaufnahme des Weltozeans so schwierig macht.

Die Kohlendioxidaufnahme des Ozeans erfolgt an der Meeresoberfläche, wo sich das Kohlendioxid aus der Luft im Meerwasser löst. Ob und wie viel atmosphärisches Kohlendioxid im Wasser gelöst wird, hängt in erster Linie vom Unterschied im sogenannten Kohlendioxid-Partialdruck zwischen Meerwasser und Atmosphäre ab. Vereinfacht gesagt, handelt es sich dabei um den Druck, den das im Oberflächenwasser gelöste und das in der Atmosphäre befindliche Kohlendioxid jeweils erzeugt. Der natürliche Gasaustausch zwischen Meerwasser und Atmosphäre zielt immer auf einen Ausgleich dieser Drücke ab. Das heißt, Oberflächenwasser mit einem gerin-

2.2 > Die Kreidefelsen auf Rügen bestehen aus Karbonatgestein. Fällt kohlendioxidreiches Regenwasser auf diese Felsen, verwittert das Gestein und säurebindende Lösungsprodukte werden in die Ostsee gewaschen. Diese reagieren mit freien Protonen im Meerwasser und mindern dessen Versauerung.

2.1 > Der natürliche Kohlenstoffkreislauf der Erde: Blau hinterlegt sind Kohlenstoffsinken oder -speicher, in denen Kohlenstoff oder eine seiner vielen Verbindungen eingelagert wird. Die Pfeile stellen Austauschprozesse dar, bei denen Kohlenstoff oder eine seiner vielen Verbindungen gebunden, verlagert, ausgetauscht oder freigesetzt wird.



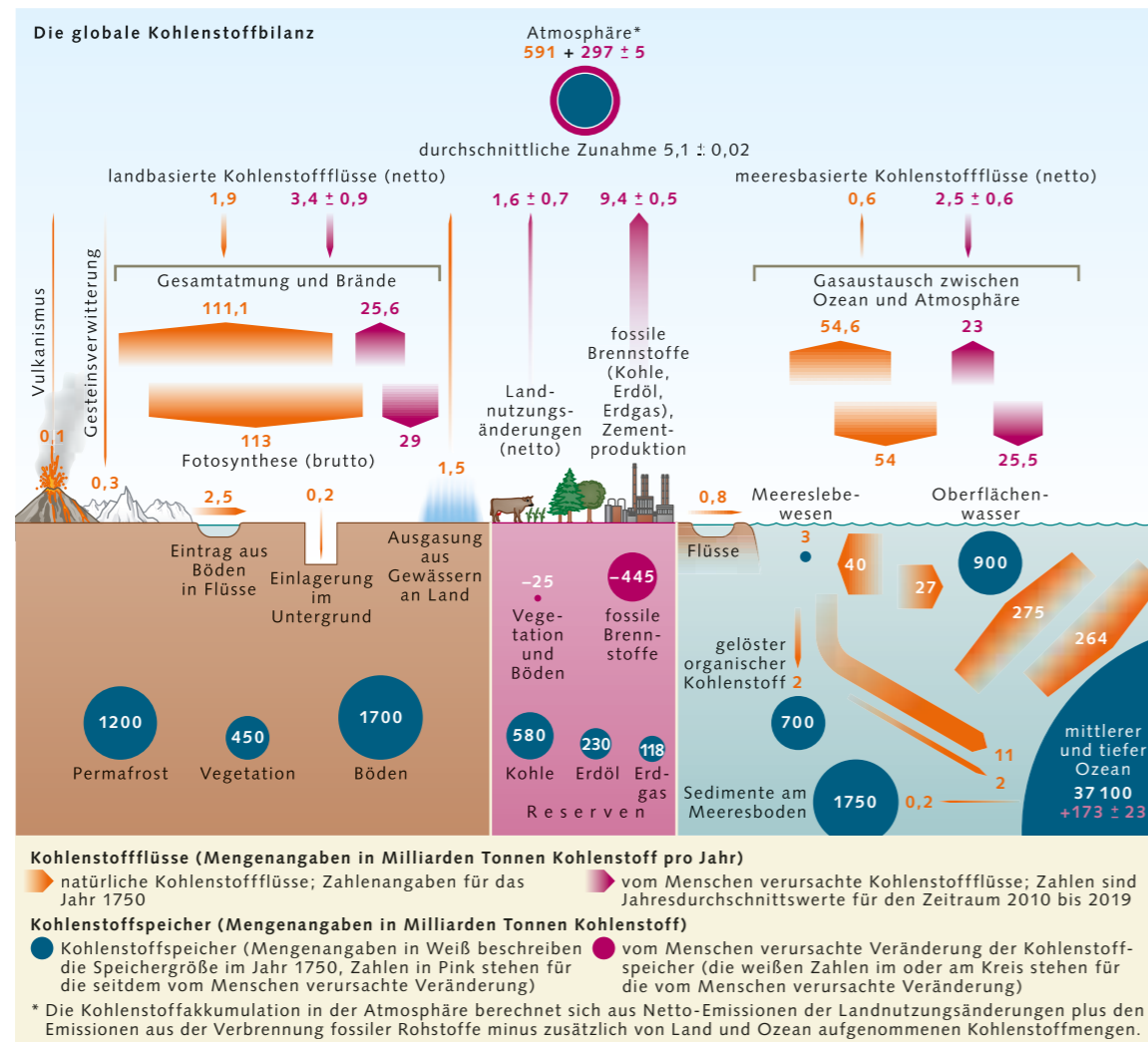
geren Kohlendioxid-Partialdruck als die darüberliegende Atmosphäre nimmt so lange Kohlendioxid aus der Luft auf, bis der Druckunterschied ausgeglichen ist. Der Druckausgleich erfolgt umgekehrt auch vom Wasser in die Atmosphäre.

Wichtig für die Kohlendioxidaufnahme des Ozeans sind zudem die Wassertemperatur sowie der Salzgehalt, Wind, Wellen und Meeresströmungen. Die Temperatur und der Salzgehalt des Oberflächenwassers beeinflussen, wie viel Gas sich im Wasser lösen kann – je wärmer und salziger das Wasser ist oder wird, desto weniger Kohlendioxid kann es aufnehmen oder speichern und desto eher gibt es auch Kohlendioxid an die Atmosphäre ab. Dieses

physikalische Gesetz erklärt unter anderem, warum der Weltozean zum Beispiel im warmen, äquatorialen Teil des Pazifiks Kohlendioxid an die Atmosphäre abgibt, während er im kühlen Südlichen Ozean sowie im Nordatlantik große Mengen an Kohlendioxid aufnimmt.

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

2.3 > Die globale Kohlenstoffbilanz in Zahlen: In Pink werden die vom Menschen verursachten Kohlenstoffflüsse dargestellt. Sie sind der Grund, warum sich Kohlendioxid in der Atmosphäre anreichert und die Temperaturen auf der Erde steigen.



Eine chemische Gleichgewichtsreaktion

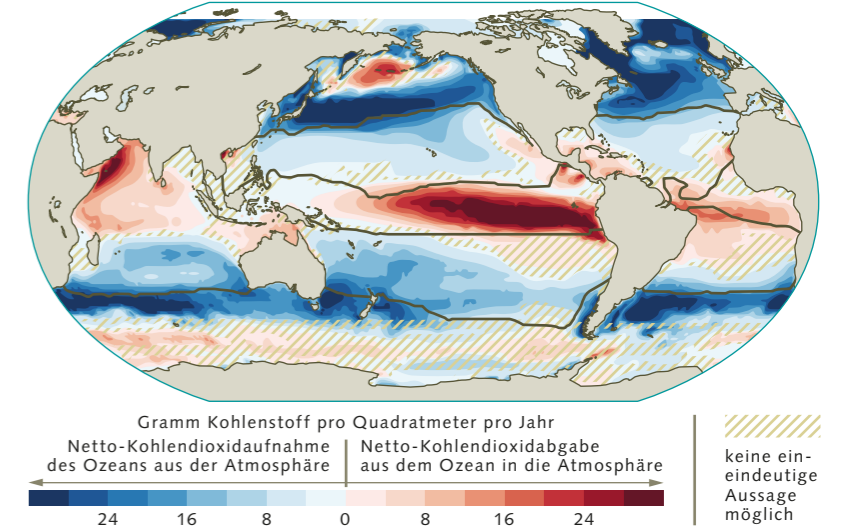
Steigt die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, führt das zumeist innerhalb weniger Monate zu einem Anstieg der Kohlendioxidkonzentration im Oberflächenwasser. Sowie sich Kohlendioxid im Meerwasser löst, kommt es zu einer chemischen Veränderung des Oberflächenwassers, denn anders als zum Beispiel Sauerstoff löst sich Kohlendioxid nicht einfach nur im Meer. Eine Teilmenge des Gases reagiert mit den Wassermolekülen und bildet Kohlensäure. Deren Moleküle wiederum spalten sich bis auf ganz wenige Ausnahmen sofort auf: in Hydrogenkarbonat und ein Wasserstoffkation (oftmals auch als Proton bezeichnet). Spaltet das entstandene Hydrogenkarbonat ein weiteres Proton ab, entsteht wiederum Karbonat.

Das Oberflächenwasser enthält dann Kohlenstoff in drei unterschiedlichen gelösten Formen:

- als Kohlendioxid (CO₂), welches auch wieder in die Atmosphäre entweichen kann. Es macht nur rund ein Prozent des im Ozean gespeicherten Kohlenstoffs aus, bestimmt aber den Kohlendioxid-Partialdruck des Meerwassers;
- als Hydrogenkarbonat, welches etwa 90 Prozent des im Ozean gespeicherten Kohlenstoffs ausmacht;
- als Karbonat, zu dem man wissen muss, dass es nicht nur im Zuge der Kohlensäure-Kettenreaktion entsteht, sondern auch durch Gesteins- und Mineralverwitterung an Land freigesetzt wird (dazu später mehr).

Alle drei Parameter stehen in einem ausbalancierten Konzentrationsgleichgewicht zueinander, was bedeutet, dass Veränderungen eines Parameters sofort zu Ausgleichsreaktionen bei den zwei anderen führen. Ein wichtiges Beispiel: Wenn Wasser und gelöstes Kohlendioxid zu Kohlensäure reagieren, entsteht daraus Hydrogenkarbonat. Dabei sinkt der Anteil des gelösten Kohlendioxids im Meerwasser und somit dessen Kohlendioxid-Partialdruck. Als Reaktion darauf nimmt der Ozean wieder neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf, um den Partialdruck zwischen Meer und Atmosphäre auszugleichen. Die che-

Netto-Kohlendioxidfluss zwischen Atmosphäre und Ozean (1994 bis 2007)



mische Reaktionskette beginnt von vorn. Dieser Prozess kann sich jedoch nicht endlos wiederholen. Durch die Kohlendioxidaufnahme verschiebt sich nämlich das Konzentrationsgleichgewicht zwischen gelöstem Kohlendioxid, Kohlensäure, Hydrogenkarbonat und Karbonat solchermaßen, dass die Kohlendioxidaufnahme des Oberflächenwassers langfristig zum Erliegen kommt, wenn nicht andere oder aber neue Prozesse das Gleichgewicht wieder stören oder verschieben.

Ozeanversauerung: Eine Frage der freien Protonen

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

2.4 > Nicht überall auf der Welt nimmt der Ozean gleich viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf. Diese Karte zeigt, dass die Kohlendioxidaufnahme vor allem im kalten Südozean sowie im Nordatlantik und Nordpazifik erfolgt (in Blau). In den warmen tropischen Meeresgebieten hingegen gibt der Ozean deutlich mehr Kohlendioxid an die Atmosphäre ab, als er aufnimmt (in Rot). In den schraffiert dargestellten Gebieten ist die Lage nicht eindeutig.

Ozeanversauerung: Das große Kohlendioxid-Problem

Nimmt der Ozean Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf, kommt es zu grundlegenden Veränderungen im Karbonathaushalt des Ozeans, wie Fachleute sagen. Karbonate werden bei der Kohlendioxidbindung im Oberflächenwasser verbraucht, Wasserstoffkationen (Protonen) unter Umständen freigesetzt. Die Anzahl der freien Wasserstoffkationen wiederum bestimmt den Säuregehalt des Meerwassers. Je größer ihre Zahl ist, desto mehr Säure enthält das Wasser.

Gemessen wird die Konzentration der Wasserstoffkationen in einer Lösung mithilfe des sogenannten pH-Wertes. Er gibt an, wie sauer beziehungsweise basisch eine Flüssigkeit ist. Die pH-Wert-Skala reicht dabei

von 0 (sehr sauer) bis 14 (sehr basisch). Das bedeutet, je mehr Wasserstoffkationen in einer Lösung vorhanden sind, desto kleiner ist wiederum der pH-Wert.

Der mittlere pH-Wert der Meeresoberfläche ist seit Beginn der Industrialisierung von 8,2 auf 8,1 gesunken. Dieser vermeintlich kleine Schritt auf der logarithmischen pH-Skala entspricht einem realen Anstieg des Säuregehalts um 26 Prozent – eine Veränderung, wie sie die Weltmeere und ihre Bewohner in den letzten Jahrtausenden noch nicht erlebt haben. Mittlerweile reicht das Versauerungssignal in Tiefen von bis zu 2000 Metern, im Nordatlantik und dem Südlichen Ozean sogar darüber

hinaus. Sollte die Menschheit auch weiterhin so viel Kohlendioxid emittieren wie bisher, wird der pH-Wert der Ozeane bis zum Jahr 2100 voraussichtlich um weitere 0,44 Einheiten sinken. Das heißt nicht, dass die Ozeane tatsächlich sauer sind, denn auch bei Werten um 7,6 bis 7,7 bleiben sie chemisch betrachtet basisch, doch sind sie – relativ gesehen – saurer als zuvor.

Parallel zum pH-Wert sinkt mit zunehmender Kohlendioxidaufnahme des Ozeans auch die Karbonatkonzentration. Die Sättigung des Meerwassers mit Karbonationen wiederum ist ein überlebenswichtiger Parameter für alle Meeresorganismen, die Schalen oder Skelettstrukturen aus Kalk (Kalziumkarbonat) bilden. Kalk kommt bei Meeresorganismen vor allem in den Formen Aragonit und Kalzit vor, wobei vor allem Aragonit leicht löslich ist. Karbonatgesättigte Wassermassen besitzen einen Karbonat-Sättigungsgrad (Ω) von 1. Dieser entspricht einer Karbonatkonzentration von 66 Mikromol pro Kilogramm Wasser. Liegt die Konzentration leicht über diesem Wert, gilt das Meerwasser als übersättigt. Sinkt sie dagegen darunter, spricht man von untersättigten Wassermassen. In diesem Fall löst sich das von den Organismen gebildete Aragonit im Wasser auf.

Untersättigtes Meerwasser gibt es in allen Ozeanen, denn aufgrund der zunehmenden Löslichkeit des Kalks mit abnehmender Wassertemperatur und zunehmendem Druck sind vor allem die tieferen Meeresschichten in der Regel untersättigt. Die Grenze zwischen der untersättigten und der übersättigten Wasserschicht wird als Sättigungshorizont bezeichnet. Durch die zunehmende Einlagerung kohlenstoffreichen Oberflächenwassers in mittlerer bis großer Wassertiefe, so berichtet der Weltklimarat, verlagert sich diese Grenze, unterhalb derer sich der Kalk auflöst, immer weiter Richtung Meeresoberfläche. In einigen Regionen des westlichen Atlantischen Ozeans beispielsweise ist der Kalzit-Sättigungshorizont seit Beginn der Industrialisierung um rund 300 Meter gestiegen. Im Arktischen Ozean hat sich der tiefe Aragonit-Sättigungshorizont im Zeitraum von 1765 bis 2005 um durchschnittlich 270 Meter Richtung Meeresoberfläche verlagert. Das heißt, auch dort sind immer größere Anteile der Wassersäule von dem Karbonatmangel betroffen.

Ungewissheit über Anpassungsfähigkeiten

Die zunehmende Versauerung der Meere wirkt sich auf verschiedene biologische Prozesse aus und somit auf das Leben vieler Meeresbewohner. Durch die abnehmende Verfügbarkeit von Karbonaten fällt es vor allem kalkbildenden Organismen wie Korallen, Muscheln, Flügelschnecken und Kammerlingen schwerer, ihre Kalkschalen oder -skelette zu bauen. Diese werden dünner und zerbrechlicher. Von Stachelhäutern wie

Seeigeln und Seesternen weiß man, dass sie mit zunehmender Versauerung weniger wachsen und früher sterben.

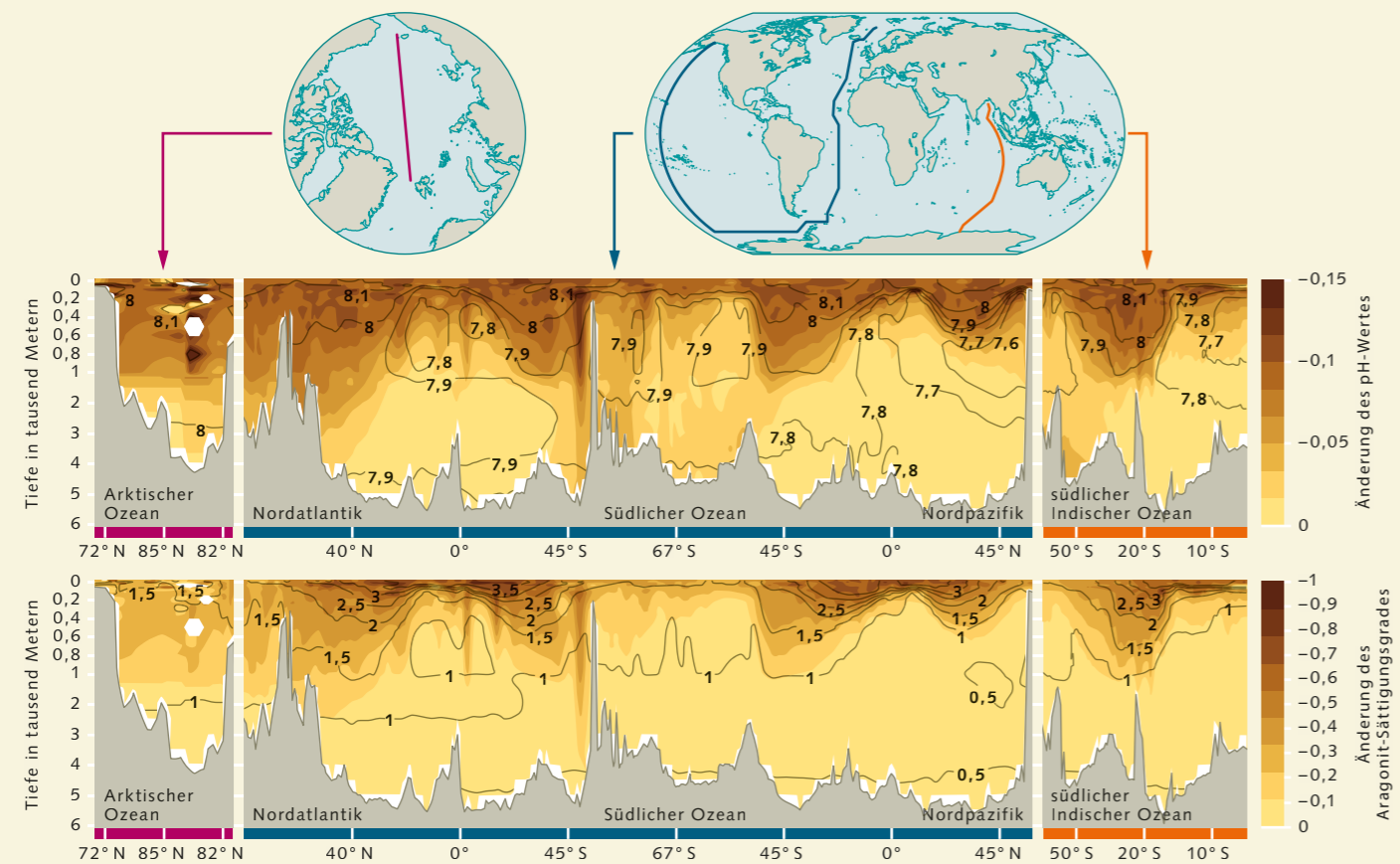
Wie stark Meeresbewohner jedoch durch die Versauerung und steigende Kohlendioxidkonzentration gefährdet sind, hängt von der Art und der Familie ab. Für Korallen, Mollusken und Stachelhäuter zum Beispiel ist das Risiko größer als für Krabben und Garnelen. Fische sind vor allem als Embryo im Ei sowie als Larve gefährdet. In beiden frühen Entwicklungsstadien besitzen die Tiere nämlich noch keine funktionierende Säure-Base-Regulation. Diese verhindert oder minimiert später Schäden, wenn im kohlendioxidreichen Wasser auch die Körperflüssigkeiten der Fische nach und nach versauern. Infolgedessen stirbt ein Teil der Jungtiere, andere wachsen schlechter oder entwickeln sich anders als gewohnt. Es gibt zudem Hinweise, dass die Ozeanversauerung das Verhalten von Meerestieren auf komplexe Weise beeinflusst, indem sie zum Beispiel neuronale Prozesse beeinträchtigt oder aber das Lern- und Sehvermögen der Organismen.

Manche Algen und Seegräser hingegen profitieren von kohlendioxidreichem Wasser. Sie können im Zuge der Fotosynthese mehr Kohlendioxid aufnehmen und in Biomasse umwandeln. Das bedeutet, die Organismen wachsen schneller und können in Einzelfällen auch Hitzestress besser bewältigen.

Fraglich ist bislang noch, in welchem Umfang sich die verschiedenen Meereslebewesen an die Ozeanversauerung anpassen können. Einzellige Algen und kleines Zooplankton mit kurzen Fortpflanzungszyklen scheinen besser gewappnet zu sein als größere Lebewesen mit langen Reproduktionszyklen. Immer mehr Forscherinnen und Forscher teilen zudem die Ansicht, dass die zunehmende Ozeanversauerung und die steigenden Sauerstoffverluste des Meeres gemeinsam einen negativen Einfluss auf die Temperaturtoleranz der einzelnen Arten haben, vor allem in tropischen und polaren Gewässern. Das heißt, das Temperaturfenster, in dem diese Arten existieren können, schrumpft mit sinkendem pH-Wert des Wassers. Diese Entwicklung wiederum wirkt sich sowohl auf die geografische Verteilung der Arten und Populationen aus als auch auf deren Überlebenschancen.

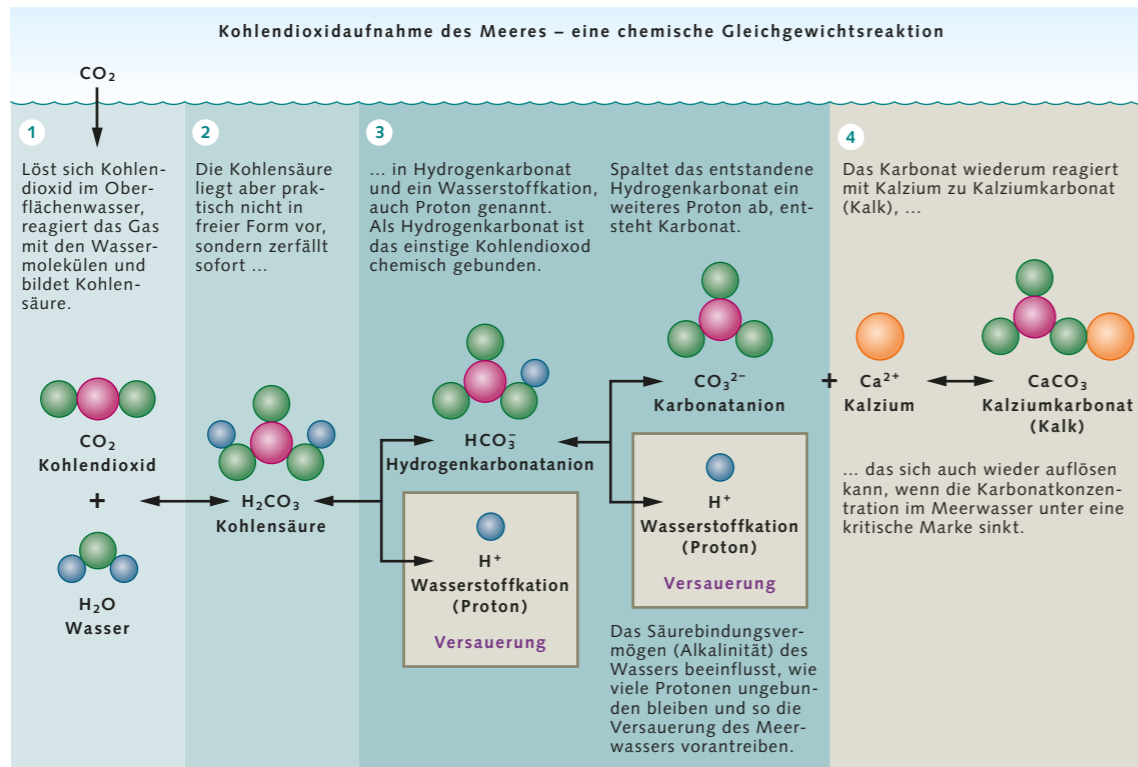
Wichtig zu wissen: Bei der Versauerung der Meere handelt es sich um einen Effekt, der ausschließlich auf den Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre zurückzuführen ist. Andere Treibhausgase spielen keine Rolle. Für einen wirksamen Meeresschutz sind die Vermeidung menschengemachter Kohlendioxidemissionen sowie eine gezielte Reduktion der Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre deshalb doppelt wichtig. Sie würden helfen, sowohl die globale Erwärmung als auch die Ozeanversauerung zu begrenzen.

Ausbreitung der Ozeanversauerung von der Oberfläche ins Innere der Ozeane (2002) seit der vorindustriellen Zeit



2.5 > Durch die Aufnahme von CO₂ an der Meeresoberfläche verändert sich die Chemie des Wassers. Sein pH-Wert und der Aragonit-Sättigungsgrad sinken. Die Messprofile zeigen die Veränderungen beider Parameter im Zeitraum 1800 bis 2002. Die schwarzen Linien und Zahlen zeigen die Messwerte aus 2002.

2.6 > Das Meerwasser speichert Kohlenstoff in drei gelösten Formen: als Kohlendioxid, Hydrogenkarbonat und Karbonat. Diese drei Parameter stehen in einem ausbalancierten Konzentrationsgleichgewicht zueinander, was bedeutet, dass Veränderungen eines Parameters sofort zu Ausgleichsreaktionen bei den zwei anderen führen. Fachleute sprechen deshalb von einer Gleichgewichtsreaktion.



Mineral

Im Gegensatz zu Gestein (Mischung aus verschiedenen Mineralen) ist ein Mineral ein einzelnes Element oder eine einzelne chemische Verbindung, die im Allgemeinen kristallin ist und durch geologische Prozesse gebildet wurde. Bei Raumtemperatur sind Minerale in der Regel feste Stoffe, eine Ausnahme bildet Quecksilber.

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

Über einen Zeitraum von Jahrtausenden betrachtet, gleicht der Kohlenstoffkreislauf der Erde den Kohlendioxidgehalt des Meeres über den Eintrag verwitterter säurebindender Minerale immer wieder aus. Steigt zum Beispiel die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre und im Meer, führt die Erwärmung beider Systeme langfristig dazu, dass mehr Gestein verwittert – sowohl an Land als auch am Meeresboden. Daraus folgt, dass größere Mineral-

mengen in das Meer eingetragen werden, diese den Säuregehalt des Wassers reduzieren und der Ozean wieder neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt, um das angesprochene Konzentrationsgleichgewicht wiederherzustellen. Gleichzeitig sinkt die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, und die Erwärmung verlangsamt sich. Bis dahin vergehen jedoch mehrere Millionen Jahre.

Die drei Kohlenstoffpumpen des Meeres

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



2.7 Die Formenvielfalt der Foraminiferen, auch Kammerlinge genannt. Die Winzlinge gehören zu den kalkbildenden Meeresorganismen, denen die Ozeanversauerung besonders zusetzt.

Die physikalische Kohlenstoffpumpe

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

Die Sonderrollen der Schelfmeere und vegetationsreichen Küstenökosysteme

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

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

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

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

menschengemachter Kohlendioxidemissionen in den tiefen Ozean.

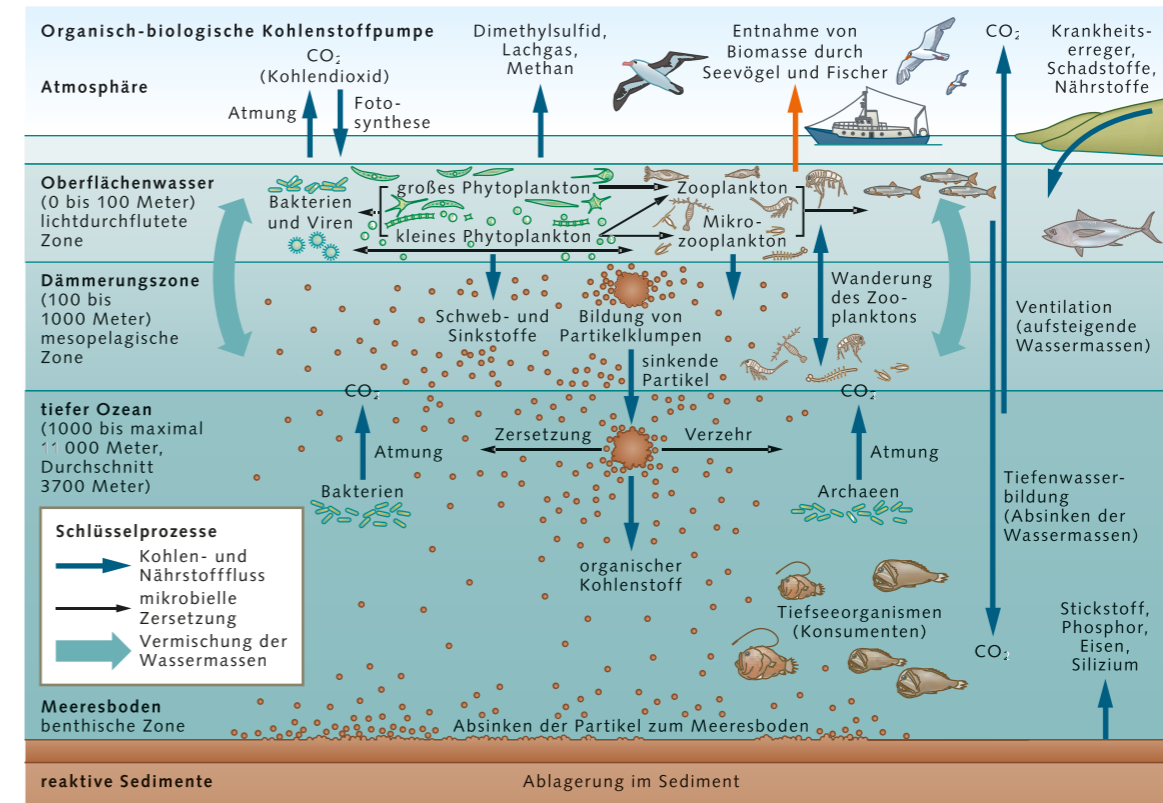
Um absinken zu können, müssen Wassermassen abkühlen, damit sie dichter und schwerer werden. Diesen Prozess beobachtet man vor allem in den Polarregionen, wo bei niedrigen Temperaturen die Löslichkeit von Kohlendioxid im Wasser besonders hoch und das Oberflächenwasser entsprechend kohlenstoffreich ist.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

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

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

Die organisch-biologische Kohlenstoffpumpe

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



Werden die Algen oder Seegräser gefressen, nehmen die Konsumenten den darin enthaltenen Kohlenstoff automatisch mit auf. Einen Teil veratmen sie: Das heißt, der Kohlenstoff wird in Form von Kohlendioxid wieder an das Meer abgegeben. Die Restmenge wird zum Beispiel in Form von Muskelmasse oder Körperfett eingelagert und ein Teil als Kotballen ausgeschieden. Den Naturgesetzen des Meeres folgend, wandert der Kohlenstoff so unter Umständen durch das gesamte Nahrungsnetz des Ozeans: von den Kleinkrebsen über verschiedene Fischarten bis hin zu Meeressäugern wie Walen und Robben – und bei jedem Schritt wird Kohlenstoff veratmet, in Biomasse umgewandelt oder in Form von Kot abgegeben.

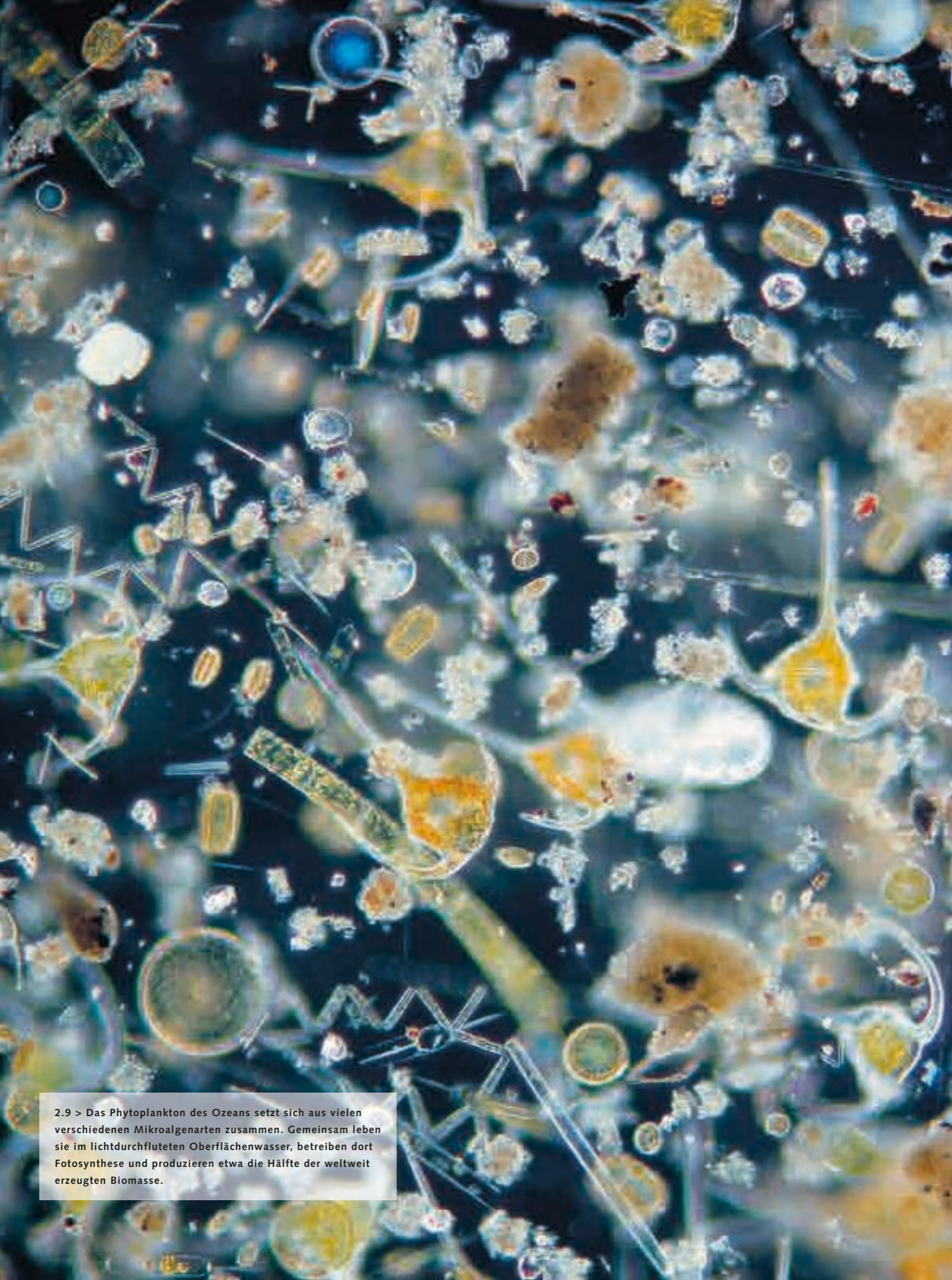
Die Pflanzen und Algen aber können auch einfach absterben. In diesem Fall sinken sie mit den sterblichen Überresten ihrer Konsumenten und den Kotballen in die Tiefe. Auf dem Weg Richtung Meeresboden stürzen sich Bakterien und andere Mikroorganismen auf die abgestorbene Biomasse und zersetzen einen großen Teil, noch bevor das Material große Wassertiefen oder den Meeres-

boden erreicht hat. Dabei wird der gespeicherte Kohlenstoff abermals in Form von Kohlendioxid an das Meerwasser abgegeben. Die verbleibenden Überreste rieseln als sogenannter „Meeresschnee“ in die Tiefsee. Schätzungen zufolge erreichen gerade einmal zehn bis 30 Prozent des in Biomasse gebundenen Kohlenstoffs eine Wassertiefe von 1000 Metern. Der Rest wird vorher konsumiert.

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

Die Einlagerung im Sediment ist eine entscheidende Größe, wenn man den Kohlenstoffkreislauf über geolo-

2.8 > Als organisch-biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres werden jene Prozesse bezeichnet, bei denen Algen und Pflanzen CO₂ aus dem lichtdurchfluteten Oberflächenwasser aufnehmen und in Biomasse umwandeln, die im Anschluss eine Reise Richtung Meeresboden antritt. Entscheidend für die globale Emissionsbilanz und den weiteren Verlauf des Klimawandels ist dabei, wie viel der Biomasse in Wasserschichten unterhalb der von Wind und Wellen durchmischten Deckschicht sinkt. Im Zwischen- und Tiefenwasser (Dämmerungszone/tiefer Ozean) sind nämlich sowohl das organische Material als auch der in ihm enthaltene Kohlenstoff für Jahrzehnte bis Jahrhunderte eingeschlossen, ganz gleich, ob die Biomasse gefressen und veratmet wird – oder weiter Richtung Meeresboden sinkt.



2.9 > Das Phytoplankton des Ozeans setzt sich aus vielen verschiedenen Mikroalgenarten zusammen. Gemeinsam leben sie im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser, betreiben dort Fotosynthese und produzieren etwa die Hälfte der weltweit erzeugten Biomasse.

gische Zeiträume betrachtet, das heißt über Jahrtausende. Für die aktuelle Entwicklung des Klimawandels ist jedoch schon entscheidend, wie viel des von Algen und Pflanzen gebundenen Kohlenstoffs in Wasserschichten unterhalb der sogenannten durchmischten Deckschicht sinkt. Als solche wird jene Wasserschicht an der Meeresoberfläche bezeichnet, deren Wassermassen regelmäßig von Wind und Wellen durchmischt werden.

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

Die anorganisch-biologische Kohlenstoffpumpe

Neben der Fotosynthese gibt es einen zweiten Prozess, mit dem Meeresorganismen im Wasser gelösten Kohlenstoff biologisch binden und am Ende in die Tiefe transportieren – gemeint ist der Aufbau kalkhaltiger Schalen oder Skelette. Kalkbildende Organismen wie zum Beispiel Kalkalgen, Muscheln, Korallen, Flügelschnecken oder aber auch Kammerlinge entnehmen dem Meerwasser dazu das in gelöster Form vorliegende Hydrogencarbonat, wandeln es in Kalziumkarbonat um und verwenden dieses als Baustoff für die genannten Strukturen. Sterben die Organismen ab, sinken die Kalkgehäuse auf den Meeresboden und werden dort im Sediment eingelagert. Auf diese Weise wird der enthaltene Kohlenstoff dem natürlichen Kreislauf für Jahrtausende entzogen.

Im Hinblick auf die Kohlendioxidbilanz der Atmosphäre fällt die anorganisch-biologische Kohlenstoffpumpe des Ozeans jedoch negativ aus. Die Erklärung dafür ist, dass bei der Kalkbildung dem Wasser Hydrogencarbonat entnommen wird. Als ein Produkt der entsprechenden chemischen Reaktion entsteht im Wasser dabei gelöstes Kohlendioxid. Dieses wiederum erhöht den Kohlendioxid-Partialdruck des Meeres und fördert auf diese Weise die Ausgasung von Kohlendioxid in die Atmosphäre. Löst sich Kalk dagegen auf – was unter bestimm-



2.10 > Salpen sind tonnenförmige Manteltiere, die oftmals in Kolonien leben. Dabei bilden die Tiere eine lange Kette, in der sie gemeinsam auf die Jagd nach Plankton gehen.

ten chemischen Bedingungen im Meer durchaus geschieht –, wird Kohlensäure verbraucht, und das Meerwasser neigt dann dazu, mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen.

Bremsfaktor Klimawandel

Mit zunehmendem Klimawandel und der dadurch bedingten Meereseerwärmung wird die Kohlendioxid-Aufnahme- und -Speicherkapazität des Ozeans abnehmen. Ausschlaggebend dafür sind zwei Gründe. Der erste ist physikalischer Natur: Warmes Wasser kann weniger gelöstes Kohlendioxid speichern als kälteres. Der zweite Grund betrifft die biologische Kohlenstoffpumpe. Im Zuge des Klimawandels nimmt die dichtebedingte Schichtung der Wassermassen im oberen Teil der Wassersäule zu. Infolgedessen vermischt sich das warme, leichte und oftmals nährstoffarme Oberflächenwasser immer weniger mit dem darunterliegenden nährstoffreicheren Zwischen- und Tiefenwasser. Es wird gewissermaßen von der Nährstoffversorgung aus der Tiefe abgeschnitten. Aufgrund der fehlenden Nährstoffe wachsen im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser anstelle vieler großer produktiver Kieselalgen nun eher kleinere Algenarten. Diese produzieren weniger Biomasse als die Kieselalgen und binden demzufolge auch weniger Kohlenstoff.

Hinzu kommt: Steigende Wassertemperaturen beschleunigen die Stoffwechselprozesse der Meeresorganismen.

men. Sie alle benötigen mehr Nahrung, was bedeutet, dass organisches Material schneller und zumeist in geringerer Wassertiefe gefressen, zersetzt und recycelt wird. Das dabei frei werdende Kohlendioxid geben die Lebewesen wieder an das umgebende Meerwasser ab. Dessen Kohlendioxid-Partialdruck steigt und mit ihm die Wahrscheinlichkeit, dass Kohlendioxid vom Meer in die Atmosphäre entweicht.

Außerdem kann sich auch der klimabedingte Artenwandel negativ auf den Kohlenstoff-Transport in die Tiefe auswirken. Forschung vor der Küste der Antarktischen Halbinsel beispielsweise zeigt, dass die Kotballen des Antarktischen Krills (*Euphausia superba*) zumeist in größere Wassertiefen hinabsinken als die Exkremente von Salpen. Letztere dringen im Zuge der Meerereswärmung immer weiter in die Heimatgewässer des Krills vor, während sich die Krebstiere Richtung Süden zurückziehen.

Im Gegensatz zum Krill aber verpacken Salpen ihre vergleichsweise großen Kotballen nicht in einer schützenden Membran. Anderes Zooplankton und Mikroorganismen haben so ein leichtes Spiel. Im Untersuchungs-

zeitraum hatten sie rund 80 Prozent der kohlenstoffreichen Salpenexkremente konsumiert, noch bevor diese eine Wassertiefe von 300 Metern erreichten. Von den gut verpackten Krilllexkrementen hingegen kamen im Laufe der Studie 72 Prozent wohlbehalten in gleicher Wassertiefe an. Die Forschenden schlussfolgerten daher: Sollte sich der Rückzug des Antarktischen Krills fortsetzen und Salpen flächendeckend zur dominierenden Art aufsteigen, werden die Gewässer entlang der Antarktischen Halbinsel künftig deutlich weniger Kohlenstoff in ihren Tiefen einlagern als bisher.

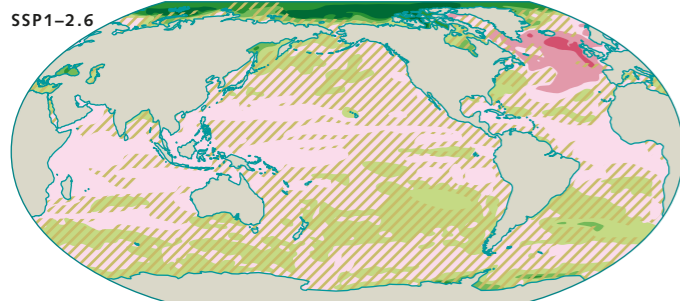
Anders aussehen könnte es in Meeresregionen, in denen in den kommenden Jahrzehnten sowohl die Biomasseproduktion des Phytoplanktons als auch das Zooplanktonaufkommen klimabedingt steigen werden. Nach Aussage des Weltklimarates wäre dies zum Beispiel im Arktischen Ozean der Fall. Global betrachtet aber geht die Wissenschaft davon aus, dass die Biomasseproduktion des Phytoplanktons infolge des Klimawandels in den meisten Teilen des Weltozeans abnehmen wird und mit ihr der Kohlenstoff-Transport in die Tiefe.

2.11 > Infolge des Klimawandels werden sich die Menge und Verteilung des Phyto- und Zooplanktons verändern. In tropischen und subtropischen Meeresgebieten werden sie abnehmen, in den gemäßigten und polaren Breiten zunehmen.

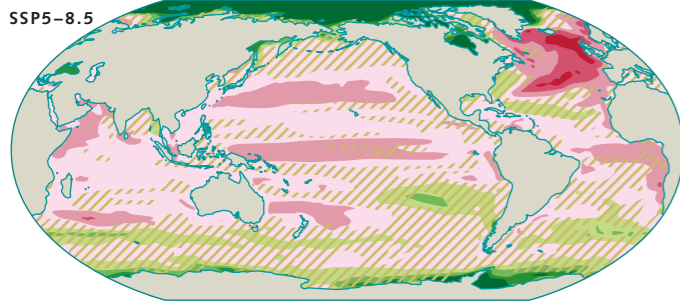
Berechnete Veränderung der Biomasse des marinen Phytoplanktons

Durchschnittliche Veränderung im Zeitraum der Jahre 2090 bis 2099 im Vergleich zum Zeitraum 1995 bis 2014

SSP1-2.6



SSP5-8.5

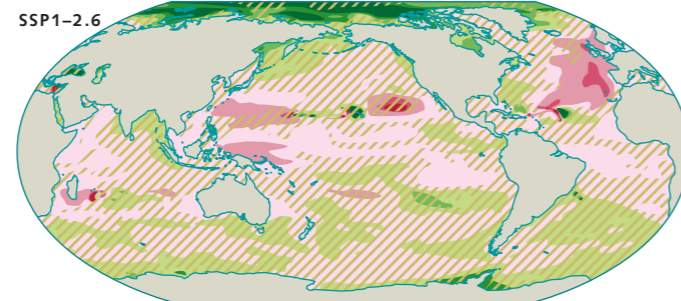


-40% -20% 0% 20% 40%

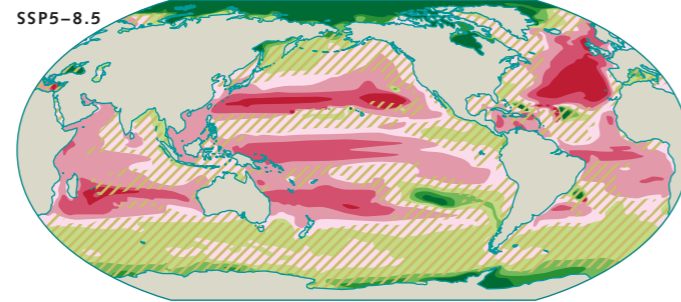
Berechnete Veränderung der Biomasse des marinen Zooplanktons

Durchschnittliche Veränderung im Zeitraum der Jahre 2090 bis 2099 im Vergleich zum Zeitraum 1995 bis 2014

SSP1-2.6



SSP5-8.5



Bereiche, wo die zugrunde liegenden Modelle keine übereinstimmenden Ergebnisse aufweisen

CONCLUSIO

Kohlenstoffspeicher Ozean: Riesig, effizient und in Gefahr

Das Klimasystem der Erde nutzt physikalische, chemische und biologische Prozesse, um Kohlendioxid (CO_2) aus der Atmosphäre zu entfernen und an Land, im Meer oder im geologischen Untergrund einzulagern. Der Weltozean bedient sich dieser Prozesse in so umfassendem Maß, dass er im Laufe der Erdgeschichte schon große Veränderungen der atmosphärischen CO_2 -Konzentration abgefedert hat. Allerdings dauern solche Ausgleichsprozesse Jahrtausende.

Aufgrund seiner natürlichen Kohlendioxid-Aufnahmefähigkeit ist der Ozean ein Hauptakteur im globalen Kohlenstoffkreislauf. Er enthält etwa 40 000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, wobei der größte Teil im Meerwasser gelöst ist. Damit stellt der Ozean den zweitgrößten Kohlenstoffspeicher unseres Planeten dar. Sein Kohlenstoffreservoir übertrifft jenes der Atmosphäre um mehr als das 50-Fache.

Ozean und Atmosphäre stehen in einem steten Kohlenstoffaustausch. In jedem Jahr wandern mehr als 150 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Form des Treibhausgases CO_2 zwischen Ozean und Atmosphäre hin und her. Weil die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre aufgrund der anthropogenen Emissionen steigt, absorbiert auch der Ozean mehr CO_2 . So hat der Weltozean in den zurückliegenden Jahrzehnten etwa 25 Prozent der vom Menschen verursachten CO_2 -Emissionen aus der Atmosphäre aufgenommen und so die Erderwärmung maßgeblich gebremst.

Die CO_2 -Aufnahme des Ozeans erfolgt an der Meeresoberfläche, wo sich das CO_2 aus der Luft im Meerwasser löst. Infolgedessen wird eine chemische Gleichgewichtsreaktion im Oberflächenwasser angestoßen, die dazu führt, dass der im Kohlendioxid enthaltene Kohlenstoff größtenteils chemisch gebunden wird. Das Oberflächenwasser enthält dann Kohlenstoff in drei gelösten Formen: als Kohlendioxid, als Hydrogencarbonat und als Karbonat.

Anschließend tritt der Kohlenstoff seine Reise durch das Meer an und wird dabei unter Umständen für Tausende Jahre in großer Wassertiefe eingelagert. Diese Reise kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen: über die Meeresströmungen (physikalische Kohlenstoffpumpe), über das Nahrungsnetz (organisch-biologische Kohlenstoffpumpe) oder über die Bildung von Kalkschalen und Skeletten (anorganisch-biologische Kohlenstoffpumpe). Bei den letzten beiden wird ein Teil des Kohlenstoffs sogar in den Sedimenten am Meeresboden eingelagert, was bedeutet, dass er für Jahrtausende weggeschlossen wird.

Der Kohlenstoffkreislauf des Meeres ist aber keine Einbahnstraße, denn alle drei Formen des im Wasser gelösten Kohlenstoffs stehen in einem ausbalancierten Konzentrationsgleichgewicht zueinander. Veränderungen eines Parameters führen sofort zu Ausgleichsreaktionen bei den zwei anderen.

Eine der wichtigsten chemischen Veränderungen im Zuge der steigenden Kohlendioxidaufnahme des Weltozeans ist die zunehmende Versauerung. Seit Beginn der Industrialisierung ist der Säuregehalt des Ozeans um 26 Prozent gestiegen – eine Veränderung, wie sie die Weltmeere in den vergangenen Jahrtausenden noch nicht erlebt haben. Mittlerweile reicht das Versauerungssignal in einigen Meeresregionen in Tiefen von mehr als 2000 Metern und beeinträchtigt die Lebensbedingungen vieler Meeresorganismen. Noch ist nicht eindeutig geklärt, in welchem Umfang sich diese an die Ozeanversauerung anpassen können.

Fest steht jedoch, dass mit zunehmendem Klimawandel die CO_2 -Aufnahme- und -Speicherkapazität des Ozeans abnehmen werden: zum einen, weil wärmeres Wasser weniger gelöstes CO_2 speichern kann als kälteres; zum anderen verstärkt die steigende Wassertemperatur die Schichtung der Wassermassen und die Stoffwechselrate der Meeresorganismen. Beide Prozesse beeinträchtigen die biologische Kohlenstoffpumpe, sodass diese weniger Kohlenstoff in großen Tiefen einlagern kann.

3 Das ungenutzte Klimaschutzpotenzial der Ökosysteme an Land

> Die Ökosysteme an Land speichern deutlich weniger Kohlenstoff als die Meere. Trotzdem können sie einen wichtigen Beitrag im Kampf gegen den Klimawandel leisten. Dazu muss die Menschheit jedoch bestehende Wälder, Wiesen und Feuchtgebiete schützen, zerstörte Ökosysteme großflächig wiederherstellen und zu nachhaltigen Methoden der Land- und Forstwirtschaft zurückkehren. Wie das gelingen kann, ist längst bekannt. Es fehlt allein der Umsetzungswille.



Wälder, Wiesen und Böden als Kohlenstoffspeicher

> „Bäume pflanzen“ heißt es oft, wann immer gefragt wird, wie die Natur uns Menschen im Kampf gegen die Klimakrise helfen könnte. Die Antwort ist durchaus valide – nur ist sie nicht die einzige. Fachleute kennen mittlerweile Dutzende Verfahren, mit denen der Mensch der Landvegetation und ihren Böden helfen kann, mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen. Voraussetzungen sind jedoch, dass wir sie am richtigen Ort einsetzen, der Natur ausreichend Platz lassen und die Böden schonend behandeln. Nichts davon geschieht bislang im notwendigen Umfang.

Natürliche Klimalösungen

Obwohl die Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre seit Jahrzehnten stetig steigt, macht das Kohlendioxid selbst nur einen sehr geringen Teil der Luft aus. Sein Volumenanteil liegt bei 0,04 Prozent. Wollte man der Atmosphäre einen Kubikmeter Kohlendioxid entnehmen, müsste man dafür mindestens 2500 Kubikmeter Luft filtern. Für eine Tonne Kohlendioxid wären es rund 1,27 Millionen Kubikmeter Luft, selbst wenn eine einhundertprozentige Filterleistung erreicht würde.

Technische Anlagen, die Kohlendioxid aus der Luft entfernen können, sind teuer und verbrauchen viel Energie. Aus diesem Grund setzen viele Fachleute auf sogenannte natürliche Klimalösungen (Natural Climate Solutions, NCS). Gemeint sind Maßnahmen, mit denen sich die natürliche Kohlendioxidaufnahme und Kohlenstoffeinlagerung des Ozeans, der Landflächen und ihrer jeweiligen Vegetation verstärken oder aber künftige Treibhausgasemissionen vermeiden lassen.

Die Bezeichnung „natürlich“ bedeutet dabei aber nicht automatisch, dass alle entsprechenden Maßnahmen langfristig nachhaltig oder umweltschonend sind. Ein Beispiel: Das großflächige Anpflanzen von Baumplantagen (Monokulturen) zählt durchaus zu den natürlichen Klimalösungen, geht aber zulasten der Artenvielfalt. Zudem speichern Plantagenwälder langfristig deutlich weniger Kohlenstoff als ein artenreicher, auf natürliche Weise gewachsener Mischwald. Aus diesem Grund verweisen Experten inzwischen mit großer Vehemenz darauf, dass jegliche Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen oder Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre auch auf ihre Auswirkungen auf die Natur und die betroffenen Menschen hin überprüft und mögliche Risiken gegen den potenziellen Nutzen abgewogen werden müssen. Bestenfalls profitieren alle drei – Klima, Natur und Menschheit.

Im Mittelpunkt der Diskussion über natürliche Klimalösungen standen bislang vor allem Wälder, Feuchtgebiete, Savannen und Graslandschaften der Erde, weil der Mensch durch die Art und Weise, wie er diese Ökosysteme nutzt, den Kohlenstoffkreislauf der Erde und somit auch das Klima maßgeblich beeinflusst.

Landnutzungsänderungen beeinflussen das Klima global und lokal

Welche Auswirkungen Landnutzungsänderungen auf das Klima haben, ist mittlerweile sehr gut verstanden. Auf globaler Ebene rufen sie vor allem Veränderungen in der Bilanz wichtiger Treibhausgase wie Kohlendioxid, Lachgas und Methan hervor. Kohlendioxid beispielsweise wird in großen Mengen freigesetzt, wenn der Mensch Wälder (brand-)rodet, natürliche Graslandschaften und Feuchtgebiete in Ackerland umwandelt, Moore trockenlegt oder Weiden und Felder derart übernutzt, dass sie immer weniger in der Lage sind, Bodenkohlenstoff zu speichern und eine Vegetation auszubilden. Verstärkt wird die Kohlendioxidaufnahme der Landvegetation hingegen, wenn Wälder (wieder-)aufgeforstet werden, auf natürlichem Wege nachwachsen oder wenn die Beweidung natürlicher Graslandschaften aufgegeben wird und sich die heimische Tier- und Pflanzengemeinschaft erholen kann.

Methan- und Lachgasemissionen entstehen vor allem in der Landwirtschaft. Lachgas wird freigesetzt, wenn stickstoffhaltige Düngemittel zum Einsatz kommen, Bauern Gülle sammeln und auf den Feldern und Wiesen ausbringen oder Biomasse verbrennen. Methan hingegen entsteht hauptsächlich in der intensiven Nutztierhaltung, beim Reisanbau sowie bei der unvollständigen Verbrennung von Biomasse.

Verändert der Mensch die Nutzung der Landvegetation, zieht ein solcher Wandel Veränderungen der physi-



3.1 > Die in den Blättern, Ästen und Zweigen eines Waldes eingelagerten Kohlenstoffmengen sind sehr anfällig für Störungen. Oft reicht ein Waldbrand aus, um sie zu vernichten und in Form von Kohlendioxid oder Aschepartikel wieder freizusetzen.

kalischen Oberflächeneigenschaften nach sich, wodurch sich das lokale Klima verändern kann – auf welche Weise, hängt allerdings vom jeweiligen Standort und der Vegetationsart ab. Wird in einer Region zum Beispiel der Wald abgeholzt, ändern sich dort nicht nur das Rückstrahlvermögen der Erdoberfläche und der Grad der Oberflächenrauheit; es sinkt auch die sogenannte „Blattfläche“, über die Wälder zur Verdunstung und Kühlung beitragen. Infolgedessen verändert sich die Strahlungsbilanz der Region und damit wichtige Klimaparameter wie die Oberflächentemperatur, die Verdunstungsrate, die Bodenfeuchtigkeit, die Luftzirkulation, Wärmeflüsse und vieles mehr.

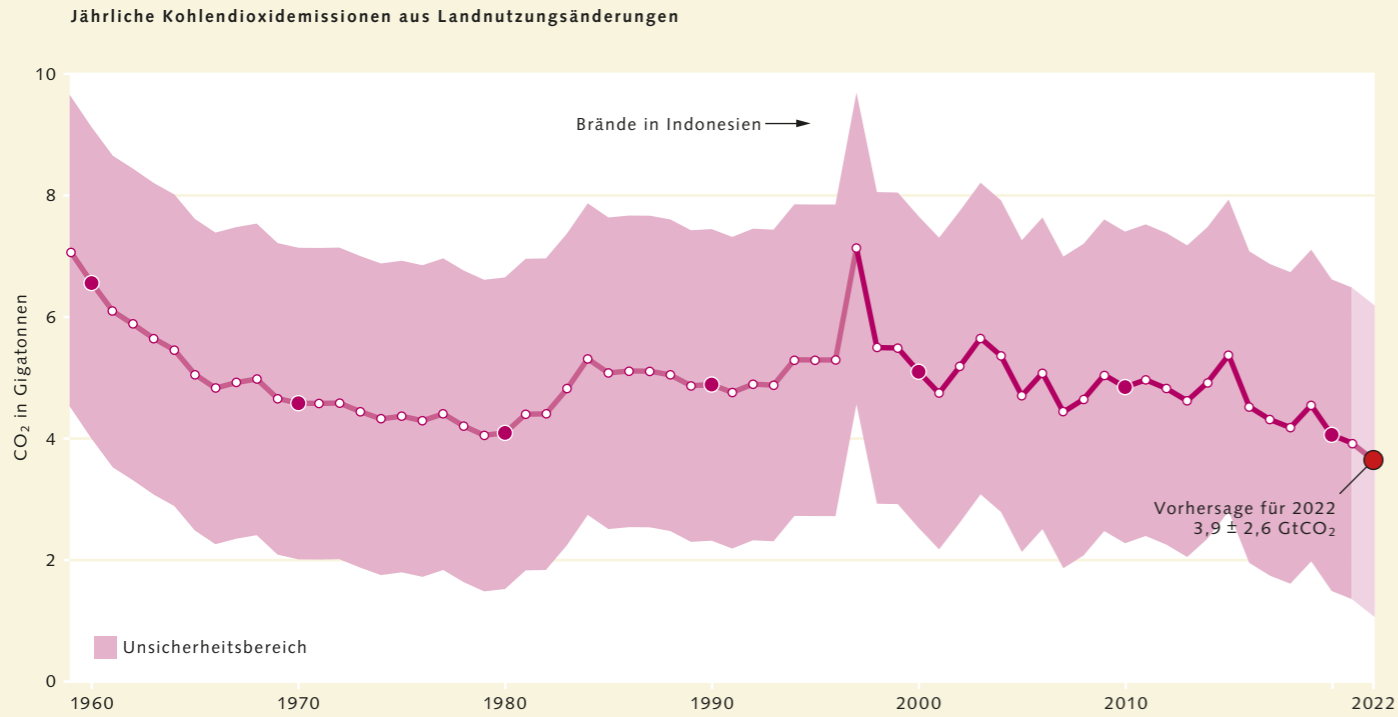
Welches Ausmaß lokale Klimaveränderungen infolge einer veränderten Landnutzung haben können, zeigen die Rodungen im Amazonas-Regenwald. Dieser war aufgrund seiner riesigen Fläche und der hohen Verdunstung bislang in der Lage, sein eigenes niederschlagsreiches Klima auszubilden. Infolge großflächiger Abholzungen und Brandrodungen aber ist die ursprüngliche Waldfläche seit den 1980er-Jahren derart geschrumpft, dass die waldeigene

Verdunstung nicht mehr ausreicht, genügend Niederschläge zu produzieren. Trockenheit und Dürre nehmen zu, die Waldbrandgefahr steigt, sodass der verbleibende Regenwald mittlerweile Gefahr läuft, sich in einen Trockenwald zu verwandeln. Dieser sequestriert dann nicht nur deutlich weniger Kohlenstoff als der bisherige Regenwald, er ist auch anfälliger für Feuer.

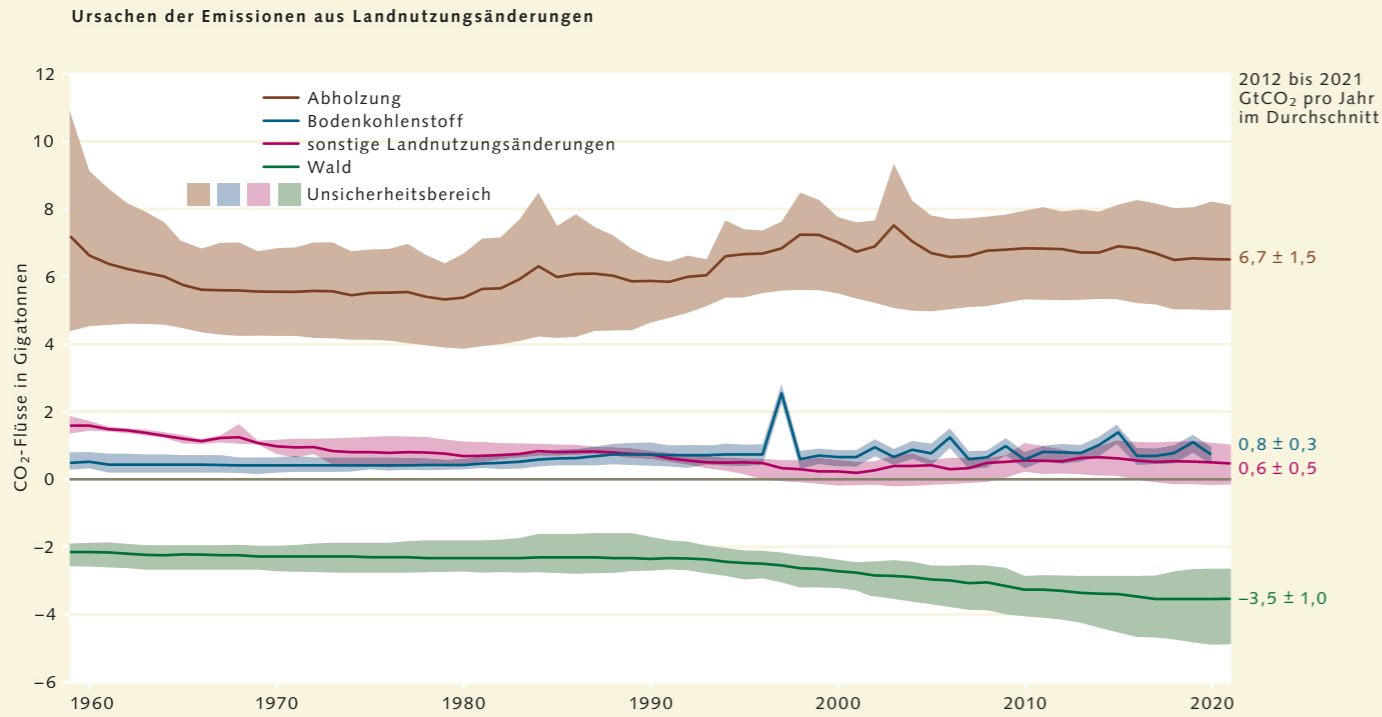
Die Landvegetation und ihre Böden als Kohlendioxidquelle und -senke

Forschende untersuchen die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf die Treibhausgasbilanz der Erde mit einer Vielzahl von Methoden. Zu ihren wichtigsten Werkzeugen gehören Vegetations- und Klimamodelle sowie Vegetationsdaten aus Satellitenbeobachtungen. Erschwert wird ihre Arbeit jedoch dadurch, dass es bislang bei der Aufzeichnung globaler Beobachtungsdaten nicht gelingt, klar zwischen natürlichen und vom Menschen verursachten Veränderungsprozessen zu unterscheiden, weil diese

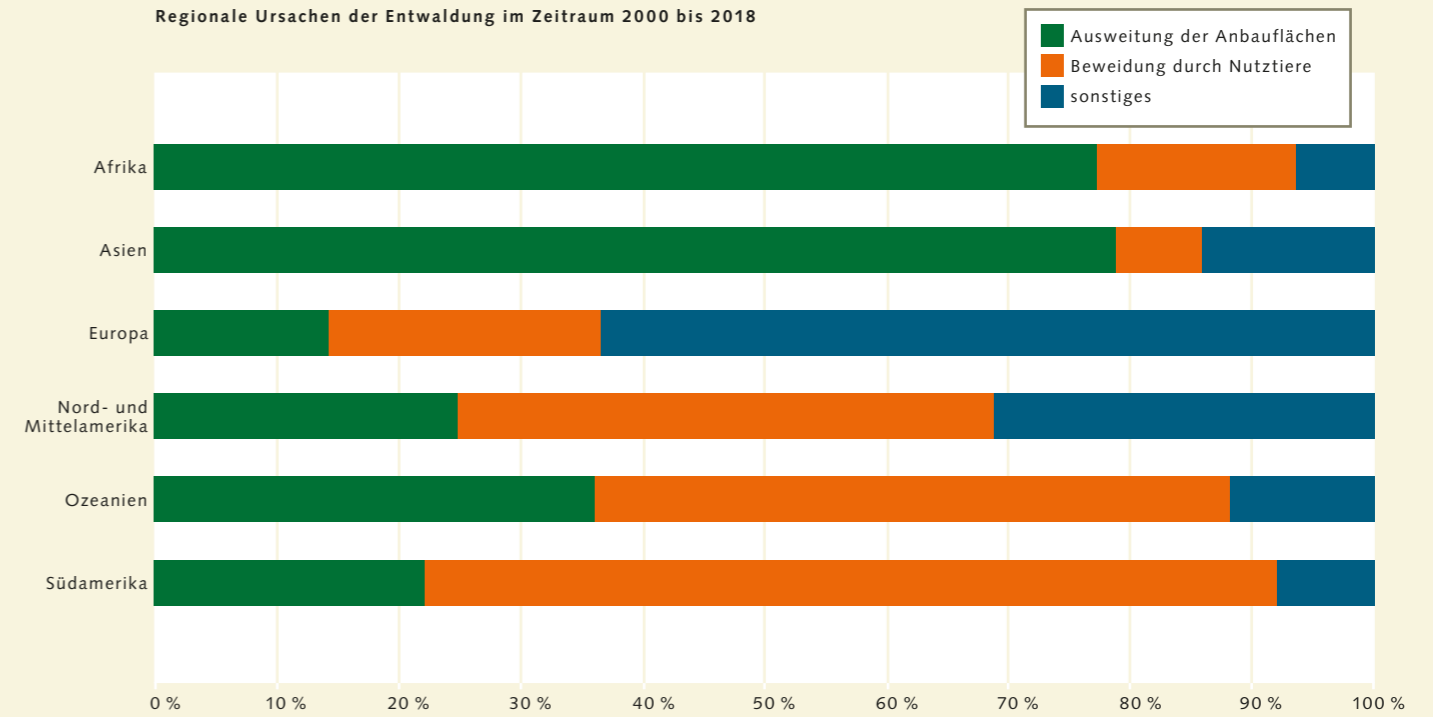
Bodenkohlenstoff
Als „Bodenkohlenstoff“ wird der messbare Kohlenstoffanteil der organischen Substanz im Boden bezeichnet. Er umfasst die lebende und tote Biomasse und macht etwa zwei bis zehn Prozent der Bodenmasse aus. Der Vorrat an Bodenkohlenstoff ist Grundlage für wichtige Leistungen des Bodens – etwa für das Speichern und Zurverfügungstellen von Wasser und Nährstoffen sowie für den Abbau von Schadstoffen.



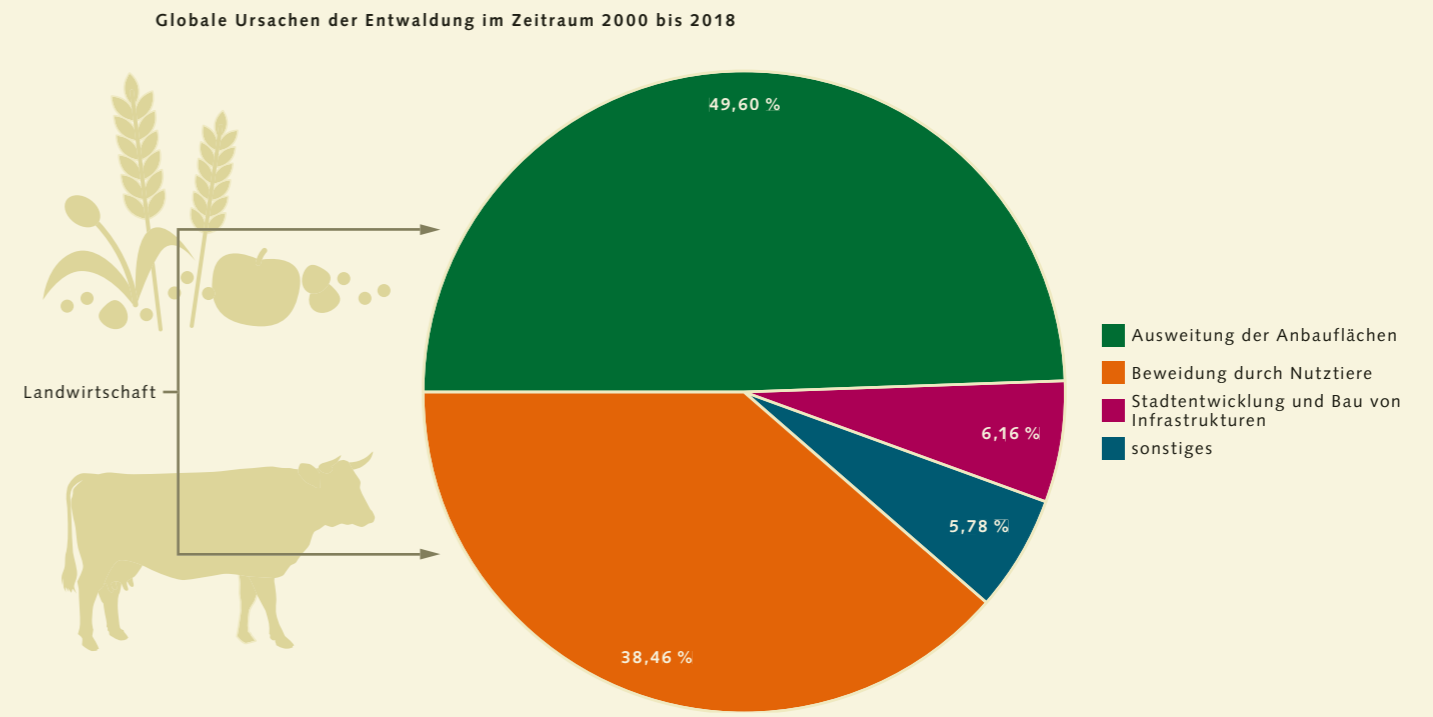
3.2 > Der Gesamt-Kohlendioxidausstoß infolge von Landnutzungsänderungen hat in den zurückliegenden Jahren leicht abgenommen. Die Rekordemissionen im Jahr 1997 waren auf Waldbrände in Indonesien zurückzuführen, ausgelöst durch Dürre und menschlichen Raubbau an Wald- und Feuchtgebieten.



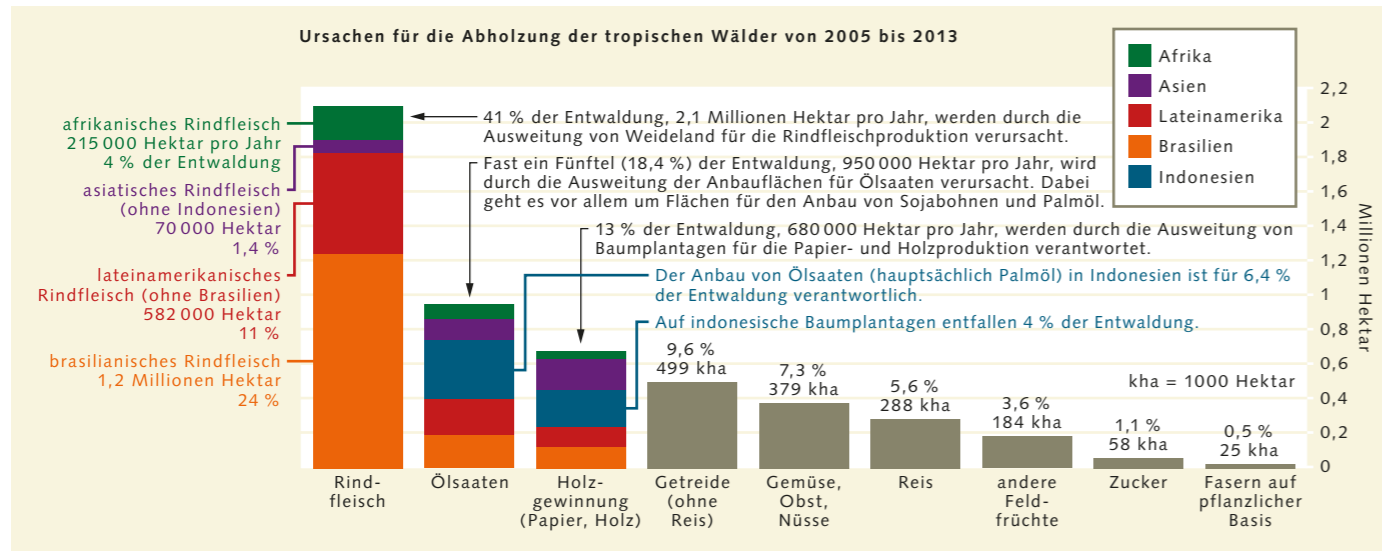
3.3 > Kohlendioxidemissionen infolge von Abholzungen und Brandrodungen machten auch im Jahr 2021 den Großteil der Emissionen durch Landnutzungsänderungen aus. Sie konnten nur in etwa zur Hälfte durch (Wieder-)Aufforstungsmaßnahmen und eine nachhaltige Waldbewirtschaftung kompensiert werden.



3.4 > In allen Regionen der Welt, abgesehen von Europa, wurden im Zeitraum von 2000 bis 2018 Wälder vornehmlich gerodet, um Acker- oder Weideland zu gewinnen. In Europa hingegen überwiegen sonstige Gründe wie etwa der Bau von Wohngebieten und Straßen.



3.5 > Nahezu 90 Prozent der im Zeitraum von 2000 bis 2018 gerodeten Waldflächen weltweit werden heute als Acker- oder Weideland genutzt. Die restlichen Flächen wurden in Bauland umgewandelt oder gingen verloren, weil zum Beispiel Staudämme oder Tagebaue angelegt wurden.



3.6 > Seit der Jahrtausendwende hat die Welt schon rund fünf Millionen Hektar Waldfläche pro Jahr verloren, die meisten Flächen davon in den Tropen. Rund 60 Prozent der Rodungen in tropischen Regenwäldern sind auf die Produktion von Rindfleisch, Palmöl und Soja zurückzuführen. Da diese Produkte im großen Stil exportiert werden, sind Bürger aus den Industrieländern für einen nicht unwesentlichen Teil der Abholzungen in den Tropen indirekt mitverantwortlich.

oftmals zeitgleich ablaufen. Beobachten Fachleute auf Satellitendaten zum Beispiel einen Rückgang der Waldbedeckung in einer Region, kann dieser zum einen durch Abholzungen verursacht worden sein. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass die Bäume infolge eines Schädlingsbefalls oder aufgrund klimatischer Veränderungen abgestorben sind. Angaben zur globalen Kohlenstoffbilanz der Landvegetation und zu möglichen Veränderungen sind daher immer noch mit Unsicherheiten behaftet.

Nichtsdestotrotz haben Forschende inzwischen eine klare Vorstellung davon, wie entscheidend die Landvegetation und die dazugehörigen Böden für den natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Erde sind und welche Rolle sie bestenfalls im Kampf gegen den Klimawandel spielen können. Experten des internationalen Global Carbon Project bilanzieren mittlerweile im Jahresrhythmus, wie viel Kohlendioxid bisher durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe sowie durch Landnutzungsänderungen freigesetzt wurde und welchen Anteil davon die Landvegetation und der Ozean auf natürliche Weise aufgenommen haben.

Ihren Angaben zufolge haben weltweite Landnutzungsänderungen im Jahr 2022 in der Summe zu einer Freisetzung von knapp 3,9 Milliarden Tonnen Kohlendioxid geführt. Damit machen Kohlendioxidemissionen durch Landnutzungsänderungen etwa ein Zehntel der vom Menschen verursachten Gesamt-Kohlendioxidemissionen aus. Als Ursache führen Fachleute vor allem die

anhaltend hohen Waldrodungen und -brände an. Deren Kohlendioxid-Freisetzung (6,59 Milliarden Tonnen) konnte nur zur Hälfte durch die zusätzliche Kohlendioxidaufnahme neuer, wiederaufgeforsteter oder nunmehr nachhaltig bewirtschafteter Wälder (3,3 Milliarden Tonnen) kompensiert werden. Kohlendioxidemissionen, verursacht durch Torfbrände, Bodenübernutzung oder aber durch das Trockenlegen von Feuchtgebieten, spielten in der Gesamtbilanz nur eine untergeordnete Rolle.

Ungeachtet aller Landnutzungsänderungen fungieren Wälder, Feuchtgebiete, Graslandschaften und Felder dennoch als natürliche Kohlenstoffspeicher und bremsen somit den Klimawandel. Das heißt, sie nehmen in der Summe mehr Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf, als sie freisetzen. Nach Aussage des Global Carbon Project hat die globale Landvegetation seit dem Jahr 1850 rund 31 Prozent der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen aufgenommen und im Untergrund oder aber in ihrer Biomasse eingelagert. Den größten Anteil an dieser Kohlenstoff-Sequestrierung hatten Waldökosysteme einschließlich ihrer Böden. Im Zeitraum von 2012 bis 2021 belief sich die Kohlendioxidaufnahme der Landvegetation in der Summe auf 11,4 Milliarden Tonnen pro Jahr – 1,4 Milliarden Tonnen mehr als noch in den 2000er-Jahren. Für das Jahr 2022 deuten vorläufige Analyseergebnisse auf einen Anstieg auf 12,4 Milliarden Tonnen Kohlendioxid hin.



3.7 > Wie dieser Küstenwald in Norwegen gehören rund 28 Prozent der weltweiten Wälder zum borealen Nadelwald – einem Ökosystem, welches vornehmlich aus Nadelbaumarten wie Kiefer, Fichte und Tanne besteht und sich über acht Staaten erstreckt: Kanada, China, Finnland, Japan, Norwegen, Russland, Schweden und die USA.

Der Düngeeffekt einer steigenden Kohlendioxidkonzentration

Überrascht hat die steigende Kohlendioxidaufnahme keinen der Experten. Im Gegenteil, sie bestätigt einen Langfristtrend. Die Pflanzengemeinschaften an Land haben in den zurückliegenden 60 Jahren stetig mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufgenommen und den enthaltenen Kohlenstoff in ihrer Biomasse eingebaut oder, vereinfacht gesagt: Die Pflanzen sind besser gewachsen. Der Grund dafür ist der sogenannte Düngeeffekt der steigenden atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration auf die Landvegetation, der sich nach Angaben des Weltklimarates seit den 1980er-Jahren im globalen Kohlenstoffkreislauf nachweisen lässt. In einfachen Worten beschrieben, erleichtert die höhere Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre den Pflanzen die Fotosynthese. Ihre Syntheserate steigt, die Pflanzen wachsen demzufolge besser. Gleichzeitig reduziert sich durch die effizientere Fotosynthese die Wassermenge, die für die Produktion einer bestimmten Menge Biomasse benötigt wird. Die Pflanzen müssen nämlich ihre Blatt-Spaltöffnungen weniger weit öffnen, um ausreichend Kohlendioxid aus der Luft aufzunehmen. Durch die kleineren Spaltöffnungen wiederum verdunstet automatisch weniger Wasser als bei weit geöffneten Spaltöffnungen, weshalb die Pflanzen ihre Wasserreserven effizienter einsetzen können. Aufgrund der globalen Erwärmung hat sich zudem die Wachstumsperiode vor allem in der nördlichen Hemisphäre verlängert, wodurch die Kohlendioxidaufnahme der Landvegetation abermals gestiegen ist.

Ob diese Entwicklung jedoch andauert, ist fraglich, denn das Pflanzenwachstum hängt nicht nur allein von der Fotosynthese ab. Entscheidend sind außerdem die verfügbaren Wasser- und Nährstoffmengen, die Temperatur und eine Reihe anderer Umweltfaktoren. Neue Forschung zeigt zudem, dass eine Zunahme der Fotosynthese nicht automatisch bedeutet, dass zum Beispiel Bäume den im Kohlendioxid enthaltenen Kohlenstoff auch wirklich umfassend in ihre Biomasse (Blätter, Zweige, Stamm, Wurzelsystem) einbauen und somit der Atmosphäre für längere Zeit entziehen. Die Prozesse und Wirkungszusammenhänge scheinen viel komplizierter zu sein, als man bislang dachte.

Emissionsreduktion von Treibhausgasen oder Entnahme von Kohlendioxid – ein entscheidender Unterschied

Drei Viertel der eisfreien Landflächen unserer Erde werden mittlerweile vom Menschen genutzt und gestaltet. Das heißt, ihre ursprüngliche Vegetation wurde verändert, indem der Mensch Urwälder rodet, Moore trockenlegte und Graslandschaften umbrach oder sie fortan als Bauland oder als Weiden für Rinder, Ziegen und Schafe nutzte. 85 Prozent aller einstigen Feuchtgebiete gelten heutzutage als zerstört. Durch diese flächendeckende Veränderung der Landoberfläche und ihrer Vegetation hat der Mensch die natürlichen Kohlenstofflagerstätten der terrestrischen Ökosysteme im Laufe seiner Geschichte mehr als halbiert. Sie sind von ursprünglich etwa 916 Milliarden Tonnen Kohlenstoff auf aktuell 450 Milliarden Tonnen geschrumpft.

Um das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 zu erreichen, müssen die natürlichen Kohlenstoffspeicher der Landvegetation wieder massiv anwachsen. Das heißt, es bedarf einer Landnutzung, die künftige Emissionen aus der Land- und Forstwirtschaft verhindert und gleichzeitig sicherstellt, dass die Landvegetation zusätzliches Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen kann. In der öffentlichen Debatte wird an dieser Stelle oft nicht klar getrennt und selbst Fachleute werfen Maßnahmen zur Emissionsreduktion von Treibhausgasen mit Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme häufig in einen Topf – meist unter der englischen Bezeichnung „mitigation options“ (Maßnahmen zur Klimawandel-Minderung).

Zur Erinnerung: Als Maßnahmen zur Kohlendioxid-Entnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) gelten per Definition nur Handlungen des Menschen, die zu einer verstärkten Kohlendioxidaufnahme aus der Atmosphäre führen. Die Vermeidung künftiger Emissionen hat für den Klimaschutz jedoch eine noch sehr viel höhere Priorität, denn je mehr Emissionen wir vermeiden, desto weniger Kohlendioxid müssen wir wiederum am Ende der Atmosphäre entnehmen.

Die effektivste und kostengünstigste Methode, Emissionen durch Landnutzungsänderungen zu vermeiden, sind der Schutz existierender Wälder, Graslandschaften, Feuchtgebiete und kohlenstoffreicher Böden vor Zerstörung, Übernutzung und Feuer. Soll parallel dazu eine verstärkte Koh-

lenstoffaufnahme und -einlagerung erzielt werden, muss der Mensch obendrein zerstörte, geschädigte oder übernutzte Landökosysteme wiederherstellen und langfristig nachhaltig nutzen. Richtig umgesetzt, so der Weltklimarat, ließen sich durch nachhaltige Land- und Forstwirtschaft, durch Maßnahmen zur Kohlenstoffanreicherung im Boden sowie durch ein verändertes Konsumverhalten etwa 20 bis 30 Prozent jener Treibhausgas-Emissionseinsparungen und Kohlendioxid-Entnahmen erreichen, die bis zum Jahr 2050 benötigt werden, um die globale Erwärmung langfristig auf unter zwei Grad Celsius zu begrenzen.

Eine nachhaltige Landnutzung und der fachgerechte Einsatz landbasierter CDR-Verfahren brächte in vielen Fällen weitere Vorteile für Natur und Mensch: Durch den Schutz und die Wiederherstellung natürlicher Ökosysteme stärkt der Mensch die globale Artenvielfalt und die Gesundheit der Wälder, Graslandschaften und Feuchtgebiete. Es stünden mehr sauberes Wasser und Nahrungsmittel zur Verfügung, die Boden- und Luftqualität würde zunehmen. Im Endeffekt würden wir Menschen in einer gesünderen Umwelt leben und wären obendrein besser in der Lage, uns an die Folgen des Klimawandels anzupassen.

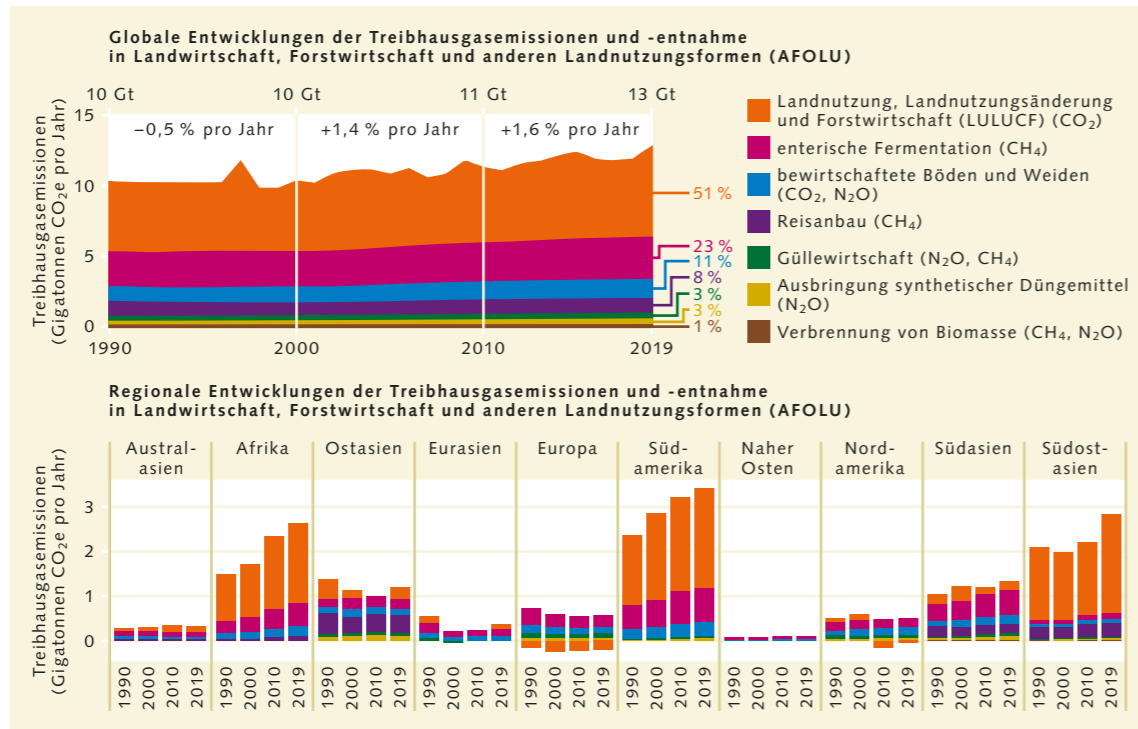
Für den Einsatz landbasierter CDR-Verfahren spricht zudem, dass:

- einige Methoden bereits gut erforscht sind und seit Jahrhunderten für andere Zwecke in der Land- und Forstwirtschaft angewandt werden (zum Beispiel Wiederaufforstung, Maßnahmen zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts etc.);
- das Klimawandel-Minderungspotenzial der globalen Landvegetation und ihrer Böden hoch ist. Wissenschaftlichen Studien zufolge können durch eine nachhaltige Landnutzung und durch den richtigen Einsatz landbasierter CDR-Methoden bis zum Jahr 2050 jährlich Treibhausgas-Emissionseinsparungen und Kohlendioxid-Entnahmen in Höhe von acht bis 14 Milliarden Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente erreicht werden;
- viele Methoden kostengünstig umsetzbar wären;
- die Speicherung von Kohlenstoff in Vegetation und Boden von der Öffentlichkeit häufig als naturnah und damit risikoärmer wahrgenommen wird als technische Lösungen.



3.8 > Rund 120 000 Rinder leben in der größten Rindermastanlage der Welt. Sie wird von der US-amerikanischen Firma Monfort Beef im US-Bundesstaat Colorado betrieben.

3.9 > Infolge der zunehmenden Nutztierhaltung steigt der Methanausstoß in der Landwirtschaft (enterische Fermentation) seit Jahrzehnten an. Er machte im Jahr 2019 rund 23 Prozent der Gesamtemissionen dieses Wirtschaftszweiges aus. Gut zu erkennen: In Afrika, Südamerika und Südostasien sind die Emissionen durch Land- und Forstwirtschaft besonders hoch.



Die Risiken landgestützter CDR-Methoden

Der Einsatz landbasierter CDR-Verfahren birgt jedoch auch eine Reihe von Risiken für Mensch und Natur. Unsachgemäß geplant und umgesetzt, ziehen bestimmte Methoden einen Rückgang der Artenvielfalt nach sich und gefährden die Funktionsweise der natürlichen Ökosysteme. Wichtige Dienstleistungen der Landvegetation fallen weg, worunter in erster Linie jene Menschen leiden, deren Nahrungs- oder Einkommenserwerb direkt von der Natur abhängen. Oftmals handelt es sich dabei um die lokale Bevölkerung.

Drei plakative Beispiele für fehlgeleitete Maßnahmen zur Verstärkung der natürlichen Kohlenstoffsenken an Land sind:

- *die Wiederaufforstung mit Monokulturen* (Sie führt in der Regel zu akuter Artenarmut und macht die neuen Wälder anfällig für Krankheiten und Schädlinge. Durch das Anpflanzen ortsfremder Arten, zum Beispiel Eukalyptus in Südeuropa, kann zudem der Was-

serbedarf der Vegetation über das gewohnte Maß hinaus steigen, wodurch die Grundwasservorkommen gefährdet werden);

- *die Aufforstung natürlicher Graslandschaften und Savannen* (Solche Eingriffe zerstören den Lebensraum vieler speziell angepasster Tier- und Pflanzenarten; sie verändern den lokalen Wasserkreislauf und können den Abbau der großen, im Boden gespeicherten Kohlenstoffmengen beschleunigen);
- *der flächendeckende Anbau von Bioenergiepflanzen wie Mais, ebenfalls in Monokultur und mithilfe großer Mengen Pflanzenschutzmittel* (Auch auf diesen Flächen schrumpft die Artenvielfalt auf ein Minimum; die Bodenqualität sinkt und der globale Wettbewerb um produktive Ackerflächen verschärft sich).

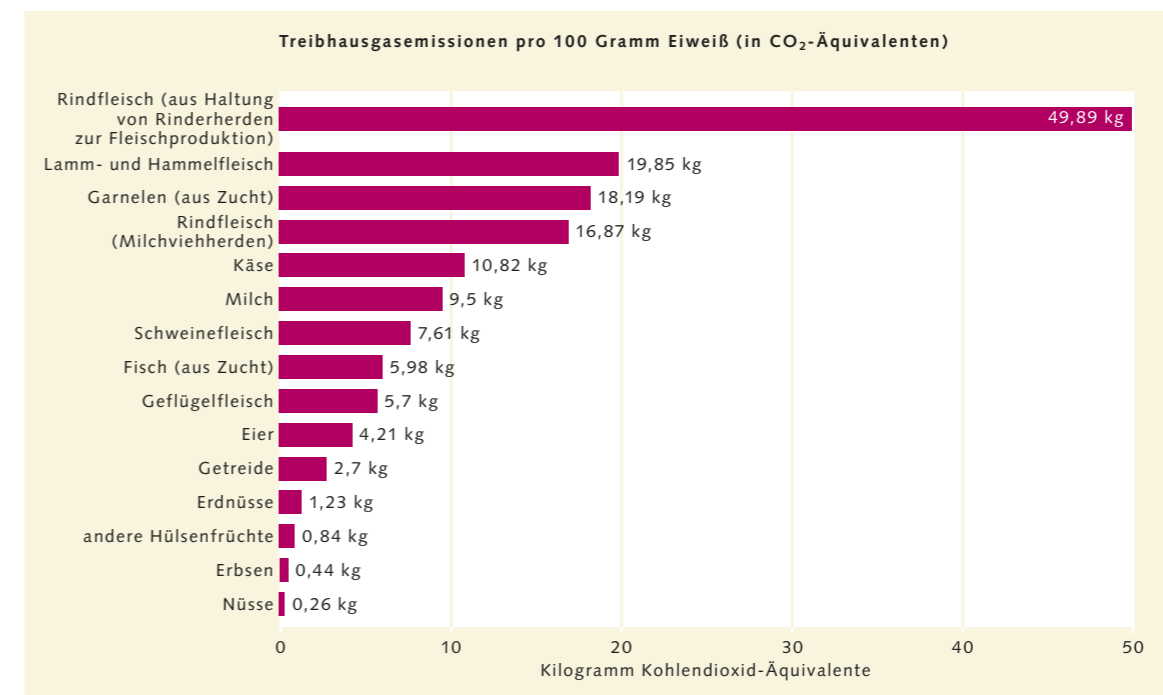
Vermeiden lassen sich solche Fehler, indem nachhaltige, vielfaltsfördernde CDR-Maßnahmen favorisiert werden, ihr Einsatz wissenschaftsbasiert geplant wird, dabei alle lokalen Gegebenheiten und deren mögliche Veränderungen (zum Beispiel durch den Klimawandel) berück-

sichtigt werden. Zudem sollten dem Umwelt-, Arten- und Wasserschutz sowie allen anderen UN-Nachhaltigkeitszielen eine hohe Priorität eingeräumt und Interessenvertreter sowie Experten aus der lokalen Bevölkerung von Anfang an gehört und in alle Entscheidungsprozesse mit eingebunden werden. Man weiß nämlich längst, dass es nicht die eine Lösung für alle Regionen gibt: CDR-Verfahren, die an einem Ort gut funktionierten und die gewünschten Resultate erzeugen, können anderswo Mensch und Umwelt in Mitleidenschaft ziehen. Aus diesem Grund sind eine transparente und faktenbasierte Planung und Entscheidungsfindung so wichtig.

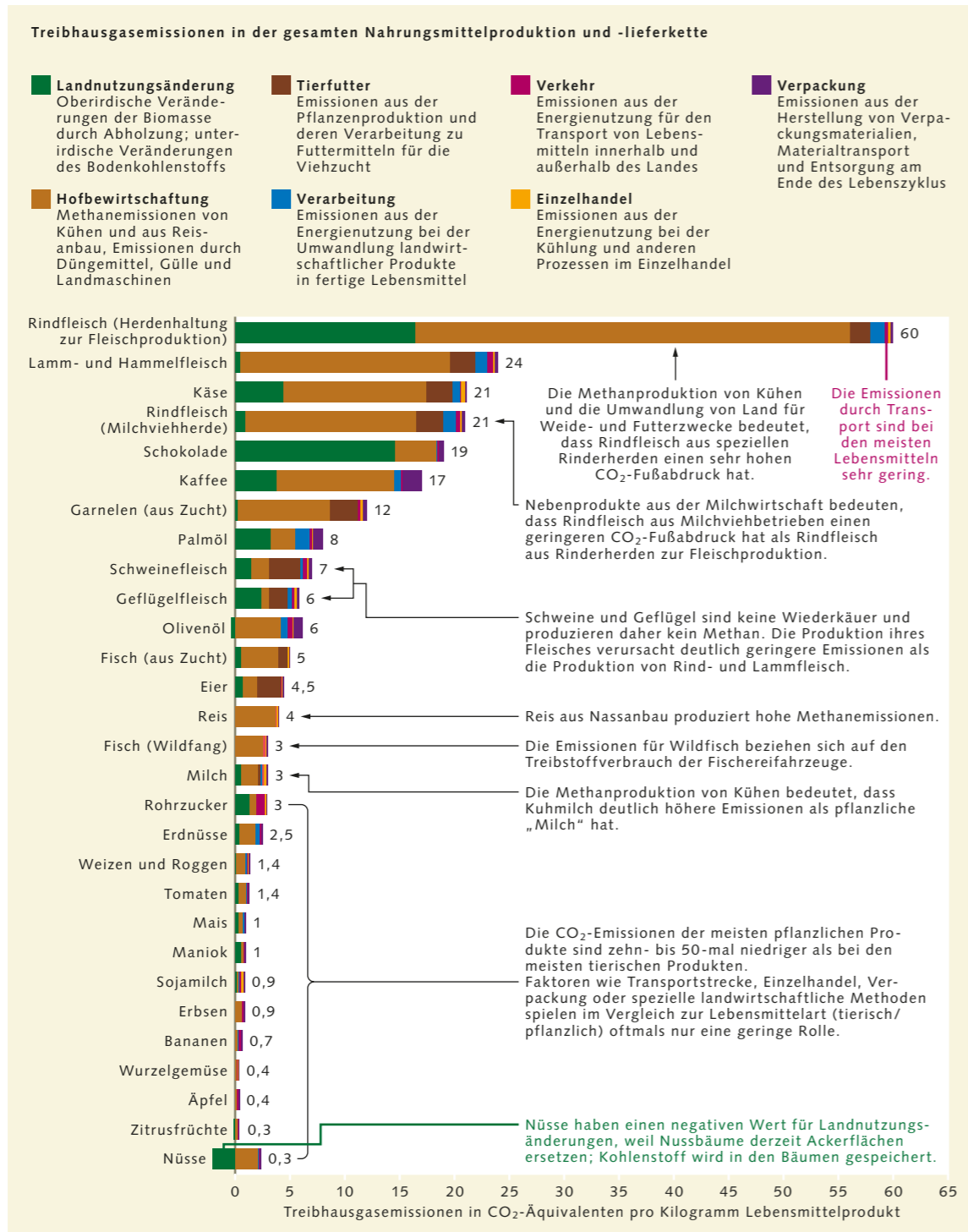
Besteht eine Gefahr für unsere Ernährungssicherheit?

In der öffentlichen Diskussion um den Einsatz von Verfahren zur verstärkten Kohlenstoffaufnahme der Landvegetation geben Fachleute immer wieder zu bedenken, dass der große Flächenbedarf für die benötigte Wiederaufforstung und den Anbau von Energiepflanzen die landwirtschaftliche Lebensmittelproduktion gefährden könnte. In Deutschland beispielsweise müsste Schätzungen zufolge

etwa ein Viertel der landwirtschaftlichen Nutzfläche aufgeforstet werden, um die schwer vermeidbaren Emissionen des Landes auszugleichen. Global betrachtet würde bis zum Jahr 2050 eine Landfläche so groß wie Indien benötigt, um so viele Wälder zu pflanzen, dass diese der Atmosphäre ausreichend Kohlendioxid entnehmen könnten, um die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Hinzu kämen bis zum Jahr 2100 dann allerdings noch Flächen für den Anbau von Bioenergiepflanzen – im Größenmaßstab Mexikos. So zumindest lauten die Annahmen in einer Vielzahl wissenschaftlicher Klimaszenarien, in denen das 1,5-Grad-Ziel am Ende erreicht wird. Flächendeckende Renaturierungen müssten vor allem in den tropischen und subtropischen Regionen der Erde stattfinden, weil deren Regenwälder und Feuchtgebiete besonders viel Kohlenstoff binden und speichern. Würde man die erforderlichen Maßnahmen umsetzen, gingen Berechnungen zufolge in Südostasien, Zentralafrika, in der Karibik sowie in Mittelamerika etwa die Hälfte aller heute noch genutzten landwirtschaftlichen Flächen verloren. Infolgedessen würden in den betroffenen Regionen die Konkurrenz um Land und langfristig auch die Lebensmittelpreise steigen. Beides trübe vor



3.10 > Die Produktion tierischer Lebensmittel wie Rindfleisch, Käse und Milch verursacht besonders hohe Treibhausgasemissionen. Eine fleischarme Ernährung zählt deshalb zu den einfachsten und wirkungsvollsten Methoden, den eigenen Kohlendioxid-Fußabdruck zu verkleinern.



3.11 > In Untersuchungen aus dem Jahre 2018 zeigte sich, dass bei der Produktion der meisten Nahrungsmittel die höchsten Treibhausgasemissionen durch Landnutzungsänderungen und Hofbewirtschaftung entstanden.

allein die Ernährungssicherheit der ärmeren Bevölkerungsgruppen in diesen Regionen.

Betrachtet man die Frage der Flächennutzung aus der globalen Perspektive, fällt die Antwort nicht ganz so eindeutig aus. In einer großen Metastudie aus dem Jahr 2018 kommen Forschende zu dem Ergebnis, dass für die Produktion von Fleisch, Eiern, Milch und Fisch aus der Aquakulturhaltung etwa 83 Prozent der weltweiten landwirtschaftlichen Flächen in Anspruch genommen werden (Tierhaltung und vor allem Tierfutterproduktion). Würden der weltweite Fleisch- und Milchkonsum drastisch sinken, würden demzufolge große Flächen frei und stünden für Wiederaufforstungs- und Renaturierungsprojekte sowie für den nachhaltigen Anbau von Bioenergiepflanzen zur Verfügung – selbst wenn zur selben Zeit mehr Nutzpflanzen angebaut werden müssten, um den steigenden Bedarf an pflanzlichen Nahrungsmitteln zu decken. Andere Studien deuten darauf hin, dass bei einem gleichbleibenden fleischreichen Ernährungsverhalten und einem unveränderten Landmanagement vor allem der flächendeckende Anbau von Energiepflanzen die langfristige Versorgung der wachsenden Weltbevölkerung mit ausreichend Nahrungsmitteln gefährden könnte.

Die 20 wichtigsten landbasierten Methoden zur Klimawandel-Minderung

Der Weltklimarat unterteilt Verfahren zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen sowie zur verstärkten Kohlendioxidaufnahme der Ökosysteme an Land in vier Kategorien. Sie betreffen (1) Wälder und andere Ökosysteme, (2) die Landwirtschaft, (3) die Biomasseproduktion für Produkte und die Energiegewinnung aus Biomasse sowie (4) Veränderungen des Konsumverhaltens.

Zu den Verfahren für *Wälder und Ökosysteme* zählen:

- der Schutz existierender Wälder, (Küsten-)Feuchtgebiete, Moore, Graslandschaften und Savannen vor Übernutzung, Abholzung oder Zerstörung infolge von Landgewinnung, Städtewachstum, Rohstoffabbau, Feuer, Krankheiten oder Schädlingsbefall. Besonderes Augenmerk gilt hier vor allem den tropischen Regenwäldern und Savannen;

- die Wiederaufforstung geschädigter Wälder sowie eine verbesserte nachhaltige Waldbewirtschaftung mit einem Fokus auf Artenvielfalt und einer verstärkten Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten und die Folgen des Klimawandels;
- die Wiederherstellung geschädigter (Küsten-)Feuchtgebiete, Moore, Graslandschaften und Savannen, beispielsweise durch eine Wiedervernässung und Renaturierung einstmals trockengelegter Flächen oder aber auch durch das Pflanzen neuer Mangrovenwälder und Salzwiesen;
- ein verbessertes Brandschutzmanagement in Wäldern, Graslandschaften und Savannen, unter anderem durch kontrolliertes Abbrennen des Unterwuchses.

In der Kategorie *Landwirtschaft* werden gelistet:

- eine verbesserte Bodenbehandlung auf Ackerflächen zur Sicherung oder Steigerung des Bodenkohlenstoffgehalts. Benötigt werden dafür zum Beispiel eine verbesserte artenreiche Fruchtfolge, die den Anbau von Zwischenfrüchten mit einschließt; der weitgehende Verzicht von Bodenbearbeitungen wie Pflügen und Eggen und die Düngung mit organischen Düngemitteln wie Mist;
- eine verbesserte Bewirtschaftung von Grünflächen zur Sicherung oder Steigerung des Bodenkohlenstoffgehalts, insbesondere direkt unter der Grasnarbe. Lösungsansätze schließen unter anderem eine extensive Beweidung sowie die Aussaat tiefwurzelnder Gräser mit ein;
- der zunehmende Einsatz agroforstwirtschaftlicher Landnutzungsformen. Dabei pflanzen Landwirte Bäume, Sträucher und Nutzpflanzen gemeinsam auf demselben Stück Land an, sodass sich im Idealfall verschiedene Synergien ergeben. Die Vorteile in Kürze: Bäume und Sträucher reichern Kohlenstoff in ihrer Biomasse sowie im Erdreich an, verhindern Bodenerosion und verbessern die Wasserqualität. Außerdem spenden sie Schatten, in dem sowohl Nutzpflanzen als auch Herdentiere vor extrem heißen Temperaturen geschützt sind;
- das Ausbringen von Biokohle aus pflanzlicher Biomasse. Biokohle wird aus Abfällen wie Holzresten,



3.12 > Durch intelligente Bewässerungsverfahren und einen gezielten Düngemiteleinsatz lässt sich der Ausstoß von Methan und Lachgas beim Anbau von Reis deutlich reduzieren.

Sägespänen, Stroh und anderer pflanzlicher Biomasse hergestellt – unter Sauerstoffabschluss und bei Temperaturen von 450 bis 550 Grad Celsius. Die kohlenstoffhaltige Biokohle gilt als Bodenverbesserer. Durch sie steigt zum Beispiel die Wasser- und Nährstoffbindung des Erdreiches und wird im Boden gespeicherter Kohlenstoff langsamer abgebaut. Mit Biokohle behandelte Reisfelder emittieren zum Beispiel weniger Lachgas. Einmal auf dem Feld verteilt, erfüllt Biokohle jahrzehntelang, mitunter sogar jahrtausendlang diese wichtigen Funktionen. Der Erfolg ihres Einsatzes hängt dabei allerdings stark von den Bodenverhältnissen sowie vom Ausgangsmaterial ab, aus dem die Biokohle hergestellt wurde;

- eine *Verringerung der enterischen Fermentation*. Dahinter verbergen sich Maßnahmen, die den Verdauungsprozess von wiederkäuenden Nutztieren derart beeinflussen, dass weniger Methan entsteht. Dazu gehören zum Beispiel das Verfüttern von Zusatzstoffen oder eine gezielte Zucht von Tieren, die weniger Methan produzieren;
- eine *verbesserte Güllewirtschaft*. Sie zielt darauf ab, durch einen verbesserten Umgang mit Gülle die entstehenden Methan- und Lachgasemissionen zu minimieren. Dazu gehören zum Beispiel der Einsatz spezieller Futtermittel, verbesserte Weidehaltung, eine Behandlung der Gülle mit gärungshemmenden Mitteln und optimierte Lagerungsverfahren;
- eine *verbesserte Nährstoffversorgung für Nutzpflanzen*. Durch sie können die Emissionen von Lachgas beim Ackerbau reduziert werden. Der Maßnahmenkatalog umfasst verschiedene nachhaltige Düngetechniken sowie den Einsatz unterschiedlicher Düngemittel, darunter auch organischer Dünger wie Kompost oder Mist;
- ein *optimierter Reisanbau*, wodurch weniger Methan und Lachgas in die Atmosphäre entweichen. Möglich wird dies unter anderem, indem Bewässerungsverfahren verbessert und Düngemittel gezielter eingesetzt werden.

Kategorie 3 enthält einzig und allein Verfahren, die unter dem Akronym BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) zusammengefasst werden. Gemeint sind

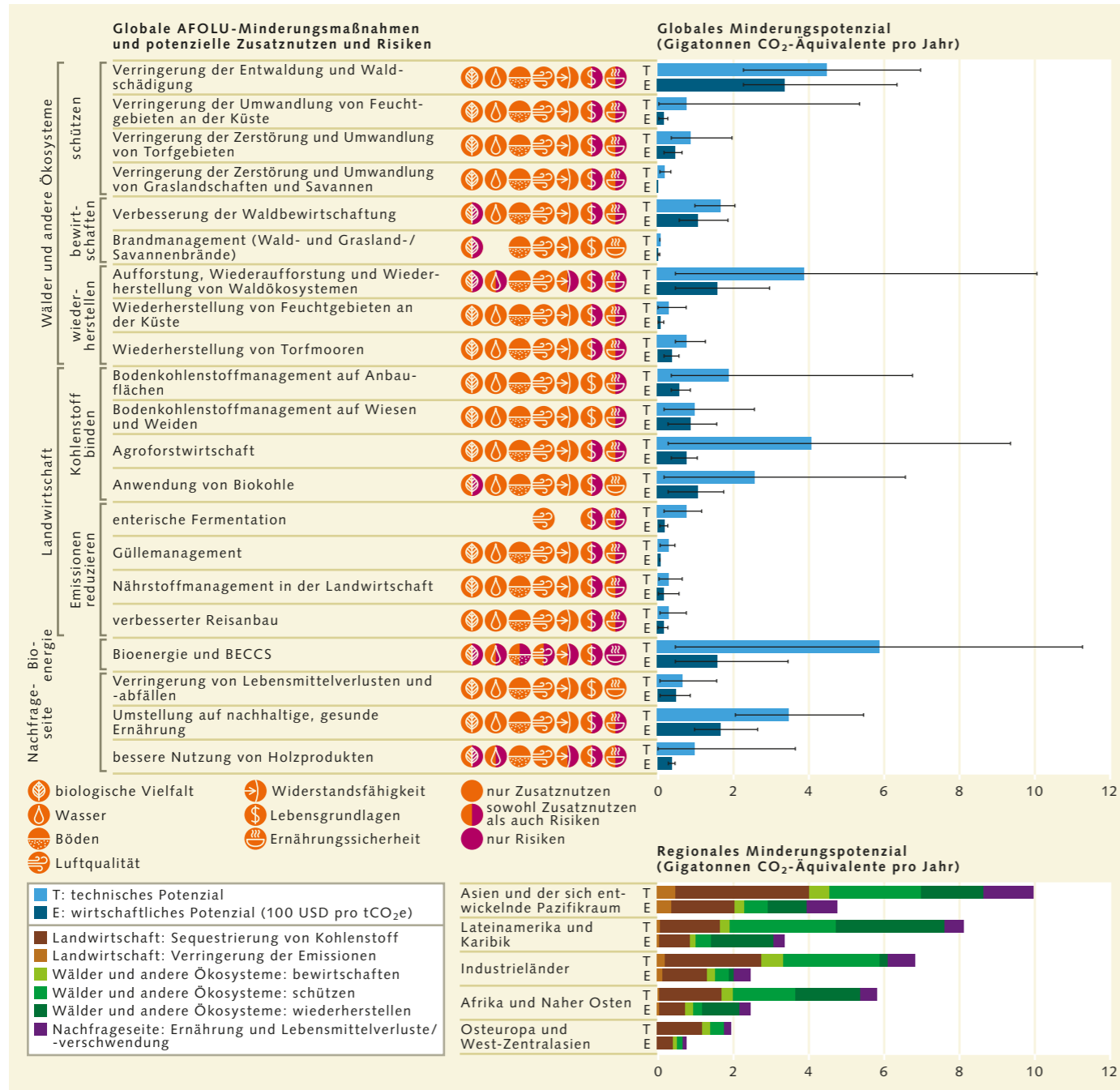
Methoden zur *Energiegewinnung aus pflanzlicher Biomasse*, einschließlich Holz- und Ernterückständen, organischen Abfällen und Biomasse aus herkömmlichen Lebens- und Futtermitteln wie Mais. Diese können zur Emissionsminderung beitragen, wenn erstens die gewonnene Energie für den Antrieb von Motoren (Biotreibstoffe) oder aber für die Wärme- und Stromproduktion genutzt wird und dabei Energie aus fossilen Brennstoffen ersetzt. Zweitens müssen die bei der Verbrennung entstehenden Kohlendioxidemissionen abgeschieden und anschließend sicher und dauerhaft eingelagert werden. Drittens sollte die Biomasse auf eine Art und Weise angebaut oder erzeugt werden, die keine zusätzlichen Treibhausgasemissionen verursacht und keine anderen negativen Auswirkungen auf Menschen und Natur nach sich zieht.

Verfahren für *Veränderungen des Konsumverhaltens* sind:

- eine *drastische Reduktion der Lebensmittelverluste und -abfälle* – etwa ein Drittel aller weltweit erzeugten Lebensmittel verderben auf dem Weg vom Feld oder Stall zu den Kunden oder werden nach dem Kauf von diesen ungenutzt entsorgt;
- eine *grundlegende Veränderung der Ernährungsweise vieler Menschen* – hin zu einer nachhaltig produzierten, überwiegend pflanzenbasierten Ernährung. Dies ist in vielen, aber nicht allen Regionen der Welt möglich;
- eine *zunehmende und verbesserte Nutzung von Holzprodukten*. Wenn Holz als Baumaterial oder aber in langlebigen Produkten verarbeitet wird, bleibt der in ihm enthaltene Kohlenstoff für lange Zeit gebunden. Emissionsmindernd wirkt die Nutzung von Holz zum Beispiel, wenn es aus nachhaltiger Waldwirtschaft stammt und andere, emissionsreiche Baumaterialien ersetzt.

Hürden und fehlende Rahmenbedingungen

Trotz ihres großen Potenzials haben Maßnahmen zur Einsparung von Treibhausgasemissionen oder zur verstärkten Kohlenstoff-Sequestrierung der Landvegetation bislang nur im geringen Maß zur Minderung des Klimawandels beigetragen. Die Erklärung dafür lautet: Sie wer-



3.13 > Eine nachhaltige Landnutzung sowie der fachgerechte Einsatz landbasierter Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme brächte Vorteile für Klima, Mensch und Natur. Diese Übersicht zeigt, in welchem Umfang Treibhausgasemissionen mithilfe 21 ausgewählter landbasierter Verfahren verhindert oder kompensiert werden könnten und wie groß der jeweilige Anteil wäre, der sich zu einem Preis von 100 US-Dollar pro Tonne Kohlendioxid-Äquivalente umsetzen ließe. Die runden Icons signalisieren, mit welchen Vorteilen und Risiken bei einem Einsatz des jeweiligen Verfahrens zu rechnen ist. Augenfällig ist, dass das Minderungspotenzial in Asien und dem sich entwickelnden Pazifikraum am größten ist.



3.14 > Drei Viertel der eisfreien Landflächen unserer Erde werden mittlerweile vom Menschen genutzt und gestaltet und, wie zum Beispiel hier durch Weizenanbau in Tibet, außerdem zur Nahrungsmittelproduktion genutzt. Das heißt aber auch, sie sind nicht mehr in ihrem ursprünglichen, natürlichen Zustand.

den bislang in einem viel zu kleinen Rahmen umgesetzt. Der Weltklimarat führt diese Entwicklung vornehmlich auf fehlende Investitionen zurück sowie auf mangelnde politische, institutionelle und gesellschaftliche Unterstützung.

So schaffen es politische Entscheidungsträger vielerorts nicht, Subventionen für intensive Landwirtschaft abzuschaffen und die frei werdenden Gelder stattdessen in nachhaltigen Ackerbau und Viehzucht zu investieren. Außerdem fehlen noch immer vielen armen Menschen, die im ländlichen Raum von Ackerbau oder Holzhandel (häufig illegale Rodungen) leben, alternative Einnahmequellen. Bis zum Jahr 2020 gab die internationale Staatengemeinschaft gerade einmal 700 Millionen US-Dollar jährlich für Maßnahmen zur emissionsmindernden Landnutzung aus. Bis zum Jahr 2030 werden aber allein in der globalen Waldwirtschaft Investitionen in Höhe von 178 Milliarden US-Dollar pro Jahr erforderlich sein, wenn Kohlendioxidemissionen in Höhe von fünf Milliarden Tonnen pro Jahr vermieden oder aber zusätzlich sequestriert werden sollen – also das 254-Fache. Zur Einordnung: Fünf Milliarden Tonnen Kohlendioxid entsprechen knapp der Hälfte jener Menge Kohlendioxid, welche die Landvegetation pro Jahr auf natürliche Weise aufnimmt.

Internationale Programme zum Schutz der tropischen Regenwälder und Feuchtgebiete vermehren sowohl Erfolge als auch Misserfolge, abhängig von der jeweiligen Nation. In Ländern, in denen Viehzüchter große bewaldete und unbewaldete Flächen kontrollieren (so wie etwa in Brasilien), sind die Anreize gering, die Herdengröße zugunsten einer Wiederaufforstung zu reduzieren. In Deutschland und anderen Ländern erschweren komplexe Zuständigkeiten und Eigentumsverhältnisse Wiederaufforstungen und nachhaltige Forstwirtschaft im großen Maßstab. Dabei werden beide dringend benötigt, insbesondere nach dem Waldsterben in Mitteleuropa infolge der Dürresommer 2018 bis 2022.

Zu guter Letzt erfordert der Wechsel von der herkömmlichen zur nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft Investitionen in neue oder andere Technologien. Das damit verbundene finanzielle Risiko ist vielen Land- und Forstwirten zu hoch – auch weil sie für die verstärkte Kohlenstoffaufnahme ihrer Flächen nur selten entlohnt werden. Hier bedarf es neuer Verfahren im nationalen und internationalen Handel für Emissionszertifikate und mehr Forschung, deren Ergebnisse die lokale Bevölkerung und Entscheidungsträger über die Kosten und den Nutzen einer nachhaltigen Landnutzung aufklären.

Zwei weitere Optionen für eine verstärkte Kohlendioxid-Entnahme an Land

Die beschleunigte Verwitterung von Gestein

Dieses chemische Verfahren macht sich zunutze, dass Gestein auf natürliche Weise chemisch verwittert. Dazu braucht es zum Beispiel Regenwasser, das während seiner Reise Richtung Erdboden stets einen gewissen Anteil Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt. Löst sich Kohlendioxid im Wasser, entsteht Kohlensäure. Diese Säure greift das Gestein an, sowie der Regen auf die Oberfläche eines Steines oder Felsens fällt. Durch diesen Angriff lösen sich im Gestein enthaltene Minerale, welche die Gesteinskörner zusammenhalten. Ihre Bestandteile werden vom Grund- und Oberflächenwasser abtransportiert. In einem weiteren Schritt reagieren säurebindende Minerale wie Kalzium und Magnesium mit dem im Regenwasser gelösten Kohlendioxid. Im Zuge dieser Reaktion entstehen Karbonatminerale, oder vereinfacht gesagt: neues Gestein, in dem Teile des einstigen atmosphärischen Kohlendioxids fest gebunden sind. In der Natur läuft dieser Verwitterungsprozess sehr langsam ab. Er ließe sich aber beschleunigen, indem der Mensch mineralreiches Gestein fein zermahlt und so die reaktionsfähige Gesteinsoberfläche vergrößert und das Gesteinsmehl großflächig auf Äckern verteilt. Bestimmte Bauabfälle sowie Reststoffe aus der Zementherstellung oder dem Bergbau könnten ebenfalls als Ausgangsmaterial genutzt werden. Verfahren zur beschleunigten Verwitterung sind bislang nur in Labor- und kleinen Feldexperimenten getestet und erforscht worden. Daher fehlen auch noch Erkenntnisse zu möglichen Umweltrisiken oder möglichen positiven Nebeneffekten ihres großflächigen Einsatzes. Unsicherheit herrscht auch noch bei der Frage, wo die benötigten Gesteinsmengen abgebaut werden könnten. Um die unvermeidbaren Emissionen in Deutschland auszugleichen, müssten nach Angaben der Nationalen Akademie der Wissenschaften (Leopoldina) jährlich etwa 200 Millionen Tonnen Gestein gefördert, vermahlen und verteilt werden. Das entspräche in der Größenordnung etwa drei Vierteln der Förderung von Bausand und Baukies in Deutschland im Jahr 2019. Der logistische Aufwand, so die Fachleute, wäre voraussichtlich sehr hoch.

Die direkte Kohlendioxid-Entnahme aus der Umgebungsluft

Laut Weltklimarat fallen Methoden zur direkten Abscheidung von Kohlendioxid aus der Luft (englisch: Direct Air Capture, DAC) in die Kategorie „geochemische CDR-Verfahren“. Benötigt werden dafür technische Anlagen, welche die Umgebungsluft ansaugen und das darin enthaltene Kohlendioxid mithilfe eines chemischen Bindemittels (flüssig oder fest) herausfiltern. Anschließend werden Bindemittel und Treibhausgas mit viel Hitze (bis zu 900 Grad Celsius) und Feuchtigkeit oder aber unter Druck wieder voneinander getrennt –

ein Arbeitsschritt, der in der Regel sehr viel Energie verschlingt. Das Bindemittel wird danach wiederverwendet, das abgeschiedene Kohlendioxid entweder im tiefen geologischen Untergrund eingelagert (englisch: Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) oder aber für die Herstellung kohlenstoffhaltiger Produkte verwendet (englisch: Direct Air Carbon Capture and Utilisation, DACCU).

Das DAC-Verfahren hat den Vorteil, dass der Flächenbedarf viel geringer ist als bei anderen Verfahren. Außerdem eignen sich hierfür auch Standorte, die für Land- und Forstwirtschaft nicht infrage kommen, zum Beispiel Wüsten oder Innenstädte. Da der Kohlendioxidanteil in der Luft jedoch gering ist, müssen die Anlagen sehr große Mengen Luft filtern, was den Energieverbrauch in die Höhe treibt und viel höhere Kosten verursacht, als wenn man das Kohlendioxid in einem Kraftwerk oder in einem Stahlwerk abscheiden würde.

Ein Rechenbeispiel: Selbst bei sehr ambitionierter Klimapolitik wären nach Aussage des deutschen Umweltbundesamtes im Jahr 2050 noch immer mindestens fünf Prozent der Treibhausgasemissionen Deutschlands unvermeidbar und müssten durch eine Kohlendioxid-Entnahme ausgeglichen werden. Würde man versuchen, diese unvermeidbaren Emissionen durch DAC-Verfahren auszugleichen, könnte der Energiebedarf dafür mehr als 100 Terawattstunden pro Jahr betragen. Das entspräche etwa einem Fünftel der deutschen Stromerzeugung im Jahr 2021 (518 Terawattstunden). Da für DAC-Verfahren hauptsächlich Wärme benötigt wird, kämen als Energiequellen aber auch Abwärme aus Industrieprozessen oder Geothermie infrage.

Nach Angaben der Internationalen Energieagentur waren im September 2022 bereits 18 DAC-Demonstrationsanlagen in Europa, den USA und Kanada in Betrieb. Gemeinsam entfernten sie pro Jahr etwa 10 000 Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre, wobei das abgeschiedene Gas im Anschluss vor allem in der Getränkeherstellung zum Einsatz kam (Kohlensäure) und nur ein kleiner Teil für eine dauerhafte Speicherung im Untergrund verpresst wurde. Eine Anlage mit einem Entnahmepotenzial von einer Million Tonnen Kohlendioxid befand sich zu diesem Zeitpunkt in den USA im Bau.

Für einen Einsatz im industriellen Maßstab wird entscheidend sein, ob sich künftige DAC-Anlagen mit erneuerbaren Energiequellen betreiben lassen und überall dort genügend Wasser zur Verfügung steht, wo Feuchtigkeit für die Trennung von Kohlendioxid und Bindemittel benötigt wird. In Ländern wie Deutschland kommt erschwerend hinzu, dass die Einlagerung abgeschiedenen Kohlendioxids im Untergrund gesellschaftlich umstritten ist und das Verfahren in der Öffentlichkeit bisher keine Unterstützung findet.

CONCLUSIO

Lösungen, die viel zu selten umgesetzt werden

Im Vergleich zum Ozean stellen die Landlebensräume einen kleinen Kohlenstoffspeicher dar. In den landlebenden Organismen und im Boden sind weniger als ein Zehntel jener Kohlenstoffmenge eingelagert, welche die Meere verwahren. Dennoch spielen die Kohlenstoffbilanzen der Böden und der Landvegetation aus mehreren Gründen eine Schlüsselrolle in der aktuellen Klimakrise.

Die Menschheit trägt seit jeher durch Landnutzungsänderungen zu einem Abbau der Kohlenstofflagerstätten an Land bei. Das geschieht, wo immer Wälder (brand-)gerodet, Feuchtgebiete trockengelegt, natürliche Graslandschaften in Ackerland umgebrochen und Böden durch intensive Landwirtschaft ausgelaugt werden. Bei jeder dieser Tätigkeiten wird organische Substanz zersetzt oder verbrannt, sodass Treibhausgase entstehen und freigesetzt werden. Kohlendioxidemissionen durch Landnutzungsänderungen machen derzeit etwa ein Zehntel der vom Menschen verursachten Gesamt-Kohlendioxidemissionen aus. Hinzu kommen steigende Methan- und Lachgasemissionen aus der Nutztierhaltung sowie infolge des intensiven Einsatzes von Düngemitteln.

Global betrachtet, hat die Menschheit bislang 75 Prozent aller ursprünglichen Landflächen umgestaltet und 85 Prozent der einst existierenden Feuchtgebiete zerstört. Dadurch hat sie nicht nur lokale Klimaprozesse verändert, sondern auch die Fähigkeit der verbleibenden Ökosysteme reduziert, Kohlenstoff aufzunehmen und zu speichern. Ungeachtet dessen stellen die Landvegetation und Böden der Welt noch immer eine Kohlenstoffsénke dar. Das heißt, sie nehmen mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und speichern den enthaltenen Kohlenstoff, als sie durch gegenläufige Prozesse wieder freisetzen.

Diese Eigenschaft bedingt, dass die Landvegetation, hier insbesondere die Wälder, seit dem Jahr

1850 rund 31 Prozent der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen aufgenommen und im Untergrund oder aber in ihrer Biomasse eingelagert hat. Forschende beobachten zudem einen Düngeeffekt der steigenden Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre. Er führt dazu, dass Landpflanzen besser wachsen und in ihrer Gesamtheit stetig mehr Kohlenstoff aufnehmen und einlagern.

Auf Grundlage dieses Wissens wurde eine Reihe an Lösungen entwickelt, mit denen weitere Treibhausgasemissionen durch Landnutzungsänderungen weitgehend verhindert, die Kohlenstoffspeicher der Landsysteme vergrößert und mögliche Restemissionen des Menschen kompensiert werden können.

Im Kern geht es darum, bestehende Wälder, Feuchtgebiete und Graslandschaften zu schützen, zerstörte Ökosysteme und Böden wiederherzustellen, Land- und Forstwirtschaft auf umweltschonende Weise zu betreiben und dabei so viel Biomasse zu produzieren, dass Teile dieser auch für die Bioenergiegewinnung sowie für die Herstellung von Produkten genutzt werden können.

Nicht alle Maßnahmen sind risikolos, und mancherorts ist der Wettbewerb um Landflächen groß. Richtig umgesetzt aber ließen sich mit den bekannten Verfahren etwa 20 bis 30 Prozent jener Treibhausgas-Emissionseinsparungen und Kohlendioxid-Entnahmen erreichen, die bis zum Jahr 2050 benötigt werden, um die globale Erwärmung langfristig auf unter zwei Grad Celsius zu begrenzen.

Bislang aber werden die entsprechenden Maßnahmen in einem viel zu kleinen Rahmen umgesetzt. Der Weltklimarat führt diese Entwicklung auf fehlende Investitionen zurück sowie auf mangelnde politische, institutionelle und gesellschaftliche Unterstützung. Die gelebte Realität steht somit im klaren Widerspruch zu der wissenschaftlichen Erkenntnis, wonach es der Menschheit nur mithilfe gesunder und funktionaler Ökosysteme gelingen kann, die Klima- und Artenkrise zu bewältigen.

4 Marine CDR-Verfahren: Forschung unter Zeit- und Erwartungsdruck

> Marine Methoden für eine verstärkte Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre rücken bei der Suche nach Auswegen aus der Klimakrise zunehmend in den Fokus. Das meiste Wissen zu Potenzial, Machbarkeit und Folgen ist bislang aber nur theoretischer Natur. Die Meeresforschung soll nun schnellstmöglich Antworten liefern und sieht sich nicht nur der Kritik, sondern auch einem Wettbewerb mit Unternehmen ausgesetzt, die mit marinen CDR-Verfahren vor allem Geld verdienen wollen.



Ein Ozean der Möglichkeiten oder gefährlicher Hype?

> Der Klimawandel verursacht zunehmende Schäden und Verluste rund um den Globus. Politik und Unternehmen suchen einerseits nach Wegen, Emissionen einzusparen, scheuen sich andererseits aber, tiefgreifende Maßnahmen umzusetzen. Die junge Forschung zu marinen Methoden der Kohlendioxid-Entnahme steht derweil vor der schwierigen Aufgabe, das facettenreiche Thema in kurzer Zeit umfassend zu bearbeiten. Ob dies gelingen kann, ohne dass kommerzielle Interessen in den Vordergrund treten? Ein Verhaltenskodex soll Fehlentwicklungen verhindern.

Ein spannungsgeladenes Forschungsfeld

Während Politik und Wissenschaft seit mehr als 15 Jahren die Potenziale und Machbarkeit landbasierter Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) diskutieren, hat sich die Ansicht, dass auch der Ozean Möglichkeiten für gezielte Maßnahmen zur Minderung des Klimawandels bietet, erst vor Kurzem durchgesetzt. Forschungsexperimente zur sogenannten Ozeandüngung fanden zwar schon in den späten 1990ern und in den 2000er-Jahren statt. Intensiviert wurde die Forschung zu meeresbasierten CDR-Methoden jedoch erst nach der

Unterzeichnung des Pariser Klimaabkommens im Dezember 2015.

Kritischen Stimmen zufolge liegt diese Entwicklung darin begründet, dass landbasierte Klima-Interventionsansätze auf immer mehr Umsetzungshürden treffen (Flächenkonkurrenz, Proteste der lokalen Bevölkerung etc.) und daher von der Gesellschaft mit zunehmender Skepsis betrachtet werden. Im Klartext heißt das: Sie sind politisch kaum noch oder nur mit großen Anstrengungen durchzusetzen. Eingriffe in das Meer würden in der Bevölkerung hingegen auf weniger Widerstand treffen, so die Hoffnung – vor allem jene Verfahren, die natürliche Prozesse der Kohlendioxidaufnahme und -speicherung verstärken. Die klimapolitische Fokusverschiebung auf das Meer passe zudem in das Narrativ der „Blue Economy“, argumentieren Kritiker. Dieses besagt, dass die Rohstoff- und Entwicklungsgrenzen an Land dadurch umgangen werden können, indem Nahrung, Rohstoffe und Energie künftig im größeren Maß dem Meer entnommen werden. Der Ausbau der Fischzucht in mariner Aquakultur sowie Bestrebungen, mit dem Tiefseebergbau zu beginnen, seien Belege für diese Entwicklung.

Viel stärker noch aber wiegt der Vorwurf, sämtliche Überlegungen zu CDR-Verfahren seien nur darauf angelegt, Zeit zu schinden und echte, lebensverändernde Maßnahmen zur Emissionsreduktion in die Zukunft zu verlagern – stets mit dem Argument begründet, dass es ja technische Möglichkeiten gäbe, die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre eines Tages zu regulieren. Die politische Diskussion um CDR-Verfahren sei deshalb nicht mehr als ein klimapolitischer Hype, verbunden mit vielen leeren Versprechen, sagen die Kritiker.

Andere Stimmen entgegnen, dass die immer drastischer werdenden Auswirkungen des Klimawandels die Dringlichkeit wirksamer Klimaschutzmaßnahmen verstärken und deshalb auch marine Verfahren zur Kohlen-



4.1 > Auf der jährlich stattfindenden Weltklimakonferenz wird auch gefragt, welche konkreten Klimaschutzmaßnahmen die Staaten planen und umsetzen. Seitdem steigt der Druck auf die Wissenschaft, herauszufinden, welche Verfahren zur Entnahme von Kohlendioxid besonders wirkungsvoll sind und sich auf umwelt- und sozialverträgliche Weise umsetzen lassen.

Ozeandüngung

Algen brauchen Nährstoffe wie Eisen-, Stickstoff- oder Phosphorverbindungen, um zu wachsen. An ihnen aber mangelt es in vielen Meeresregionen. Forschende kamen daher auf die Idee, Eisenstaub an der Wasseroberfläche zu verteilen, um Algenblüten anzuregen. Mehr Algen würden mehr Kohlendioxid aufnehmen und den gebundenen Kohlenstoff in die Tiefe verfrachten, so der Gedanke. 13 bislang durchgeführte Forschungsexperimente auf hoher See bestätigten: Infolge des Nährstoffeintrages wuchsen mehr Algen. Einen zunehmenden Kohlenstoff-Transport in die Tiefsee aber konnten die Fachleute nicht einhellig belegen. Außerdem fehlt noch umfassendes Wissen über mögliche Risiken und Nebenwirkungen einer Ozeandüngung für Mensch und Natur.

Aus diesem Grund wurde ein Regelwerk installiert, welches die Ozeandüngung für kommerzielle Zwecke (zum Beispiel Verkauf von Emissionszertifikaten) in internationalen Gewässern verbietet. Für Forschungszwecke ist sie hingegen weiterhin erlaubt. Bei dem Regelwerk handelt es sich um eine Überarbeitung des Londoner Protokolls, welches seit dem Jahr 1996 das Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Konvention genannt) ergänzt und dieses langfristig ersetzen soll. Ratifiziert wurde die Neufassung des Londoner Protokolls bisher nur von sechs Staaten, weshalb sie auf völkerrechtlicher Ebene noch nicht in Kraft getreten ist.

dioxid-Entnahme nicht mehr ausgeschlossen werden könnten. Ebenso dringlich sei es aber, die vielen Wissens- und Regulierungslücken hinsichtlich mariner CDR-Verfahren zu schließen. Abgesehen von der Wiederherstellung zerstörter Küstenökosysteme seien die meisten marinen Methoden zur Entnahme von Kohlendioxid vergleichsweise neu. Sie wurden bislang kaum getestet, sodass Detailwissen zu ihrer Wirksamkeit, möglichen Kosten sowie Risiken und Folgen für Umwelt und Gesellschaft größtenteils fehle. Auf rechtlicher Ebene sei zudem absehbar, dass die bestehenden internationalen Meeresübereinkommen sowie nationalen Gesetze zum Umgang mit dem Meer weder ausreichen, eine sichere und transparente Forschung an marinen CDR-Verfahren sicherzustellen, noch, deren Einsatz im industriellen Maßstab zufriedenstellend zu regulieren.

Vor allem Investoren treiben die Forschung voran

Aus diesen Gründen und aller Kritik zum Trotz wächst die Zahl der Forschungsvorhaben zu meeresbasierten Verfahren der Kohlendioxid-Entnahme stetig. Eine treibende Kraft sind US-amerikanische Investoren, die ein kommer-

zielles Interesse an marinen Klima-Interventionsansätzen haben und entsprechende Studien in Auftrag geben. Die erste von der deutschen Bundesregierung finanzierte Forschungsmission zu den bislang vielversprechendsten marinen Methoden der Kohlendioxid-Entnahme begann im August 2021. Auf EU-Ebene werden seit dem Jahr 2020 ausgesuchte meeresbasierte CDR-Verfahren von verschiedenen Forschungsinstitutionen gemeinsam untersucht – ebenfalls finanziert aus öffentlichen Mitteln.

Das bislang angehäufte Fachwissen reicht allerdings nicht aus, um grundlegende Faktoren umfassend zu bewerten – etwa das Kohlendioxid-Speicherpotenzial, technische Machbarkeit, Effektivität sowie Kosten, Risiken und mögliche positive Nebeneffekte der Verfahren. Fachleute und Umweltschützer treibt deshalb die Sorge um, dass der hohe Handlungsdruck sowie die wachsenden wirtschaftlichen Interessen Entscheidungsträger veranlassen könnten, einem Einsatz meeresbasierter CDR-Verfahren zuzustimmen, bevor die vielen Wissenslücken geschlossen wurden. Finanzieren Unternehmen Auftragsforschung, kann zudem nicht ausgeschlossen werden, dass die Investoren Einfluss auf die Interpretation und Bewertung der gesammelten Daten nehmen.

Ein Verhaltenskodex für die Klima-Interventionsforschung

Führende US-amerikanische Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen haben deshalb einen Verhaltenskodex für die Erforschung meeres- und landbasierter Verfahren der Kohlendioxid-Entnahme entwickelt. Dieser umfasst fünf Punkte, die nach Aussage der Experten von jedem Forschungsprojekt als ethischer Handlungsrahmen angenommen und umgesetzt werden sollten. Diese fünf Punkte lauten:

- *Vorrang des kollektiven Nutzens:* Der kollektive Nutzen für die Menschheit und die Umwelt muss das Hauptziel einer jeden Forschungsarbeit sein, die durchgeführt wird, um das Potenzial von Klima-Interventionstechnologien zur Abschwächung oder Umkehr des vom Menschen verursachten Klimawandels zu entwickeln und zu bewerten.
- *Verantwortung festlegen:* Regierungen und Behörden müssen die Zuständigkeiten klären und gegebenenfalls neue Mechanismen schaffen, um groß angelegte Forschungsaktivitäten im Bereich des Klimawandels, die das Potenzial oder die Absicht haben, die Umwelt oder die Gesellschaft erheblich zu verändern, zu regeln und zu überwachen. Diese Mechanismen sollten auf den bestehenden Strukturen und Normen zur Regelung der wissenschaftlichen Forschung

aufbauen und diese erweitern und im Falle schädlicher Folgen oder Ergebnisse festlegen, wer deren Kosten trägt.

- *Verpflichtung zu offener und kooperativer Forschung:* Die Forschung sollte offen und kooperativ durchgeführt werden, vorzugsweise in einem Rahmen, der breite internationale Unterstützung genießt. Forschungstätigkeiten, die das Potenzial haben, die Umwelt in erheblichem Maße zu beeinträchtigen, sollten einer Risikobewertung unterzogen werden. Bei dieser sollten sowohl die Risiken und ihre Verteilung im Zusammenhang mit der Tätigkeit selbst berücksichtigt werden als auch die möglichen Folgen und weiterhin bestehende Wissenslücken, wenn das Experiment nicht durchgeführt würde.
- *Evaluierung und Bewertung durchführen:* Um die gesellschaftlichen Ziele zu erreichen, sind iterative, unabhängige technische Bewertungen des Forschungsfortschritts bei Klima-Interventionsansätzen erforderlich. Die Bewertung aller beabsichtigten und unbeabsichtigten Folgen, Auswirkungen und Risiken ist von entscheidender Bedeutung, um den politischen Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit jene Informationen zur Verfügung zu stellen, die sie benötigen, um das Potenzial von Klimainterventionen zu bewerten.
- *Öffentlichkeit einbinden:* Die Öffentlichkeit muss bei der Forschungsplanung und -bewertung sowie bei der Entwicklung von Entscheidungsmechanismen und -prozessen eingebunden werden. Ziel ist es, sicherzustellen, dass die internationalen und generationenübergreifenden Auswirkungen von Klimaschutzstrategien und -maßnahmen berücksichtigt werden.

Gegnern mariner Verfahren der Kohlendioxid-Entnahme reicht dieser Verhaltenskodex nicht aus. Sie lehnen weitere Eingriffe des Menschen in den Weltozean grundsätzlich ab und fragen mit Blick auf den Klimawandel, die Überfischung und die Verschmutzung der Meere, ob die Menschheit dem Ozean nicht schon zu viel angetan hat.

Angesichts der erwartbaren kontroversen gesellschaftlichen Auseinandersetzungen über das Für und Wider eines Einsatzes mariner Klima-Interventionstechnologien arbeiten Forschende daran, die vielen Fragestellungen zu sortieren und das facettenreiche Thema durch

trans- und interdisziplinäre Forschung ganzheitlich anzugehen. Eine Rolle spielen dabei nicht nur technologische, ökologische, wirtschaftliche, rechtliche und regulatorische Aspekte, sondern auch die Frage, ob die Bevölkerung eines Staates oder einer von möglichen Maßnahmen betroffenen Region überhaupt einverstanden wäre und entsprechende Einsätze zum Ausgleich von Restemissionen unterstützen würde. Eines steht nämlich heute schon fest: Maßnahmen im kleinen Maßstab werden nicht ausreichen, um den Klimawandel wirkungsvoll zu bremsen. Soll der Ozean einen entscheidenden Anteil am Ausgleich der Restemissionen leisten (für ein Erreichen des 1,5-Grad-Ziels: 420 bis 1100 Milliarden Tonnen Kohlendioxid), wird eine neue Kohlendioxid-Entnahme-Industrie entstehen müssen und das Landschaftsbild in den betroffenen Meeres- und Küstenregionen entsprechend verändern. Anders gesagt: Ein wirksamer Ausgleich der anfallenden Restemissionen durch marine Kohlendioxid-Entnahmeverfahren bedeutet, massiv in die natürlichen Prozesse des Ozeans einzugreifen – und zwar über große Regionen hinweg und für einen langen Zeitraum.

Viele Parallelen und zusätzliche Herausforderungen

Vergleicht man land- und meeresbasierte Klima-Interventionstechnologien, werden viele Parallelen deutlich. Fachleute unterscheiden in beiden Sphären zwischen biologischen, chemischen und geochemischen CDR-Methoden, wobei Hybridformen durchaus möglich sind. Die Schlüsselverfahren ähneln sich ebenfalls. Die Wiederherstellung und Erweiterung vegetationsreicher Küstenökosysteme wie Mangrovenwälder, Seegras- und Salzwiesen beispielsweise sind im Grunde Spiegelbilder landbasierter Maßnahmen zur (Wieder-)Aufforstung und Wiederherstellung kohlenstoffreicher Wälder, Moore und Graslandschaften. Methoden zur Alkalinitätssteigerung des Meerwassers beruhen auf Verfahren zur beschleunigten Gesteinsverwitterung – und Verfahren zum großflächigen Algenanbau für die Bioenergiegewinnung benötigen ebenso wie BECCS eine Komponente der Kohlendioxidabscheidung und -speicherung.

Dennoch stellt der Ozean eine besondere Herausforderung dar: Seine schiere Größe und erdumspannenden

Meeresströmungen sowie die komplexen Wechselwirkungen innerhalb des Systems Meer erschweren es dem Menschen heute schon, den Umfang und die Dauer seiner natürlichen Aufnahme und Speicherung von Kohlendioxid zu messen. Sollten marine CDR-Methoden zum Einsatz kommen, stellen sich obendrein die Aufgaben, die vom Menschen initiierte zusätzliche Aufnahme von Kohlendioxid zu messen und zu verifizieren, sie bestimmten Prozessen oder Maßnahmen zuzuschreiben und die Dauer der Einlagerung von Kohlenstoff sowie mögliche Umweltauswirkungen für jede individuelle Maßnahme über lange Zeiträume hinweg zu überwachen. Wie das gelingen soll, ist eine der zentralen Forschungsfragen, denn funktionierende und bestenfalls standardisierte Mess- und Beobachtungssysteme fehlen bislang für die meisten Methoden.

Dasselbe gilt für Lösungen, mit denen sich mögliche negative Auswirkungen bestimmter CDR-Methoden auf eine kleine Meeresregion begrenzen ließen. Da die Meeresströmungen alle Teile des Weltozeans miteinander verbinden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass CDR-Verfahren, die im Küstengewässer eines Staates durchgeführt werden, Auswirkungen auf Gebiete haben, die Tausende Kilometer entfernt liegen.

Aktuell wird eine Vielzahl mariner CDR-Methoden erforscht. Die meisten von ihnen setzen entweder auf die Biologie des Meeres – das heißt auf die fotosynthetische Umwandlung von Kohlendioxid in Biomasse und deren Einlagerung in großen Meerestiefen – oder aber auf chemisch-physikalische Prozesse, im Zuge derer mehr Kohlendioxid im Oberflächenwasser gelöst und über die Strömungen ebenfalls in die Tiefe verfrachtet wird.

Die in Wissenschaft und Klimapolitik am häufigsten oder aber am intensivsten diskutierten Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme werden auf den folgenden Seiten vorgestellt. Im Mittelpunkt stehen dabei: die Funktionsweise der jeweiligen Methode, ihr Kohlendioxid-Entnahmepotenzial und dessen Langlebigkeit, ihr technischer Entwicklungsstand und die Frage, ob sie im großen Maßstab anwendbar wäre, ihre Wirksamkeit im Verhältnis zu den dabei anfallenden Kosten – sofern diese schon bekannt ist –, ihre Vor- und Nachteile für Mensch und Umwelt sowie wichtige soziale, rechtliche und politische Rahmenbedingungen.

4.2 > In einer Großalgenfarm vor der US-amerikanischen Ostküste sammelt ein Taucher Probenmaterial für Forschungszwecke ein. Die Wissenschaftler untersuchen, welche Großalgenarten schnell wachsen und obendrein robust und unempfindlich sind.



5 Mehr Kohlenstoffeinlagerung in Wiesen und Wäldern des Meeres?

> Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder wachsen auf weit weniger als einem Prozent der Ozean- und Küstenfläche, tragen aber erheblich zur natürlichen Einlagerung von Kohlenstoff im Meeresboden bei. Pläne, diese Küstenlebensräume auszubauen, um ihre natürliche Aufnahme von Kohlendioxid zu verstärken, werden aber voraussichtlich nur in ausgewählten Meeresregionen zum erhofften Erfolg führen. Löhnen können sie sich aus vielen Gründen aber dennoch.



Blue Carbon: Ein Lösungsansatz mit doppeltem Nutzen

> Vegetationsreiche Küstenökosysteme wie Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder verantworten mindestens 30 Prozent des im Meeresboden eingelagerten organischen Kohlenstoffs. Weltweit schrumpft jedoch die Fläche dieser Ökosysteme und mit ihnen ihre unterirdischen Kohlenstofflagerstätten. Wo der Mensch das Sterben der Meereswiesen und -wälder aufhält und zerstörte Gebiete wiederherstellt, forciert er nicht nur die Kohlenstoffaufnahme der Pflanzengemeinschaften, sondern stärkt auch Naturräume, deren Funktion und Gesundheit für die Menschheit überlebenswichtig sind.

Mit den Werkzeugen der Natur

Bei der Suche nach Wegen, die Aufnahme von Kohlendioxid durch den Ozean zu verstärken, fällt der Blick logischerweise zuerst auf die Schlüsselakteure im Kohlenstoffkreislauf des Meeres. Dazu gehören im Küstenbereich vor allem die vegetationsreichen Ökosysteme im Gezeiten- und Flachwasserbereich (bis 50 Meter Wassertiefe), gemeint sind Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder, wobei Letztere oft auch als Kelpwälder bezeichnet werden. Das Verbreitungsgebiet dieser vier Ökosysteme macht zusammengenommen weniger als ein Prozent der weltweiten Meeresfläche aus, die Gezeitenzone mit eingeschlossen. Weil die Meereswiesen und

-wälder jedoch hochproduktive Ökosysteme sind, wandeln sie viel Kohlendioxid in Biomasse um und verantworten mindestens 30 Prozent des im Meeresboden eingelagerten organischen Kohlenstoffs.

Wie Pflanzen an Land nehmen Pflanzen im Meer oder Gezeitenbereich Kohlendioxid im Zuge der Fotosynthese auf und binden den darin enthaltenen Kohlenstoff. Die Aufnahme erfolgt jedoch nicht nur aus der Luft, sondern auch aus dem Meerwasser – etwa durch Seegräser und Tange. Da die Pflanzengemeinschaften in Mangrovenwäldern, Seegraswiesen und Salzmarschen allesamt Wurzeln bilden und auf sandigem oder schlammigem Untergrund wachsen, sind sie in der Lage, einen Großteil des gebundenen Kohlenstoffs im Untergrund einzulagern – zum

5.1 > Mangroven schützen die Küste vor Wellen, Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten. Allen Wetterextremen aber können auch sie nicht trotzen. Als der Wirbelsturm „Maria“ im September 2017 über Costa Rica fegte, starben große Teile dieses Mangrovenwaldes ab.

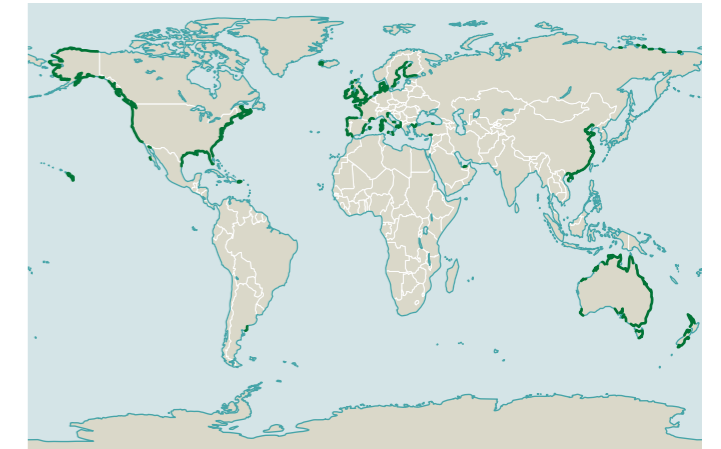


Verbreitungsgebiete vegetationsreicher Küstenökosysteme

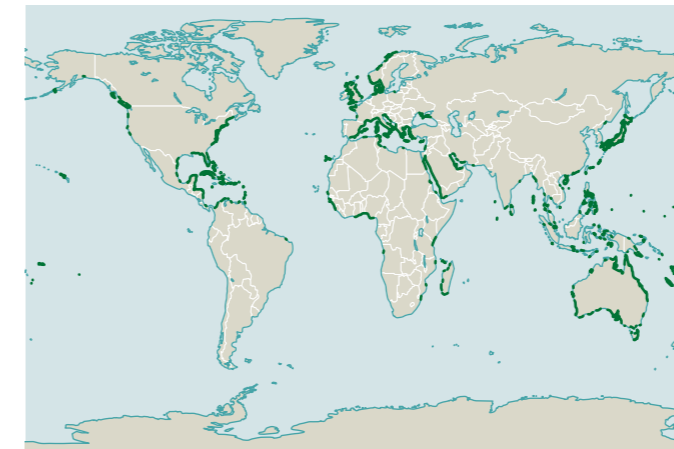
Mangrovenwälder



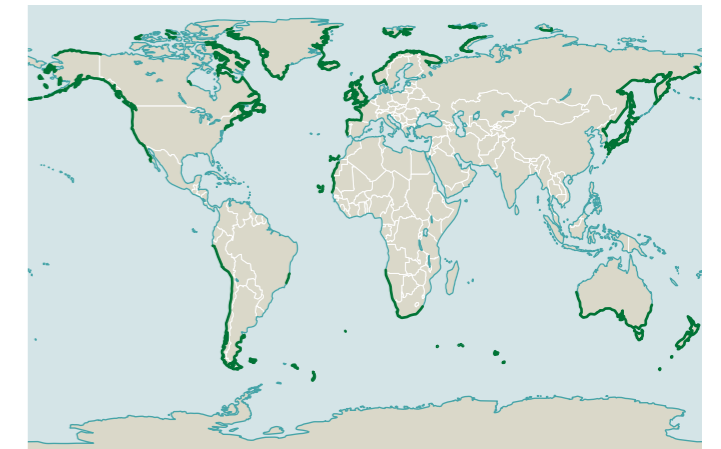
Salzmarschen



Seegraswiesen



Tangwälder der Braunalgengattung *Laminaria*



einen als lebende Biomasse im eigenen Wurzelwerk; zum anderen in Form eigener abgestorbener Pflanzenteile, die zu Boden sinken und im Küstensediment eingeschlossen werden.

Hinzu kommt, dass die Meereswiesen und -wälder die Wasserbewegung bremsen. Auf diese Weise gelingt es ihnen, viele Schwebstoffe aus dem Wasser zu filtern und die Partikel sowie abgestorbenes Tier- und Pflanzenmaterial zwischen ihren Halmen und Wurzeln abzulagern. Durch diesen steten Partikeleintrag wächst das Podest,

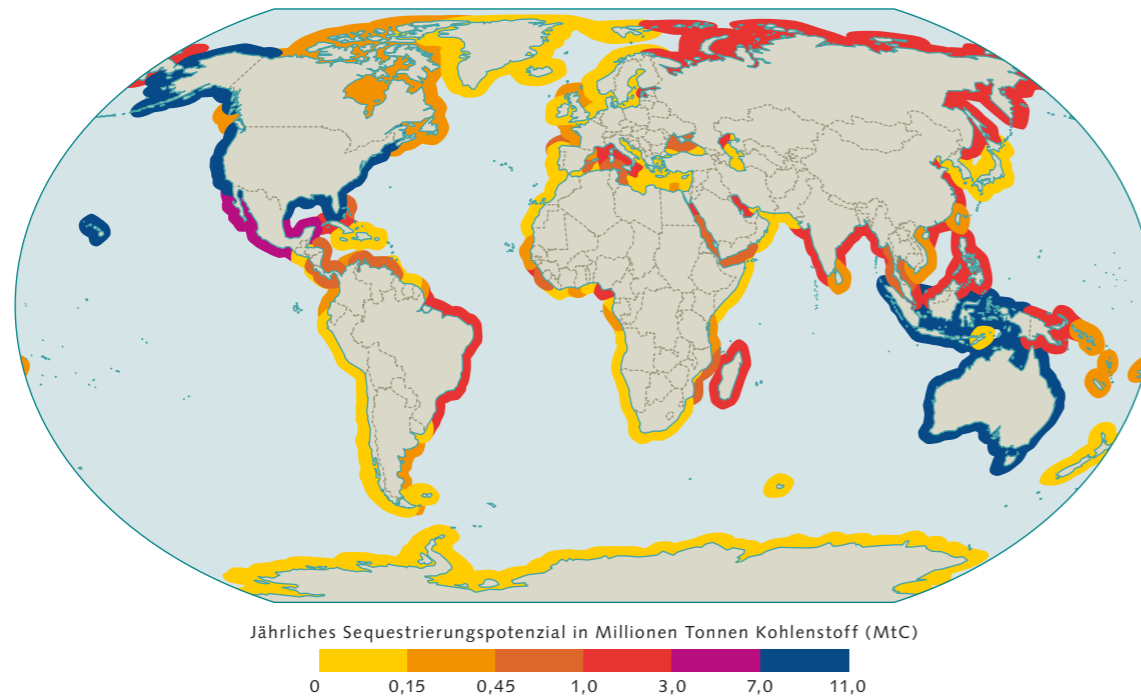
welches sich die Pflanzengemeinschaften selbst bauen, langsam in die Höhe. Mangroven und Seegraswiesen beispielsweise gewinnen im globalen Durchschnitt pro Jahr zwei bis fünf Millimeter an Höhe hinzu und können so auch die Folgen steigender Meeresspiegel abpuffern, allerdings nur so lange, wie die Ökosysteme schneller Material anhäufen, als die Pegel steigen.

Es wird jedoch nicht nur lokales Pflanzenmaterial eingelagert, sondern auch Pflanzenreste, die von Land eingetragen oder aus anderen Meeresgebieten angeschwemmt

5.2 > Während Mangroven vor allem in den Tropen und Subtropen vorkommen, bevorzugen Salzmarschen und Tangwälder kühlere Regionen. Seegraswiesen hingegen sind sowohl in niedrigen als auch in höheren Breiten zu finden.

Globales Kohlenstoffspeicherungspotenzial vegetationsreicher Küstenökosysteme

5.3 > Mangroven, Salzmarschen und Seegraswiesen nehmen Kohlendioxid aus der Luft auf, binden den enthaltenen Kohlenstoff und lagern ihn in ihrer Biomasse sowie im Untergrund ein. Diese Karte zeigt für alle Küstenstaaten, wie viel Kohlenstoff pro Jahr die drei Ökosysteme im Durchschnitt einlagern könnten, vorausgesetzt, sie sind gesund.



werden. Sobald das organische Material im Untergrund eingeschlossen ist, wird es konserviert, denn das Küstensediment ist sauerstoffarm und salzhaltig. Mikroben im Meeresboden fehlt somit der Sauerstoff, um die eingelagerte Biomasse zeitnah zu zersetzen.

Sowohl die Einlagerung von Kohlenstoff im Wurzelwerk als auch das luftdichte Einschließen von Tier- und Pflanzenresten führen dazu, dass die Salzmarschen, Mangrovenwälder und Seegraswiesen mit der Zeit immer mehr organisches Material unter sich anhäufen. In einigen Mangrovenwäldern besteht die obere Schicht des Meeresbodens zu 95 bis 98 Prozent aus kohlenstoffhaltigem Material.

Diese unterirdischen Kohlenstofflagerstätten sind unter Umständen mehr als zehn Meter dick und wachsen, solange die Ökosysteme darüber gedeihen. Im Idealfall bleiben sie über viele Jahrhunderte, mitunter sogar Jahrtausende erhalten. Salzmarschen, Mangrovenwälder und Seegraswiesen sind zudem um ein Vielfaches effizienter in der Aufnahme und unterirdischen Speicherung von Kohlenstoff als Wälder an Land. Im Vergleich zu tropischen Regenwäldern beispielsweise lagern sie pro Fläche

und je nach Standort mitunter die fünf- bis 30-fache Menge Kohlenstoff im Untergrund ein.

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

Wie groß und langlebig sind die Kohlenstofflagerstätten?

Derzeit entnehmen die vegetationsreichen Küstenökosysteme der Atmosphäre und dem Meer schätzungsweise 85 bis 250 Millionen Tonnen Kohlenstoff pro Jahr. Die Spannweite dieser Schätzung ist unter anderem deshalb so groß, weil viele Prozesse und Wechselwirkungen innerhalb der sehr komplexen Pflanzengemeinschaften und ihrer Ökosysteme noch gar nicht richtig verstanden sind. Eine offene Forschungsfrage lautet zum Beispiel, wie viel Koh-



5.4 > Zweimal täglich werden die Salzmarschen in Northton an der Südwestküste der schottischen Atlantikinsel Lewis and Harris von der Flut über- und umspült. Die artenreichen Wiesen wachsen in geschützten Küstenbereichen, wo die Gezeiten Sandbänke bilden, auf denen die Pflanzen dann siedeln können.

lendioxid Mangroven- und Tangwälder, Salzmarschen und Seegraswiesen in verschiedenen Regionen der Erde aufnehmen und in Form organischen Kohlenstoffs einlagern und welchen Anteil sie im Verlauf ihres Lebenszyklus wieder freisetzen.

Kohlendioxid emittieren die Meereswiesen und -wälder im Zuge ihrer pflanzlichen Atmung oder wenn Seekühe, Seeigel und die vielen anderen Meeresbewohner das Pflanzenmaterial fressen und im Zuge ihres Stoffwechsels in Energie und Kohlendioxid umwandeln. Zersetzen dagegen Mikroben das im Küstensediment eingelagerte organische Material, entstehen Kohlendioxid sowie unter bestimmten Voraussetzungen auch Methan und Lachgas. Welche Mengen dieser beiden klimaschädlichen Gase unter welchen Bedingungen aus Küstenökosystemen freigesetzt werden, ist noch nicht gut verstanden. Fest steht jedoch Folgendes: Wo Kohlendioxid, Methan und Lachgas aus dem Küstensediment entweichen, schrumpfen die unterirdischen Kohlenstofflagerstätten der Küstenökosysteme und der Klimawandel wird vorangetrieben.

Aus diesem Grund ist es essenziell zu verstehen, für wie lange die vegetationsreichen Küstenökosysteme den von ihnen aufgenommenen Kohlenstoff wegschließen. Forschende wissen, dass die Dauer der Kohlenstoffspeicherung vom Speicherort abhängt. Kohlenstoff, den die Pflanzen als Teil ihrer oberirdischen Biomasse in Blätter, Halme, Zweige oder Äste einlagern, ist der Atmosphäre für Wochen bis Jahrzehnte entzogen. Im Gegensatz dazu können die unterirdischen, oftmals luftdicht abgeschlossenen Kohlenstofflager viele Jahrhunderte oder gar Jahrtausende überstehen, wenn die sie schützende Vegetation erhalten bleibt. In der spanischen Portlligat-Bucht beispielsweise wachsen Seegraswiesen, deren Kohlenstoffspeicher über 6000 Jahre alt sind.

Kohlenstoffsenke, Küstenschutz, Kinderstube: Die vielen Leistungen der Küstenökosysteme

Fachleute bezeichnen den durch Seegraswiesen, Salzmarschen, Mangroven- und Tangwälder gebundenen Kohlenstoff auch als „blauen Kohlenstoff“ (Blue Carbon). Von

5.5 > Um die Verteilung von Seegraswiesen vor der Küste der Bahamas genau zu erfassen, statteten Wissenschaftler Tigerhaie mit winzigen Sensoren und Kameras aus. Die Haie jagen in und über den Wiesen. Die von ihnen erhobenen Daten halfen herauszufinden, dass vor den Bahamas die größten Seegraswiesen der Welt wachsen – mit einer Gesamtfläche von 66 900 Quadratkilometern und damit rund 75-mal so groß wie Berlin.



gesunden vegetationsreichen Küstenökosystemen aber profitiert der Mensch nicht nur allein deswegen, weil sie der Atmosphäre und dem Meer Kohlendioxid entnehmen. Als sogenannte Ökosystem-Ingenieure bilden sie einen dreidimensional strukturierten Lebensraum, in dem zahlreiche andere Tier- und Pflanzenarten des Meeres und Küstenraumes ausreichend Schutz und Nahrung finden. Berichten zufolge bieten zum Beispiel 4000 Quadratmeter Seegraswiese Rückzugsorte und Nahrung für etwa 40 000 Fische und rund 50 Millionen wirbellose Tiere wie Hummer, Muscheln und Garnelen. In ihrem Halmendickicht wächst zudem der Nachwuchs beliebter Speisefische heran, darunter Arten wie der Pazifische Hering und der Atlantische Kabeljau.

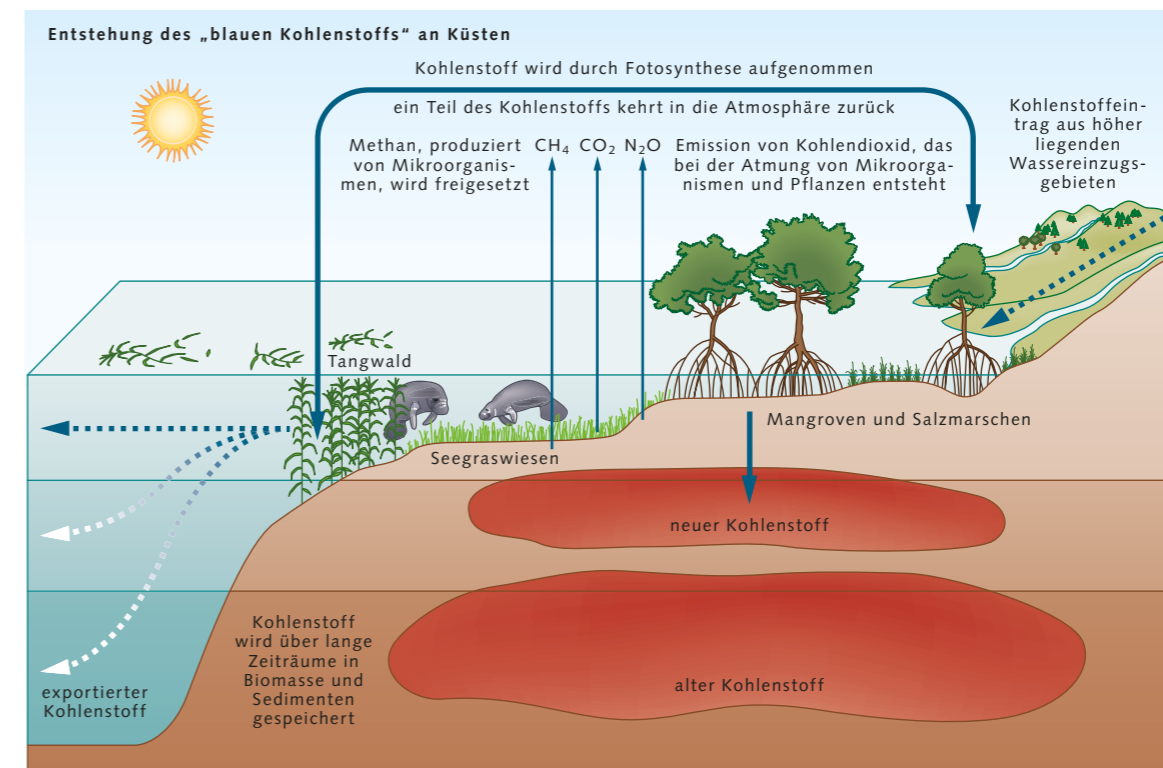
Doch damit nicht genug: Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder produzieren Sauerstoff. Sie filtern Krankheitserreger, Schweb-, Schmutz- und Schadstoffe aus dem Wasser, bremsen Meeresströmungen, Wellen und Sturmfluten aus und schützen die Küsten so vor Erosion und durch die Anhäufung von Sediment vor steigenden Meeresspiegeln. Gleichzeitig liefern sie ver-

lässlich Nahrung (Fisch, Muscheln, Krebse), tragen zur Erholung und Gesundheit der Menschen bei und ziehen vielerorts Touristen an, wodurch zusätzliche Arbeitsplätze und Einnahmequellen für die Küstenbevölkerung entstehen. Zudem haben sie in vielen Regionen der Erde eine spirituelle oder mythologische Bedeutung.

Durch diese Vielzahl an Leistungen helfen gesunde vegetationsreiche Küstenökosysteme den Küstenbewohnern, sich bestmöglich an den Klimawandel anzupassen. Fachleute bezeichnen Maßnahmen zum Schutz existierender Meereswiesen und -wälder sowie zur Wiederherstellung zerstörter Küstenökosysteme deshalb auch als Lösung mit doppeltem Gewinn (win-win solution). Sie helfen sowohl den Klimawandel zu mindern, als auch die Klimafolgen zu minimieren.

Das Sterben der Küstenökosysteme

Trotz ihrer wichtigen Ökosystemleistungen schrumpft die Fläche vegetationsreicher Küstenökosysteme weltweit. Verantwortlich ist abermals der Mensch. Infolge



5.6 > Wie viel Kohlenstoff Küstenökosysteme langfristig im Untergrund einlagern, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen der Materialeintrag von Land oder aus anderen Meeresregionen sowie die Menge an Biomasse, die von Tieren gefressen oder von Mikroorganismen zersetzt wird.

5.7 > Seegraswiesen sind Hotspots der Artenvielfalt und bieten Schutz, Nahrung und Lebensraum für unzählige Meeresbewohner, darunter Große Fetzenfische aus der Familie der Seenadeln, Seesterne und Räuber wie das amerikanische Spitzkrokodil.



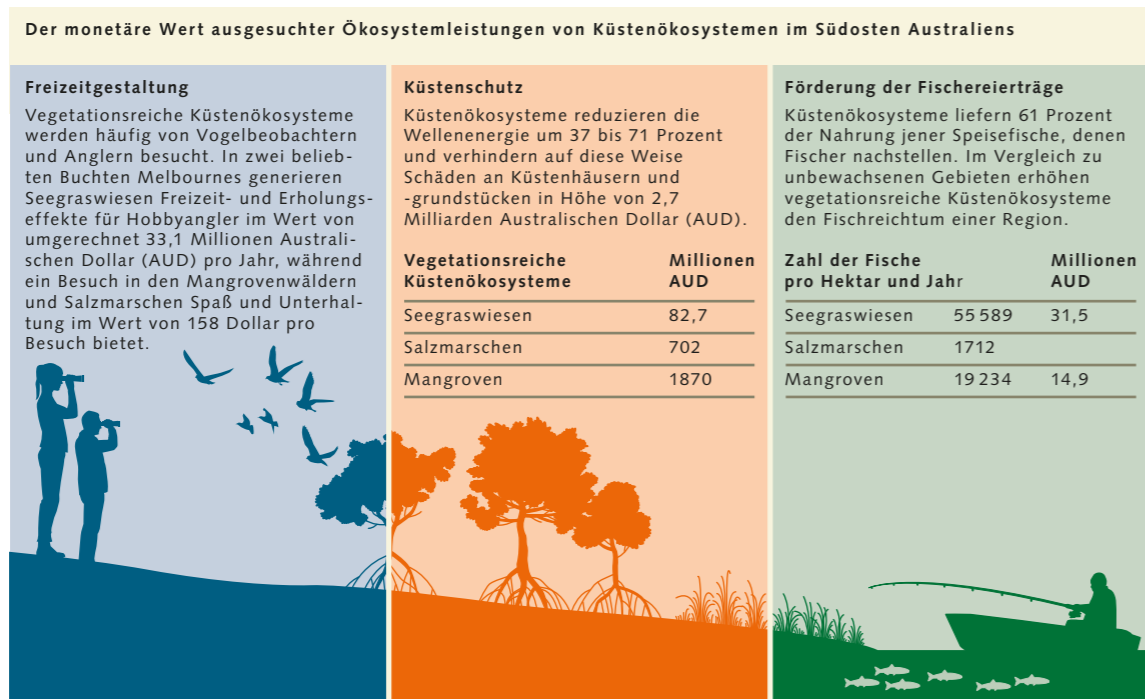
von Klimawandel, Küstenentwicklung und -verbau, Land- und Aquakulturwirtschaft, Meeresverschmutzung, Überfischung und anderweitiger intensiver Nutzung sind in den zurückliegenden 100 Jahren bis zu 50 Prozent aller Salzmarschen, etwa ein Drittel aller Seegraswiesen sowie etwa 35 bis 50 Prozent der Mangrovenwälder verloren gegangen. Von den weltweiten Tangwäldern verzeichnen rund 40 bis 60 Prozent sehr klare Flächenverluste.

Als Forschende vor Kurzem Satellitenaufnahmen vegetationsreicher Küstenökosysteme aus den Jahren 1999 bis 2019 auswerteten, erkannten sie, dass in den zwei Jahrzehnten Salzmarschen, Wattflächen und Mangrovenwälder auf einer Gesamtfläche von 13 700 Quadratkilometern verloren gegangen sind. Im gleichen Zeitraum

entstanden jedoch auf einer Fläche von 9700 Quadratkilometern auch neue Küstenökosysteme – entweder, weil sie sich auf natürliche Weise angesiedelt hatten, oder aber, weil Menschen Neuanpflanzungen vornahmen. Die Verluste aber konnten dadurch nicht ausgeglichen werden. Am Ende schrumpfte die globale Ausdehnung der untersuchten Küstenökosysteme um 4000 Quadratkilometer – eine Fläche so groß wie die spanische Mittelmeerinsel Mallorca.

Wo die Ökosysteme verschwinden, zerfallen auch ihre Kohlenstofflagerstätten weitestgehend. Ein Beispiel: Durch das Abholzen von Mangrovenwäldern gingen im Zeitraum von 2000 bis 2015 weltweit 30 bis 120 Millionen Tonnen eingelagerter Kohlenstoff verloren – das heißt, im nicht mehr durch die Vegetation geschützten

5.8 > Der Mensch profitiert auf vielfache Weise von den Ökosystemleistungen vegetationsreicher Küstenökosysteme. Diese Übersicht fasst zusammen, welchen monetären Mehrwert Mangroven, Salzmarschen, Seegraswiesen und Tangwälder im Südosten Australiens für eine Küstengemeinde und deren Besucher generieren.



und stabilisierten Sediment zersetzten Mikroben das im Untergrund eingelagerte Material und gaben den Kohlenstoff in Form von Treibhausgasen wieder an die Atmosphäre ab. In Kohlendioxid umgerechnet (Kohlenstoffmenge mal 3,664) ergäbe diese Menge Treibhausgasemissionen in Höhe von 110 bis 450 Millionen Tonnen Kohlendioxid. Zum Vergleich: Die Bundesrepublik Deutschland emittierte im Jahr 2022 Treibhausgase mit dem Erwärmungspotenzial von 746 Millionen Tonnen Kohlendioxid.

Strategien zur Steigerung der Kohlendioxid-Entnahme durch die Wälder und Wiesen des Meeres

Es gibt allerdings auch gute Nachrichten: Geschädigte oder verloren gegangene Mangrovenwälder und Salzmarschen lassen sich wiederherstellen, wie vorbildhafte Restaurationsprojekte belegen. Seegraswiesen neu anzulegen, ist hingegen noch sehr aufwendig und weitaus seltener von Erfolg gekrönt. Hier besteht noch viel Forschungs- und Entwicklungsbedarf, ebenso wie zur Wiederherstellung von Tangwäldern. Nichtsdestotrotz hoffen Forschende, die Kohlendioxidaufnahme und Kohlenstoffeinlagerung der Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder langfristig durch drei Maßnahmenpakete zu erhöhen. Diese eint, dass sie alle drei das Wachstum der Pflanzengemeinschaften fördern und somit deren Fähigkeit, Fotosynthese zu betreiben, Kohlenstoff zu binden und diesen langfristig im Meeresboden einzulagern.

Zu diesen Maßnahmen zählen:

- *der Schutz und verbesserte Umgang mit bestehenden vegetationsreichen Küstenökosystemen:* Wo Flüsse uneingeschränkt Richtung Meer fließen können, ihr Wasser nicht mehr durch Dünger und andere Nähr- oder Schadstoffe verschmutzt wird und Dämme sie nicht daran hindern, Sand und andere Sedimente in die Küstengewässer einzutragen, finden Mangroven und Seegräser deutlich bessere Lebensbedingungen vor als in Küstenregionen, in denen diese Voraussetzungen nicht gegeben sind. Benötigt werden außer-

Noch stärker unter Druck: Wie der Klimawandel die Risiken für Küstenökosysteme multipliziert

Der Klimawandel stellt eine große Bedrohung für die Küstenökosysteme dar. Infolge der steigenden Luft- und Wassertemperaturen verlagern Pflanzen und Tiere ihren Lebensraum polwärts; Hitzestress erhöht ihre Anfälligkeit für Krankheiten. Infolge steigender Meeresspiegel werden einstige Gezeitenbereiche dauerhaft überflutet und gehen als Habitat verloren; Ozeanversauerung und Sauerstoffarmut erschweren das Überleben unter Wasser zusätzlich.

Enormen Schaden richten vielerorts zudem Extremereignisse wie schwere Stürme und Meereshitzewellen an. Wind und Wellen können Mangroven entwurzeln, Seegräser aus dem Meeresboden reißen und spülen mitunter Salzmarschen und Großalgenwälder davon. Meereshitzewellen hingegen setzen vor allem Tangwäldern und Seegraswiesen zu und haben nach Aussage des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat) in den zurückliegenden Jahren in verschiedenen Regionen der Welt zum großflächigen Absterben der lokalen Pflanzengemeinschaften geführt.

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

Es stellt sich daher berechtigterweise die Frage, in welchen Regionen der Welt vegetationsreiche Küstenökosysteme künftig überhaupt noch überleben und somit eventuell in der Lage sein werden, durch ihre Aufnahme von Kohlendioxid zur Minderung des Klimawandels beizutragen, und wo Investitionen in ihren Schutz und gegebenenfalls in ihren großflächigen Ausbau sinnvoll und zukunftssträftig wären.

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



5.9 > Am südlichen Zipfel der Meeresbucht von San Francisco arbeiten Forschende und Umweltschützer Hand in Hand, um auf einer Fläche von mehr als 60 Quadratkilometern Salzwiesen wiederherzustellen, die im Zuge des Goldrausches und der industriellen Entwicklung zerstört worden sind. Erste Erfolge können sich sehen lassen, wie dieser Vergleich von Satellitenaufnahmen aus den Jahren 2002 und 2015 zeigt.

dem intakte Nahrungsnetze, sodass zum Beispiel genügend Räuber vorhanden sind, welche die Zahl der potenziellen Schädlinge gering halten;

- *die Wiederherstellung von Meereswiesen und -wäldern, die durch menschliche Eingriffe verloren gegangen sind:* Dazu gehören zum Beispiel das Wiederanpflanzen von Mangrovenwäldern und Seegraswiesen sowie das Abtragen von Deichen, sodass auf den neu entstehenden Gezeitenflächen wieder Salzmarschen angelegt werden können;
- *die Erweiterung bestehender Ökosysteme:* Dazu müssten Mangrovenwälder, Seegraswiesen, Tangwälder und Salzmarschen auch in Gebieten neu angelegt werden, in denen sie bislang auf natürliche Weise nicht vorkommen und auch in der Vergangenheit möglicherweise nie vorgekommen sind. Außerdem müssten Pflanzenarten ausgewählt und zusammengestellt werden, die als Artengemeinschaft die gewünschten Ökosystemleistungen am effizientesten erfüllen würden.

Fachleute bezeichnen den Ansatz, Ökosysteme zu erweitern oder neu anzulegen, auch als Ökosystemdesign. Mit ihm, so die Annahme, ließen sich drei Ziele gleichzeitig erreichen:

- Die Kohlendioxidaufnahme vegetationsreicher Küstenökosysteme könnte gesteigert und ein Teil der vom Menschen verursachten Kohlendioxid-Restemissionen so ausgeglichen werden.
- Die Artenvielfalt in den Küstengewässern könnte bei richtiger Herangehensweise gesteigert werden.
- Mensch und Natur hätten aufgrund der vielen zusätzlichen Ökosystemleistungen der Küstenökosysteme (Nahrung, Wasserqualität, Küstenschutz etc.) deutlich bessere Möglichkeiten, sich an den Klimawandel anzupassen und seinen Gefahren zu trotzen.

Allerdings würde eine Ausweitung vegetationsreicher Küstenökosysteme stets zulasten anderer benachbarter lokaler Ökosysteme gehen, so zum Beispiel zulasten von Sandstränden und Wattflächen, wenn diese mit Mangroven bepflanzt oder aber in Salzmarschen umgewandelt werden.

Eine Erweiterung brächte zudem Einschnitte für das Leben der Küstenbevölkerung mit sich, gerade weil der Mensch rund um den Erdball Küstengebiete intensiv nutzt und in vielen besiedelten Regionen nur wenig freie Flächen zur Verfügung stehen.

Denkbar wäre an deutschen Küsten zum Beispiel, dass Deiche zurückgebaut und die dahinterliegenden Weideflächen aufgegeben werden müssten, um mehr Platz für Salzmarschen zu schaffen. Meeresbuchten, in denen Seegraswiesen neu angepflanzt werden, müssten sowohl für die Grundnetz Fischerei als auch vielleicht für den Bootsverkehr gesperrt werden – zumindest zeitweise. Um neue Tangwälder entlang der Nordseeküste anzusiedeln, müssten viele Tonnen Felsgestein in das Meer verbracht werden, denn Braunalgen wachsen nur auf steinigem Untergrund.

Bisherige Erfahrungen mit Restaurationsprojekten belegen: Maßnahmen zum Natur- und Klimaschutz lassen sich nur gemeinsam erfolgreich umsetzen, wenn die Interessen der lokalen Bevölkerung von Anfang an mit berücksichtigt werden, diese in alle Entscheidungsprozesse eingebunden ist, mit eigenem Wissen und Expertise beitragen kann und im besonderen Maße von den Schutzmaßnahmen profitiert.

Nützliches Werkzeug zur Minderung des Klimawandels?

Investitionen in den Schutz, die Wiederherstellung und die Erweiterung der Meereswiesen und -wälder zahlen sich klimapolitisch nur dann aus, wenn sie tatsächlich zu einer zusätzlichen Kohlenstoffaufnahme und langfristigen -einlagerung im Meeresboden führen. Dieser Effekt muss messbar sein und konkreten Maßnahmen zugeschrieben werden können. Andernfalls wird es schwierig, die Verantwortlichen für ihre Maßnahmen zu entlohnen – etwa, indem sie Zertifikate auf die zusätzlich aufgenommene Menge Kohlendioxid ausstellen und mit diesen handeln dürfen.

Außerdem muss sichergestellt werden, dass der zusätzlich eingelagerte Kohlenstoff dauerhaft im Meeresboden verbleibt und nicht nach wenigen Jahren von Mikroorganismen zersetzt und abgebaut wird. Als „dauerhaft eingelagert“ bezeichnen Klimafachleute Kohlenstoff,

welcher der Atmosphäre für mindestens 25 Jahre, bestenfalls mehrere Hundert Jahre lang sicher entzogen wird. Ob vegetationsreiche Küstenökosysteme dazu in der Lage sind, wird der Mensch mit ausgeklügelten Beobachtungssystemen überwachen müssen – und zwar über ebenso lange Zeiträume.

Bereits heute weiß man, dass nach der Wiederherstellung oder Neuanpflanzung einer Seegraswiese oder eines Mangrovenwaldes mindestens zehn bis 20 Jahre vergehen, bis das neue Ökosystem genauso viel Kohlenstoff aufnimmt und einlagert wie gesunde, angestammte Meereswiesen und -wälder. Das bedeutet für jedes neu angelegte vegetationsreiche Küstenökosystem, dass die Verantwortlichen erst nach ein bis zwei Jahrzehnten überprüfen können, ob die Entnahmeleistung dieses neuen oder erweiterten Ökosystems tatsächlich so hoch ist wie beim Projektstart erhofft.

Abgesehen von diesen Herausforderungen listen Fachleute sieben weitere schwerwiegende Argumente auf, die eine realistische Einordnung und solide Bewertung von Kohlendioxid-Entnahmeverfahren, basierend auf der Wiederherstellung, Neuanlage oder Erweiterung vegetationsreicher Küstenökosysteme, bislang erschweren. Zu diesen zählen:

1. enorme regionale Unterschiede in der Kohlenstoffaufnahme und -einlagerung einzelner Ökosysteme,
2. fehlende Standards bei der Messung der Kohlenstoffeinlagerung,
3. offene Fragen zur Herkunft des eingelagerten organischen Materials,
4. fehlendes Wissen zur Produktion und Freisetzung von Methan und Lachgas,
5. Unsicherheiten darüber, wie viel Kohlendioxid freigesetzt oder aber gebunden wird, wenn die kalkbildenden Bewohner der Küstenökosysteme ihre Kalkschalen und Skelette aufbauen oder diese sich wieder auflösen,
6. fehlendes Detailwissen über die künftigen Auswirkungen des Klimawandels und anderer vom Menschen verursachter Stressfaktoren auf die Meereswiesen und -wälder sowie
7. offene Fragen zu den Kosten und der Skalierbarkeit potenzieller Wiederherstellungs- und Erweiterungsmaßnahmen.

Große regionale Unterschiede in der Kohlenstoffeinlagerung

Die Kohlenstoffaufnahme und -einlagerung der Meereswiesen und -wälder wird von verschiedenen biologischen, chemischen und physikalischen Umweltfaktoren beeinflusst. Diese wirken nicht nur auf die Fotosyntheseleistung der Pflanzengemeinschaften vor Ort, sondern bestimmen auch, in welchen Mengen organisches Material jeweils gefiltert, abgelagert, zersetzt oder aber dauerhaft im Küstensediment eingeschlossen wird.

Aus dieser Abhängigkeit von den lokalen Umweltbedingungen resultieren große Unterschiede in der Kohlenstoffmenge, welche die einzelnen Meereswiesen und -wälder tatsächlich aufnehmen und einlagern. Fachleute sprechen an dieser Stelle von einer hohen Variabilität der Kohlenstoffspeicherung. So gibt es zum Beispiel sehr produktive Salzwiesen, die bis zu 600-mal mehr Kohlenstoff einlagern als wenig produktive Salzwiesen. Bei Seegräsern betragen die Unterschiede mitunter das 76-Fache, bei Mangroven das 19-Fache.

Auf Basis dieses Wissens schlussfolgern Fachleute, dass eine Wiederherstellung oder Erweiterung vegetationsreicher Küstenökosysteme zum Zwecke einer verstärkten Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre nur an jenen Standorten sinnvoll und zielführend sein wird, an denen die Voraussetzungen für hohe Einlagerungsraten gegeben sind oder aber durch gezielte Eingriffe des Menschen hergestellt werden können. Dazu aber braucht es detaillierte Datensätze über die Kohlenstoffeinlagerungsraten aller Meereswiesen und -wälder. Entsprechende Messungen haben bisher allerdings nur an wenigen ausgewählten Standorten stattgefunden.

Fehlende Standards bei der Messung der Kohlenstoffeinlagerung

Die Aufnahme und Einlagerung von Kohlenstoff direkt zu messen, ist sowohl an Land als auch in Küstenregionen schwierig, langwierig und technisch aufwendig. Aus diesem Grund wurden die meisten Angaben zur Kohlenstoffeinlagerung vegetationsreicher Küstenökosysteme bislang durch indirekte Messungen erhoben. Das heißt, Forschende nahmen Proben aus dem Küstensediment – meist bis in eine Tiefe von einem Meter –, untersuchten deren Kohlenstoffgehalt und berechneten dann mithilfe ver-

schiedener Parameter wie Strömungsgeschwindigkeit und Sedimentationsrate die durchschnittliche Kohlenstoffeinlagerung.

Die Fehlerquote dieser indirekten Methoden kann aus verschiedenen Gründen jedoch sehr hoch sein. Ein Beispiel: Wird in einem Fluss mit großen Mangrovenwäldern in seinem Delta eines Tages ein Staudamm errichtet, reduzieren sich die Fließgeschwindigkeit und die Sedimentlast des Wassers. Für die Mangroven im Flussdelta bedeutet diese Veränderung, dass ihnen fortan deutlich weniger Material für den Einschluss von Tier- und Pflanzenresten im Meeresboden zur Verfügung steht. Die Wälder wachsen demzufolge langsamer in die Höhe. Gleichzeitig sagt die Gesamtgröße ihrer Kohlenstofflagerstätte mit der Zeit immer weniger über ihre aktuelle Kohlenstoff-Einlagerungsrate aus – es sei denn, die entsprechenden Messungen werden mit Methoden durchgeführt, die noch nicht weltweit als Standard etabliert sind.

Dieselbe Aussage gilt für Küstenfeuchtgebiete, in denen der Mensch beginnt, Ackerbau zu betreiben, oder aber wenn sich infolge von Klimawandel oder menschlicher Nutzung die Wassermenge oder -qualität in Flussdeltas und Küstengewässern verändert. Eine ebenfalls zu berücksichtigende Größe ist die sogenannte Bioturbation, also das Maß, in dem auf oder im Boden lebende Organismen den Untergrund und damit die Kohlenstofflagerstätten durchwühlen. Je größer die Bioturbation ist, um so eher kann das eingeschlossene organische Material zersetzt und abgebaut werden. Zudem fällt es Fachleuten bei großer Bioturbation schwerer, die Sedimentablagerungsrate zu bestimmen. Lassen Forschende die Bioturbation bei ihren Berechnungen außen vor, kann die Kohlenstoff-Einlagerungsrate zu 50 bis 100 Prozent überschätzt werden. Eine Unterschätzung ist ebenfalls möglich. Kohlenstoff-Einlagerungsdaten aus Bodenproben sollten deshalb immer mit besonderer Zurückhaltung interpretiert werden, sagen Fachleute.

Die Frage nach der Herkunft des eingelagerten organischen Materials

Um eines Tages bestimmen zu können, welche Menge Kohlenstoff infolge einer einzelnen Blue-Carbon-Maßnahme zusätzlich entnommen und im Untergrund ein-



gelagert wurde, muss man wissen, woher das organische Material stammt, welches im Küstensediment eingeschlossen wurde. Wurde es von der Seegraswiese oder Salzmarsch vor Ort produziert oder durch Wind und Meeresströmungen aus der Ferne herantransportiert? Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass der Anteil des aus der Ferne eingetragenen Materials hoch sein kann. In Mangrovenwäldern Vietnams beispielsweise betrug er 24 bis 55 Prozent des im Untergrund eingelagerten Kohlenstoffs. Im Falle australischer Seegraswiesen waren es sogar 70 bis 90 Prozent. Wenn so viel Material von außen eingetragen wird, so argumentieren einige Fachleute, bestehe die Gefahr, dass das Kohlendioxid-Entnahmepotenzial der lokalen Küstenökosysteme überschätzt werde. Schließlich wurde der Kohlenstoff anderswo der Atmosphäre entnommen und in Form organischen Materials gebunden. Zugegebenermaßen ist dieses Zuschreibungs-

5.10 > Seegraswiesen wiederherzustellen ist aufwendig und oftmals teuer, weil die Gräser von Hand verpflanzt werden müssen. Bei einem Restaurationsprojekt an der Atlantikküste des US-Bundesstaates Virginia nutzen die Organisatoren Wäschekörbe, um die Seegrassetzlinge vom Zuchtbecken an ihren künftigen Standort zu transportieren.

detail eher ein statistisches Problem, welches keine Rolle spielt, wenn es darum geht, wie viel organisches Material eingelagert wird. Relevant wird es erst, wenn eines Tages diskutiert wird, wer sich die Kohlenstoff-Entnahme gut-schreiben lassen kann.

Die Produktion und Freisetzung von Methan und Lachgas
Werden Tier- und Pflanzenreste luftdicht im Küstensediment eingeschlossen, entstehen bei einer mikrobiellen Zersetzung dieses organischen Materials die klimaschädlichen Treibhausgase Methan (CH₄) und Lachgas (Distickstoffmonoxid, N₂O). Schätzungen zufolge emittieren die vegetationsreichen Küstenökosysteme der Welt zusammen mehr als fünf Millionen Tonnen Methan pro Jahr. Entspräche diese Menge der Wahrheit, würde sie ausreichen, um den positiven Klimaeffekt der Meereswiesen und -wälder infolge der Kohlenstoffaufnahme und -einlagerung aufzuheben.

Ob die Küstenökosysteme aber tatsächlich so viel Methan emittieren, kann bislang noch niemand sagen, weil wichtiges Grundlagenwissen zu den Abbau- und Freisetzungprozessen im Küstensediment der Meereswiesen und -wälder fehlt. Entsprechende Studien werden derzeit in verschiedenen Forschungsprojekten durchgeführt. Für Entscheidungen über einen möglichen Einsatz dieser meeresbasierten CDR-Verfahren ist es nämlich unabdingbar zu verstehen, ob und – wenn ja – wie sich durch die Wiederherstellung oder Erweiterung vegetationsreicher Küstenökosysteme deren Methan- und Lachgasemissionen verändern. Sollte es eines Tages tatsächlich zu entsprechenden Maßnahmen kommen, müssten zudem engmaschige Beobachtungsnetzwerke aufgebaut werden, um die Emissionsbilanz der neu angelegten oder aber erweiterten Meereswiesen und -wälder flächendeckend zu überwachen.

Emissionsbilanz der Kalkbildung und -auflösung in vegetationsreichen Küstenökosystemen

Wenn kalkbildende Organismen wie Korallen, Kalkalgen, Kammerlinge (Foraminiferen), Muscheln und Flügelschnecken ihre Skelette und Schalen aus Kalziumkarbonat (Kalk, CaCO₃) bilden, entsteht bei der entsprechenden chemischen Reaktion Kohlendioxid, welches im Wasser gelöst wird. Diese Freisetzung führt dazu, dass

die Kohlendioxidkonzentration im Wasser steigt und das Treibhausgas in die Atmosphäre entweichen kann, wenn das Wasser eines Tages zur Meeresoberfläche aufsteigt. Der umgekehrte Effekt wird erzielt, wenn Kalk sich im Meerwasser löst. Im Zuge der entsprechenden Reaktion werden jene chemischen Lösungsprodukte freigesetzt, die benötigt werden, um im Wasser gelöstes Kohlendioxid chemisch zu binden. Das heißt, die Kohlendioxidkonzentration im Wasser sinkt und der Ozean kann neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen.

Vegetationsreiche Küstenökosysteme sind Lebensraum für viele kalkbildende Organismen. Aktuell aber diskutiert die Wissenschaft noch darüber, wie sich deren Kalkbildung (Kohlendioxid-Freisetzung) sowie mögliche Auflösungsprozesse der Kalkschalen und -skelette (Kohlendioxid-Bindung) auf die Kohlenstoff-Gesamtbilanz der Küstenökosysteme auswirken und welche Folgen für das Klima gegebenenfalls daraus resultieren. Messungen vor der Küste des US-Bundesstaates Florida beispielsweise haben ergeben, dass die Meeresorganismen in einer der größten Seegrasswiesen der Welt im Untersuchungszeitraum mehr Kalk bildeten, als sich durch chemische Reaktionen wieder auflöste. Als Ergebnis setzte das Küstenökosystem schätzungsweise dreimal mehr Kohlendioxid frei, als es der Atmosphäre allein durch die Einlagerung der Schalen- und Skelettreste im Küstensediment entziehen konnte.

Ungewisse Folgen des Klimawandels für die Meereswiesen und -wälder

Nach Angaben des Weltklimarates haben klimabedingte Veränderungen wie steigende Temperaturen, zunehmende und intensivere Meereshitzwellen, Ozeanversauerung, Stürme und der Anstieg der Meeresspiegel überwiegend schädliche Auswirkungen auf Küstenökosysteme und gefährden deren Fortbestand als Kohlenstofflagerstätte und Lieferant zahlreicher weiterer Ökosystemleistungen. Eine möglicherweise verstärkte Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre ist wahrscheinlich nur dort zu erwarten, wo sich die Meereswiesen und -wälder landeinwärts verlagern, sofern sie den Platz dafür haben, und dann gegebenenfalls größere Ökosysteme bilden als zuvor. Sollte eine großflächige Verlagerung aus Platzgründen nicht möglich sein und die Ökosysteme schrumpfen

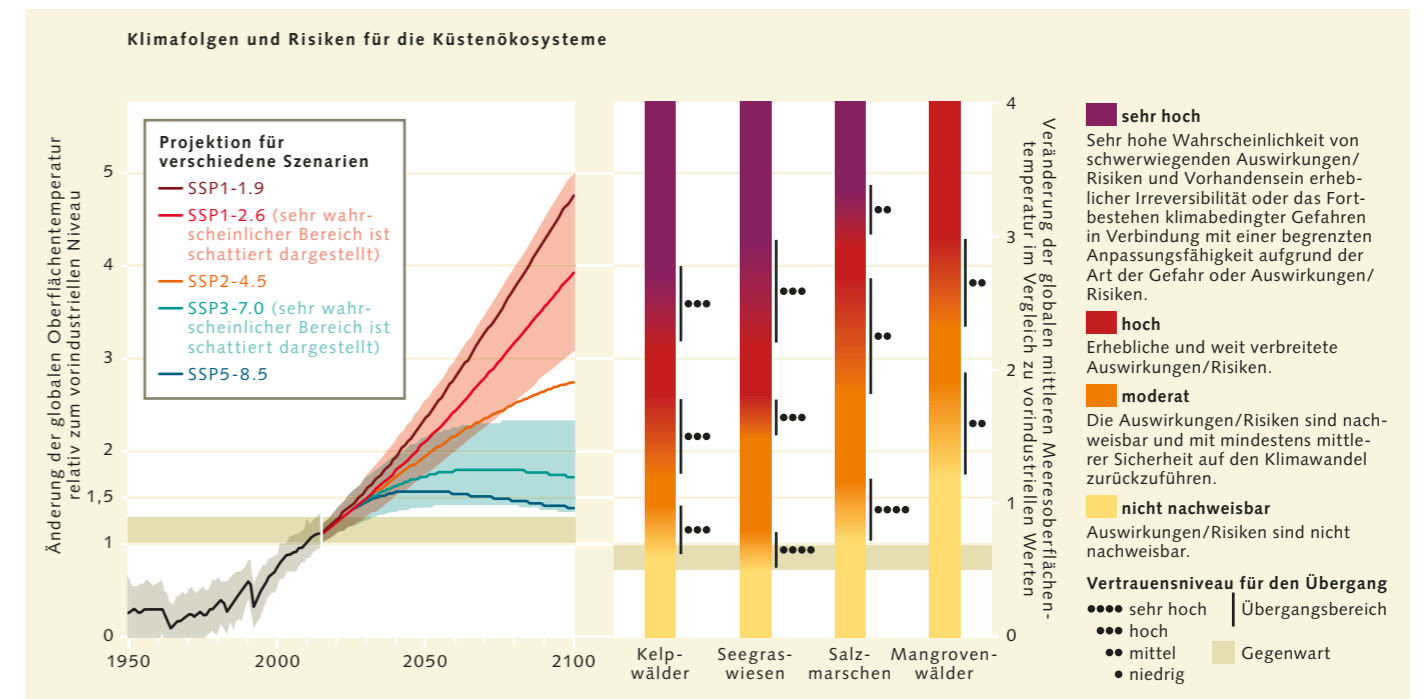
oder verschwinden, wären auch ihre Kohlenstofflagerstätten im Küstensediment in Gefahr. Schätzungen zufolge könnten schlimmstenfalls Kohlenstoffspeicher in einem Umfang von 3,4 Milliarden Tonnen Kohlenstoff bis zum Jahr 2100 verloren gehen.

Von den vier genannten vegetationsreichen Küstenökosystemen reagieren Seegrasswiesen am empfindlichsten auf steigende Temperaturen, sodass ihnen schon heute, bei einer globalen Erwärmung von 1,15 Grad Celsius, insbesondere Meereshitzwellen großen Schaden zufügen. Infolge solcher wochen- bis monatelang andauernden Temperaturextreme sind in den zurückliegenden Jahren zum Beispiel in der US-amerikanischen Chesapeake Bay, im westlichen Mittelmeer sowie in der westaustralischen Shark Bay 36 bis 80 Prozent der lokalen Seegrasswiesen eingegangen. Weil Hitzewellen mit zunehmendem Klimawandel häufiger auftreten, länger anhalten und höhere Temperaturen erreichen, werden die Klimarisiken und das Schadensausmaß in den kommenden Jahren weiter wachsen. Forschende gehen davon aus, dass viele der bislang existierenden Seegrasswiesen absterben werden, wenn die globale Oberflächentemperatur um mehr als 2,3 Grad Celsius steigt.

Die Auswirkungen des Klimawandels für Salz-marschen bewegen sich bei 1,2 Grad Celsius Erwärmung auf mittlerem Niveau; ab einer globalen Erwärmung von 3,1 Grad Celsius aber prognostizieren Fachleute auch für sie schwere Schäden – das heißt unter anderem, dass die Pflanzengemeinschaften dort aussterben, wo sie infolge des Meeresspiegelanstiegs künftig dauerhaft überflutet werden.

Für Mangroven liegen die Schwellenwerte für mittlere und schwere Auswirkungen bei zwei und 3,7 Grad Celsius globaler Erwärmung. Dennoch gibt es zum Beispiel in Australien schon heute Mangrovenwälder, denen die Klimaveränderungen zusetzen, insbesondere dann, wenn Hitzewellen, Dürren und ein kurzfristiger Rückgang des Meeresspiegels, etwa durch Strömungsveränderungen, zeitgleich auftreten. Anderswo breiten sich Mangroven seit Jahrzehnten polwärts aus und mischen sich mit Salz-marschen oder überwachsen diese. Neue Forschungsergebnisse aus den zentralen Tropen weisen zudem darauf hin, dass eine Erwärmung von bis zu zwei Grad Celsius zumindest in dieser Region zu einer verstärkten Kohlenstoffeinlagerung durch Mangroven führen dürfte.

5.11 > Die Klimarisiken für Küstenökosysteme steigen mit zunehmender globaler Erwärmung. Kelpwälder und Seegrasswiesen sind temperaturempfindlicher als Salz-marschen sowie Mangroven und daher bereits bei einem Temperaturanstieg von 1,5 bis zwei Grad Celsius moderaten bis hohen Risiken ausgesetzt.





5.12 > Mehr als 1000 Tier- und Pflanzenarten leben in den Tangwäldern rund um die Channel Islands of California, einer Inselgruppe vor der Pazifikküste des US-Bundesstaates Kalifornien. Von den weltweit 27 Tangarten wachsen allein neun in diesem Meeresgebiet, darunter auch die größte aller Braunalgen, der Riesentang (*Macrocystis pyrifera*).

Aktuelle und künftige Klimafolgen müssen bei der Wiederherstellung und Erweiterung von Küstenökosystemen von Anfang an mit berücksichtigt werden, auch wenn es Fachleuten noch sehr schwer fällt, Vorhersagen über die temperaturbedingte Artenwanderung zu machen. Daher empfehlen sie, Projekte zur Wiederherstellung oder Neuansiedlung der Meereswiesen und -wälder vor allem an den kühleren Rändern ihres aktuellen Verbreitungsgebietes durchzuführen.

Anfälligkeit für andere menschengemachte Störungen und Stressfaktoren

Selbst wenn es der Menschheit gelingen sollte, den Klimawandel auf weit unter zwei Grad Celsius zu begrenzen, wäre der Fortbestand vieler Küstenökosysteme sowie der Erfolg von Restaurations- oder Neuanpflanzungsprojekten durch vielerlei andere menschengemachte Störungen oder Stressfaktoren gefährdet. Dazu zählen vor allem Landnutzungsänderungen wie Küstenverbauungen im Zuge der Ausbreitung der Küstenstädte, das Abholzen von Mangrovenwäldern, beispielsweise für den Bau von Teichanlagen für Aquakultur, die Eindeichung und landwirtschaftliche Nutzung von Salzmarschen im Gezeitenbereich sowie die Überdüngung von Küstengewässern durch den Eintrag von Düngemitteln und Abwässern.

Ob Maßnahmen zur Wiederherstellung oder Neuanlage von Salzmarschen, Seegraswiesen, Tang- und Mangrovenwäldern erfolgreich sind, hängt zudem davon ab, ob der Standort und die eingesetzten Pflanzenarten richtig gewählt und die Rechte, Bedürfnisse und das Wissen der lokalen Bevölkerung bei der Planung und Umsetzung berücksichtigt wurden. Schließlich tragen die Menschen vor Ort die Verantwortung dafür, dass die Meereswiesen und -wälder langfristig geschützt und auf nachhaltige Weise genutzt werden. Fachleute fordern zudem ausreichend Geld, um Beobachtungssysteme zu installieren und Schutzmaßnahmen umzusetzen, sodass sichergestellt werden kann, dass die vegetationsreichen Küstenökosysteme ihre wichtige Klimafunktion auch über einen langen Zeitraum erfüllen.

Wären Erweiterungs- und Wiederherstellungsmaßnahmen wirtschaftlich sinnvoll und flächendeckend einsetzbar?

Ob sich Maßnahmen zur Erweiterung oder Wiederherstellung von Salzmarschen, Seegraswiesen, Tang- und Mangrovenwäldern wirtschaftlich lohnen, hängt davon ab, aus welcher Perspektive Fachleute die Leistungen der Küstenökosysteme bewerten. Konzentrieren sie sich einzig und allein auf die mögliche verstärkte Kohlendioxidaufnahme wiederhergestellter oder erweiterter Meereswiesen und -wälder oder berücksichtigen sie auch die vielen weiteren Leistungen, welche die Ökosysteme für den Menschen erbringen? Bei beiden Ansätzen gibt es nach Aussage von Experten zahlreiche Unsicherheiten. Zu diesen zählen zum einen der schwierige Nachweis einer tatsächlichen zusätzlichen Kohlendioxidaufnahme. Zum anderen variieren die Kosten für Neuanpflanzungen oder Erweiterungen je nach Vegetationstyp und Küstenregion enorm. Das liegt zumeist an den unterschiedlichen verwendeten Methoden; an den Löhnen für die erforderlichen Taucher, Fachleute und Hilfsarbeitenden sowie daran, ob die Kosten einer Langzeitbeobachtung des wiederhergestellten oder aber erweiterten Küstenökosystems mit einkalkuliert wurden oder nicht.

Fraglich ist zudem, welcher Anteil der vom Menschen zerstörten Meereswiesen und -wälder sich tatsächlich wiederherstellen ließe – Experten sprechen an dieser Stelle von der Skalierbarkeit der Restaurationsmaßnahmen. Große Küstenabschnitte, in denen früher Salz- marschen, Seegraswiesen oder Mangrovenwälder wuchsen, sind heutzutage bebaut, eingedeicht oder aber werden landwirtschaftlich genutzt. Das heißt, es fehlt schlichtweg der Platz für Neuanpflanzungen, wenn diese ehemaligen Flächen nicht wieder freigegeben werden können.

Gegen eine solche Freigabe spricht zum Beispiel, dass Küstenländereien mit hohem Restaurationspotenzial vielerorts von Kleinbauern genutzt werden, deren gesamtes Einkommen von genau jenen Flächen abhängt. Müssten die Bauernfamilien ihr Land aufgeben, verlören sie ihre Lebensgrundlage. Aus diesen und anderen Gründen fällt nach Auffassung einiger Experten zum Beispiel in Südostasien die Fläche, auf der sich am Ende tatsächlich Mangrovenwälder wiederherstellen oder aber neu anpflanzen ließen, in der Realität viel kleiner aus als angenommen. Ihr Anteil liegt je nach Region bei lediglich

Blue Carbon als Teil des Emissionshandels – ein schwieriges Unterfangen

Vegetationsreiche Küstenökosysteme zu schützen, sie wiederherzustellen und gegebenenfalls zu erweitern, macht immer Sinn – eben weil sie der Natur und Abermillionen Menschen auf so vielschichtige Weise dienen. Dennoch investieren bislang nur wenige Staaten und Firmen in entsprechende Projekte. Viele Initiatoren hoffen deshalb, über den Verkauf sogenannter Blue-Carbon-Emissionszertifikate neue Finanzierungsquellen für ihre Schutz- und Wiederherstellungsmaßnahmen zu erschließen. Der US-amerikanische Computerhersteller Apple beispielsweise arbeitet seit dem Jahr 2018 mit der Umweltschutzorganisation Conservation International und lokalen Küstengemeinden zusammen und investiert in die Wiederherstellung und in den Schutz eines 110 Quadratkilometer großen Mangrovenwaldes in Kolumbien. Im Gegenzug erhält das Unternehmen eine gewisse Anzahl von Emissionsgutschriften, den sogenannten Emissionszertifikaten. Diese repräsentieren eine bestimmte Menge verhinderter Emissionen oder aber vom Mangrovenwald aufgenommener Kohlendioxidmengen, mit denen Apple eine entsprechende Menge seiner schwer vermeidbaren Restemissionen kompensieren will.

Freiwillige und verpflichtende Märkte

Wenn Akteure wie Apple und Conservation International solche Vereinbarungen treffen und Emissionszertifikate ausgestellt werden, dann geschieht dies auf einer der zahlreichen Plattformen oder auch durch bilaterale Transaktionen, die dem „freiwilligen Markt“ zugeordnet werden können. Dieser Markt hat sich ohne gesetzliche Vorgaben zum Emissionsausgleich entwickelt, und die Regeln und Standards für die Kohlendioxid-Verrechnung werden von den Marktteilnehmern selbst definiert. Vereinfacht gesagt kann jeder Akteur Zertifikate ausstellen und diese verkaufen, wenn er denn einen Käufer findet, der ihm vertraut, dass die Gelder tatsächlich in den Schutz, die Wiederherstellung oder Erweiterung der Küstenökosysteme fließen und somit zusätzliches Kohlendioxid langfristig der Atmosphäre entnommen wird. Weiterverkauft werden diese Zertifikate bisher kaum. Im selben Stil funktioniert seit Jahren die Kompensation von Flugmeilen, nur dass deren Zahlungen bislang vor allem in Maßnahmen zur Emissionsvermeidung in Schwellen- und Entwicklungsländern fließen sowie in Wiederaufforstungsmaßnahmen an Land. Und wer im Supermarkt Produkte kauft, die mit dem Begriff „klimaneutral“ für sich werben, kann davon ausgehen, dass die entsprechenden Emissionskompensationen vermutlich ebenfalls über Transaktionen auf dem freiwilligen Markt erfolgt sind.

Die freiwilligen Märkte unterscheiden sich somit grundlegend von den zentral organisierten „verpflichtenden Märkten“. Zu diesen zählen

etwa der Europäische Emissionshandel (European Union Emissions Trading System, EU-ETS), in dem die Emissionen von europaweit rund 11 000 Anlagen der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie erfasst werden. Für sie wird eine bestimmte Anzahl von Emissionszertifikaten ausgegeben, welche die beteiligten Unternehmen dann untereinander handeln. Die Zahl der verfügbaren Zertifikate ist begrenzt und wird mit der Zeit immer kleiner, sodass die Firmen gezwungen sind, entweder ihre Emissionen zu reduzieren oder immer höhere Preise für jede Tonne ausgestoßener Kohlendioxid-Äquivalente zu zahlen (mehr dazu in Kapitel 9). Wichtig an dieser Stelle: Den gelisteten Unternehmen ist es nicht gestattet, Emissionszertifikate aus freiwilligen Märkten in ihrer EU-ETS-Bilanz zu verrechnen.

Regeln gegen das Greenwashing

Für freiwillige Märkte, auf denen Blue-Carbon-Zertifikate ausgegeben werden, existieren bislang keine einheitlich bindenden Vorschriften, Bilanzierungs- oder Kontrollmechanismen. Der Druck, diese einzuführen, steigt jedoch zunehmend, weil sich im digitalen Zeitalter kein Geldgeber leisten kann, in Projekte zu investieren, die am Ende gar nicht, nur unsachgemäß oder zulasten der Umwelt oder aber der lokalen Bevölkerung durchgeführt werden. Entsprechende Investitionen werden als „Greenwashing“ bezeichnet und ziehen einen hohen Imageschaden für den Investor nach sich.

Um dem vorzubeugen, entwickeln verschiedene Firmen und Fachleute derzeit Programme und Rahmenrichtlinien, welche die Ausgabe und den Handel von und mit Emissionszertifikaten auf freiwilligen Märkten transparent und nachvollziehbar gestalten sollen und sicherstellen, dass alle damit verbundenen Maßnahmen auf umwelt- und sozialverträgliche Weise umgesetzt werden. Bestenfalls, so Experten, entstünde am Ende ein Markt mit klaren Regeln und einheitlichen Messverfahren der Kohlendioxid-Entnahme, die einem Missbrauch oder Betrug vorbeugen. So viel Vorsicht ist geboten, denn der Bedarf an Emissionskompensationen steigt stetig. Schätzungen zufolge könnten auf freiwilligen Märkten im Jahr 2030 Emissionszertifikate im Wert von bis zu 50 Milliarden US-Dollar gehandelt werden.

Grundprinzipien für die Vergabe von Emissionszertifikaten

Eines der vorgeschlagenen Regelwerke enthält zehn Grundprinzipien für die Vergabe von Emissionszertifikaten. Entwickelt wurden sie von der Taskforce zur Skalierung freiwilliger Kohlenstoffmärkte. Demnach muss unter anderem sichergestellt werden, dass:

- die erzielte Emissionsvermeidung oder Kohlendioxid-Entnahme tatsächlich „zusätzlich“ erfolgt ist und ohne die jeweilige Maßnahme nicht stattgefunden hätte;
- sie zudem nicht zweifach bilanziert wird, beispielsweise sowohl vom investierenden Unternehmen als auch von der Regierung jenes Staates, in dem die Maßnahme stattfindet;
- Investoren umfassende und für Laien nachvollziehbare Informationen über ihre Emissionskompensationen veröffentlichen, einschließlich der Angaben zu den Auswirkungen der finanzierten Maßnahmen auf die Umwelt und die lokale Bevölkerung;
- die erzielte Emissionsvermeidung oder Kohlendioxid-Entnahme von langer Dauer ist;
- alle ausgegebenen Emissionszertifikate bei einer zentralen Registratur gemeldet werden, sodass sie jederzeit klar identifiziert und ihr Verbleib nachvollzogen werden kann;
- unabhängige Fachleute das Vergabesystem und seine Mechanismen regelmäßig überprüfen und mithilfe wissenschaftlicher Methoden kontrollieren, ob die versprochenen Maßnahmen tatsächlich stattfinden und zur Minderung des Klimawandels beitragen.

Ein kleiner, aber stetig wachsender Markt

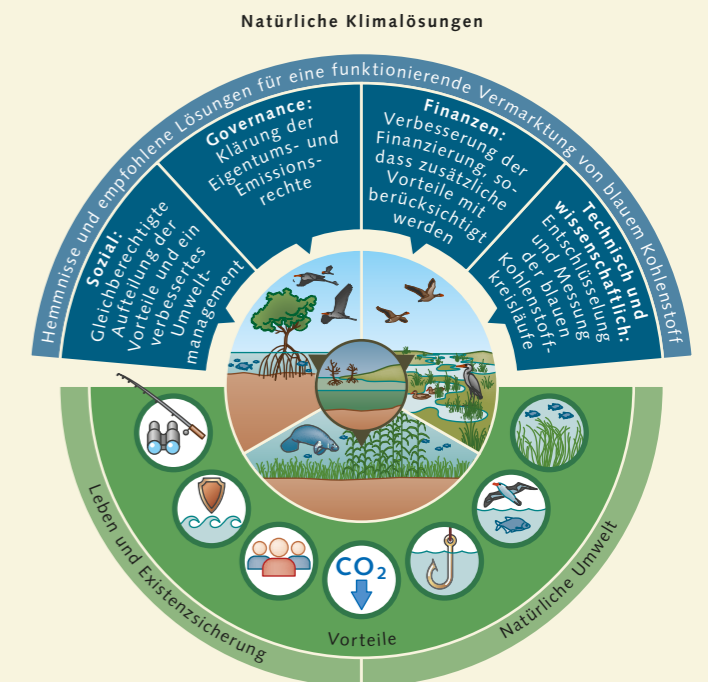
Viele Blue-Carbon-Projekte können diese Anforderungen bislang noch nicht erfüllen – etwa, weil es schwierig ist, genau nachzuweisen, wie viel zusätzliches Kohlendioxid der Atmosphäre entnommen wird. Aus diesem Grund ist die Menge der vergebenen Blue-Carbon-Emissionszertifikate auch noch vergleichsweise klein. Im Zeitraum von 2013 bis 2022 wurden auf freiwilligen Märkten Blue-Carbon-Zertifikate über gerade einmal eine Million Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente ausgegeben. Diese Summe entsprach einem Marktanteil von 0,7 Prozent.

Die Zahl der Projekte, die auf eine Vergabe von Blue-Carbon-Zertifikaten hinarbeiten, steigt jedoch stetig. Ausschlaggebend dafür war die Überarbeitung eines Regelwerkes für die Verifizierung von Emissionsvermeidungen und Kohlendioxid-Entnahme durch den Schutz und die (Wieder-)Aufforstung von Wäldern (Verified Carbon Standard REDD+ Methodology Framework). Es enthält jetzt auch Emissionsbilanzierungsvorschriften für Salzmarschen, Seegraswiesen und Mangrovenwälder, die geschützt, wiederhergestellt oder neu angelegt werden. Außerdem versuchen Projektinitiatoren immer häufiger, Investoren zu überzeugen, nicht nur in die Kohlendioxid-Entnahme der Ökosysteme zu investieren, sondern zusätzlich auch in ihre vielen Ökosystemleistungen wie den Küstenschutz und den Erhalt der Artenvielfalt. Damit werden die Pro-

jekte auch für jene Geldgeber interessant, die in den Umweltschutz investieren wollen.

Offene Frage: Wem gehören die Salzmarschen & Co?

Ungeklärt ist aber vielerorts, wem die Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- oder Kelpwälder gehören, wer über ihre Zukunft entscheiden und womöglich mit ihnen Geld verdienen darf. Ist es die lokale Bevölkerung, deren Verhalten Grundvoraussetzung für den Erhalt der Küstenökosysteme ist, oder dürfen hier regionale, nationale oder gar globale Akteure entscheiden? Und in welchem Umfang müssten diese dann die Küstenbevölkerung einbinden und regulatorisch beteiligen? Auf diese und viele andere rechtliche und regulatorische Fragen gibt es noch keine einheitlichen Antworten, was Geldgeber bislang davon abhält, flächendeckend in den Schutz und die Wiederherstellung der überlebenswichtigen Küstenökosysteme zu investieren.



5.13 > Bevor ein globaler Markt für Blue-Carbon-Emissionszertifikate entstehen kann, müssen soziale und finanzielle Aspekte sowie regulatorische Rahmenbedingungen und Kontrollmechanismen geklärt werden.

5.14 > Drei der vier Küstenökosysteme wachsen auf weichem Untergrund, bilden Wurzeln und sind daher in der Lage, Kohlenstoff im Untergrund anzureichern. Tange hingegen siedeln auf Felsen und können den von ihnen gebundenen Kohlenstoff nur in ihrer Algenbiomasse speichern.

Die vier vegetationsreichen Küstenökosysteme im Vergleich				
	Salzmarschen	Mangroven	Seegraswiesen	Tangwälder
Fläche weltweit	Bis heute sind nicht alle Salzmarschen der Welt kartiert, weshalb ihre Gesamtfläche nur geschätzt werden kann. Einer der bislang umfassendsten Studie zufolge kommen Salzmarschen in 43 Küstenländern vor und erstrecken sich über ein Gebiet von vermutlich rund 55 000 Quadratkilometern / 5,5 Millionen Hektar	147 359 Quadratkilometer / 14,7 Millionen Hektar (Stand: 2020)	Die genaue Gesamtfläche der Seegraswiesen ist nicht bekannt. Aktuelle Daten zufolge beläuft sie sich auf 160 387 bis 266 560 Quadratkilometer	Circa 1 500 000 Quadratkilometer / 150 Millionen Hektar
Lebensraum	Gezeitenbereich	Gezeitenbereich	Flachwasserbereich sandiger und geschützter Meeresbuchten	Flachwasserbereich von Felsküsten
Größe der existierenden Kohlenstofflagerstätten	Schätzungsweise 862 bis 1350 Millionen Tonnen Kohlenstoff	1900 bis 8400 Millionen Tonnen Kohlenstoff im oberen Meter der Bodensäule; die in lebender Biomasse gespeicherte Menge Kohlenstoff wird auf 1230 bis 3900 Millionen Tonnen geschätzt	Schätzungen belaufen sich auf 1732 bis 21 000 Millionen Tonnen Kohlenstoff. Diese sehr große Spannweite ist zurückzuführen auf Unsicherheiten in der Seegraswiesenkartierung, auf methodische Unterschiede in der Kohlenstoffmessung sowie auf unterschiedliche Merkmale der einzelnen Seegraswiesen	Tangwälder bilden keine eigenen Kohlenstofflagerstätten im Meeresboden. Stattdessen wird abgestorbenes organisches Material von Wind und Strömungen verfrachtet
Jährlich eingelagerte Kohlenstoffmenge	12,63 Millionen Tonnen (global) 28 Kilogramm bis 17 Tonnen (pro Hektar)	41 Millionen Tonnen (global) 560 Kilogramm bis 11 Tonnen (pro Hektar)	35,31 Millionen Tonnen (global) 25 Kilogramm bis 1 Tonne (pro Hektar)	Konkrete Angaben für Tangwälder fehlen bislang. Schätzungen zufolge werden jährlich etwa 11 Prozent (173 Millionen Tonnen) des von Großalgen gebundenen Kohlenstoffs im Meeresboden sowie in tiefen Wassermassen eingelagert
Flächenverluste	25 bis 50 Prozent der Ursprungsfläche; in Industrie- und sich schnell entwickelnden Ländern bis zu 60 Prozent seit den 1980er-Jahren	35 bis 50 Prozent der Ursprungsfläche	Rund 29 Prozent der Ursprungsfläche seit den 1940er-Jahren, mit großflächigen Verlusten in den USA, Australien, Neuseeland und Europa	40 bis 60 Prozent der Tangwälder verzeichneten Verluste

Die vier vegetationsreichen Küstenökosysteme im Vergleich				
	Salzmarschen	Mangroven	Seegraswiesen	Tangwälder
Restaurationspotenzial	Groß; die maximal zur Verfügung stehende Fläche beläuft sich auf 0,2 bis 3,2 Millionen Hektar	Groß; die maximal zur Verfügung stehende Fläche beläuft sich auf schätzungsweise 9 bis 13 Millionen Hektar	Mittel; im Vergleich zu Mangroven und Salzmarschen ist die Wiederherstellung von Seegraswiesen teuer und seltener erfolgreich; die maximal zur Verfügung stehende Fläche beläuft sich auf 8,3 bis 25,4 Millionen Hektar	Gering, wenn zu viele Weidegänger (Seeigel etc.) vor Ort sind; bisherige Restaurationsprojekte waren eher kleinskalig
Hauptgefahren und Stressfaktoren	Veränderte Landnutzung (Landwirtschaft, Bebauung), Meeresspiegelanstieg, eingeschleppte Arten, Verschmutzung	Abholzung, Meeresverschmutzung, Küstenverbauung, Extremwetter, Meeresspiegelanstieg	Meeresspiegelanstieg, Küstenbebauung, steigende Luft- und Wassertemperaturen, Überdüngung, Grundnetz Fischerei, Überfischung, Bootsverkehr (insbesondere Ankerungen), extreme Stürme	Meereserwärmung, Meereshitzewellen, Überfischung, Meeresverschmutzung, Überweidung durch Seeigel und Fische, Entnahme der Großalgen durch den Menschen, extreme Stürme
<p>Geschätzte Kosten einer zusätzlichen Kohlendioxid-Entnahme: 1 bis 60 US-Dollar pro Tonne Kohlendioxid für Mangrovenwälder und 100 bis 1000 US-Dollar pro Tonne Kohlendioxid für Salz- und Seegraswiesen</p> <p>Geschätzte künftige Emissionen, die durch den wirksamen Schutz bestehender Küstenökosysteme vermieden werden können: 140 bis 460 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente pro Jahr</p> <p>Mögliche zusätzliche Kohlendioxid-Entnahme infolge weitreichender Wiederherstellung zerstörter vegetationsreicher Küstenökosysteme: 0,621 bis 1,064 Milliarden Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente pro Jahr ab dem Jahr 2030. Diese Menge entspräche rund 3 Prozent der globalen Kohlendioxidemissionen durch die Verbrennung von Kohle, Gas und Öl im Jahr 2020</p>				

5,5 bis 34,2 Prozent der theoretisch möglichen Küstengebiete, wenn man alle sozioökonomischen Argumente gegen eine Renaturierung berücksichtigt.

Andere Fachleute beurteilen das Restaurationspotenzial optimistischer. In einer globalen Analyse zum Zustand und zum Wiederherstellungspotenzial der Mangrovenwälder kamen Forschende im Jahr 2018 zu dem Schluss, dass Mangroven nur an jenen einstigen Standorten nicht wieder neu angepflanzt werden können, wo Bauten errichtet wurden (0,2 Prozent der verlorenen Mangrovenfläche im Zeitraum 1996 bis 2016) oder ihr einstiger Lebensraum nun dauerhaft von Wasser überspült ist (16 Prozent der verlorenen Mangrovenfläche im Zeitraum 1996 bis 2016). Demnach

beläuft sich die Fläche, auf der Mangrovenwälder einst standen und nun wiederhergestellt werden könnten, auf insgesamt 8120 Quadratkilometer. Auf 81 Prozent dieser Flächen seien die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Neuanpflanzung sogar sehr gut, so die Fachleute.

Kein Heilsbringer, aber lohnendes Werkzeug am richtigen Ort

Blue-Carbon-Spezialisten streiten noch darüber, welche Schlussfolgerungen aus den genannten Unsicherheiten zur Machbarkeit und langfristigen Wirksamkeit einer großflächigen Wiederherstellung und Erweiterung vege-

Grün-, Rot- und Braunalgen: Teil der Klimälösung?

Im Jahr 2020 ernteten Küstenbauern weltweit rund 36 Millionen Tonnen Großalgen, auch Seetang oder Kelp genannt; 97 Prozent davon in speziell angelegten Algenfarmen. Die Algen dienen als Nahrungsmittel, Viehfutter oder Dünger, vornehmlich in Küstenländern. Ihre Inhaltsstoffe werden aber auch weltweit gehandelt, weil sie bei der Herstellung von Lebensmitteln, Medikamenten und Kosmetikprodukten benötigt werden. Und immer häufiger nutzen Industrieunternehmen Algenbiomasse, um daraus Biotreibstoffe herzustellen – so zum Beispiel in der Volksrepublik China, die mittlerweile 59,5 Prozent der weltweit gehandelten Großalgen produziert.

Unter den Begriff Großalgen fallen Organismen aus drei taxonomischen Gruppen: den Braunalgen mit rund 2000 Arten, den Rotalgen mit mehr als 7200 Arten und den Grünalgen mit mehr als 1800 Arten. Für die weltweite Großalgenzucht aber wurden im Jahr 2019 gerade einmal 27 Arten verwendet, in erster Linie Rot- und Braunalgen.

Großalgen sind hochproduktive Organismen. Sie wachsen schnell und binden pro Jahr zwischen 91 und 522 Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter Meeresfläche, auf der sie wachsen. Die dazu benötigten Nährstoffe (Stickstoff und Phosphor) wiederum filtern die Algen aus dem Meer. Auf diese Weise reinigen sie nicht nur das Wasser und wirken einer Überdüngung der Küstengewässer entgegen. Sie reduzieren lokal auch die Versauerung des Meerwas-



5.15 > Untersucht wird aktuell, ob sich die CO₂-Aufnahme des Ozeans durch Versenken von treibenden Sargassum-Algen steigern ließe.

sert, weil sie im Zuge ihrer Fotosynthese Kohlendioxid aus dem Wasser aufnehmen und den enthaltenen Kohlenstoff in ihrem Gewebe einlagern.

Diese klimafreundlichen Eigenschaften und ihre vergleichsweise einfache Zucht brachten Fachleute auf die Idee, der Atmosphäre mehr Kohlendioxid zu entnehmen, indem sie riesige Algenfarmen anlegen, in denen Großalgen dann Fotosynthese betreiben und wachsen – sowohl in Küstennähe als auch auf Hoher See. Die so entstehenden Algenwälder oder -teppiche könnten dann auf dreierlei Weise klimafreundlich genutzt werden:

- als Ausgangsstoff für die Bioenergiegewinnung mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (BECCS);
- als Ausgangsstoff für die Herstellung von Biokohle, mit der sich anschließend unter anderem der Bodenkohlenstoffgehalt von Äckern und Feldern sowie deren Wasserhaltevermögen erhöhen ließe;
- als Biomasse, die innerhalb kurzer Zeit in den Tiefen des Ozeans versenkt würde.

Durch das schnelle Versenken großer Mengen Biomasse ließe sich der Prozess der biologisch-organischen Kohlenstoffpumpe beschleunigen (siehe Kapitel 2). Auf diese Weise bliebe Meereslebewesen in der Wassersäule weniger Zeit, die Algenmassen zu fressen oder zu zersetzen. Deutlich mehr Biomasse könnte Tiefen von mehr als 1000 Metern oder sogar den Meeresboden erreichen und dort abgebaut oder aber im Sediment dauerhaft einlagert werden. In beiden Fällen wäre der in der Algenmasse enthaltene Kohlenstoff für lange Zeit in der Tiefe weggeschlossen. Nur zum Vergleich: Sinkt Biomasse bis auf eine Tiefe von 500 bis 3000 Metern, dauert es je nach Meeresgebiet mehr als 50 Jahre, bis der enthaltene Kohlenstoff oder mögliche Abbauprodukte wieder an die Oberfläche aufsteigen.

Ein rasanter Ausbau der Großalgenzucht scheitert derzeit daran, dass Algenfarmen bislang hauptsächlich in Küstengewässern betrieben werden, wo sowohl der Platz als auch die verfügbare Nährstoffmenge begrenzt sind. Hinzu kommt, dass sich die Küstengewässer im Zuge des Klimawandels erwärmen, was die Algenzucht zusätzlich erschwert. Forschende und Unternehmen versuchen deshalb, Anbautechnologien für die hohe See zu entwickeln, die sich über Flächen von mehreren Tausend Quadratkilometern einsetzen ließen. Ideen gibt es viele. Dazu gehören unter anderem:

- frei schwimmende (Sargassum-)Algenkäfige, die von ferngesteuerten Schleppbooten von einer nährstoffreichen Meeresregion in die nächste gezogen werden, um eine maximale Wachstumsrate zu erzielen;

- Algenwuchsplattformen, die tagsüber neun Meter unter der Meeresoberfläche schwimmen, nachts aber in nährstoffreiches Tiefenwasser gezogen werden;
- Plattformen, die versenkt werden, sowie sie vollständig mit Großalgen bewachsen sind. Ziel ist es hier, die Algenbiomasse schnellstmöglich in große Tiefen zu transportieren.

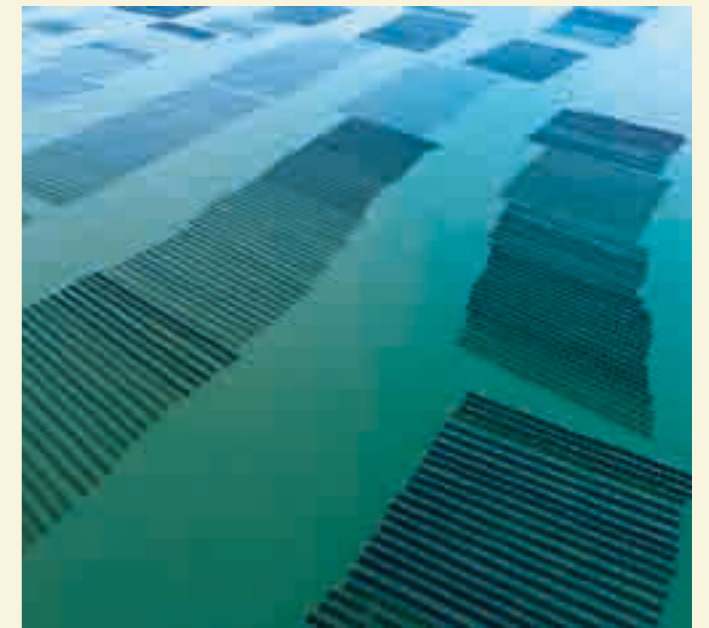
Grenzen und Risiken der Großalgenzucht

Auch wenn die großflächige Algenzucht zu den sogenannten naturbasierten Klimälösungen zählt, birgt sie Nachteile für Mensch und Umwelt. Denn wo viele Großalgen wachsen, beginnt ein ökosystemweiter Wettkampf um die im Wasser gelösten Nährstoffe. Werden die Algen geerntet und somit dem Meer entnommen, fehlt den marinen Lebensgemeinschaften nicht nur eine wichtige Nahrungsgrundlage, sondern dem Stoffkreislauf des Meeres langfristig auch die in der Algenmasse enthaltenen Nährstoffe. Diese Mangelsituation gilt vor allem für nicht überdüngte Küstengewässer und bedeutet in der Konsequenz, dass die Produktivität der entsprechenden Meeresregionen abnimmt.

Infolge dieser gefährlichen Kettenreaktion würden zunächst weniger Phytoplankton und Großalgen wachsen, wenig später deutlich weniger Tiere überleben, weil sie nicht mehr ausreichend zum Fressen fänden. In Chinas Algenanbaugebieten suchen Fachleute seit Jahren nach einer Lösung dieses Nährstoffproblems. Bisher aber führte jeder vielversprechende Ansatz zu weiteren Schwierigkeiten bei der Algenzucht, sodass es bis heute keine wirkliche Lösung gibt.

Der natürliche Nährstoffmangel in Meeresregionen wie zum Beispiel den subtropischen Wirbeln bedingt auch, dass sich die Großalgenzucht auf hoher See nicht auf den gesamten Ozean ausdehnen ließe. Vielversprechend wäre sie vermutlich nur in den sogenannten Auftriebsgebieten – also in jenen Meeresregionen, wo nährstoffreiches Tiefenwasser zur Meeresoberfläche aufsteigt – sowie überall dort, wo es dem Menschen gelingt, Tiefenwasser an die Meeresoberfläche zu pumpen oder aber die Wuchsplattformen regelmäßig aus der lichtdurchfluteten Oberflächenschicht in das nährstoffreiche Tiefenwasser hinabzuziehen.

Als Forschende vor Kurzem die Auswirkungen einer ozeanweiten Großalgenzucht mit anschließendem Versenken in der Tiefsee in einem Erdsystemmodell simulierten, wurden weitere Folgen und Risiken für das System Meer ersichtlich. Durch das schnelle Versenken der Biomasse in Wassertiefen von mehr als 3000 Metern und den auf diese Art und Weise reduzierten natürlichen Abbau des organischen Materials in mittlerer Wassertiefe würden die Sauerstoffmangelzonen in diesem Teil der Wassersäule abnehmen. Gleichzei-



5.16 > Im November sind die Großalgenfarmen der chinesischen Provinz Fujian bereits aus der Ferne zu erkennen. Die hier gezüchteten Rot- oder Braunalgen sind zu diesem Zeitpunkt ausreichend gewachsen und werden von den Fischern nun Seil für Seil eingeholt.

tig aber würde der Sauerstoffverbrauch in großer Wassertiefe sowie am Meeresboden zunehmen: Dort nämlich würden Meeresorganismen nun einen Großteil der Algenmasse zersetzen, sodass sich zum einen sehr große Sauerstoffmangelzonen in der Tiefsee bilden würden; zum anderen würde das Tiefenwasser infolge der Kohlendioxid-Freisetzung durch die Mikroben versauern. Doch damit nicht genug: Weil auch mehr Biomasse im Meeresboden eingelagert werden würde, fehlten dem Meer langfristig die darin enthaltenen Nährstoffe. Das wiederum hieße abermals weniger Phytoplanktonwachstum und damit auch weniger Leben im Meer.

Die Großalgenzucht, so viel ist heute schon absehbar, wird keinesfalls die alleinige Lösung unseres Klimaproblems sein können. Stattdessen stellt sie eine Möglichkeit aus einer Vielzahl von Verfahren dar, mit denen der Mensch die Aufnahme von Kohlendioxid durch das Meer verstärken kann. Ihr großflächiger Einsatz aber hat Auswirkungen, die es vorher gründlich gegen einen möglichen Nutzen abzuwägen gilt.

tationsreicher Küstenökosysteme gezogen werden sollten. Skeptiker bezeichnen die existierenden Blue-Carbon-Ansätze als zu unausgegoren, um sie als Grundlage für nationale Entnahmeziele zu nutzen oder aber in den Emissionszertifikate-Handel mit einzubeziehen. Zur Untermauerung ihres Standpunktes verweisen sie auf die vergleichsweise große Spannweite zum zusätzlichen Kohlendioxid-Entnahmepotenzial der Meereswiesen und Meereswälder. Je größer diese Spannweite nun ausfällt, desto ungewisser ist auch das tatsächliche Entnahmepotenzial.

Andere Experten hingegen nehmen diese Spannweite zum Anlass, einmal genauer hinzuschauen. Einigen Studien zufolge könnten geschützte und wiederhergestellte Küstenökosysteme der Atmosphäre pro Jahr zusätzliche 0,06 bis 2,1 Milliarden Tonnen Kohlendioxid entnehmen. Diese Entnahmemenge wiederum entspricht in etwa 0,02 bis 6,6 Prozent der weltweiten Kohlendioxidemissionen aus dem Jahr 2020 und würde keineswegs ausreichen, die prognostizierten Restemissionen von mehreren Milliarden Tonnen Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen auszugleichen. Das heißt, mit Blue-Carbon-Ansätzen allein ließe sich das große Ziel der globalen Treibhausgasneutralität selbst dann nicht erreichen, wenn parallel alle bekannten Maßnahmen umgesetzt werden würden, mit denen sich menschengemachte Treibhausgasemissionen verhindern ließen.

Die aktuelle Forschung zur Aufnahme und Speicherung von Kohlendioxid durch Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder belegt allerdings auch, dass es durchaus Küstengebiete gibt, in denen die Meereswiesen und -wälder im hohen Maß Kohlenstoff einlagern und auf diese Weise maßgeblich zur Minderung der Treibhausgaskonzentration in der Erdatmosphäre beitragen. Den Grundstein dafür legen jedoch die lokalen Umweltbedingungen, die von Standort zu Standort stark variieren und die großen Unterschiede im Kohlendioxid-Entnahmepotenzial erklären. Es sei deshalb falsch, Küstenökosystemen die Fähigkeit, zusätzliches Kohlendioxid in bedeutsamen Mengen aufzunehmen, grundsätzlich abzusprechen. Stattdessen stehe die Forschung vor der Aufgabe, für jedes einzelne Küstenökosystem zu untersuchen, in welchem Maß es

Kohlenstoff aufnimmt, einlagert und gegebenenfalls wieder freisetzt und inwiefern es auch in einer wärmeren Welt in der Lage wäre, diese Entnahme- und Speicherfunktion zu erfüllen. Erst wenn überhaupt ausreichend Datenmaterial zum Kohlenstoffkreislauf der örtlichen Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- oder Tangwälder vorläge, könne entschieden werden, ob in diesen Gebieten Neuanpflanzungen zur Wiederherstellung oder aber Erweiterung der Meereswiesen und -wälder sozialverträglich möglich und aus Emissionssicht auch tatsächlich Erfolg versprechend wären – das heißt, ob sie zu einer zusätzlichen Kohlendioxid-Entnahme führen würden. Optimistischen Schätzungen zufolge wäre dies in so vielen Küstengebieten der Fall, dass sich im Idealfall die aktuelle Fläche der weltweiten Meereswiesen und -wälder bis zum Jahr 2050 um 30 bis 50 Prozent erweitern ließe.

Sollte sich diese Hoffnung nicht erfüllen und die zusätzlich gewonnenen Vegetationsflächen am Ende kleiner ausfallen, würden Mensch und Natur dennoch auf vielfache Weise von gesunden und produktiven Küstenökosystemen profitieren. Ihre vielen Zusatzleistungen machen die Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder nämlich zu einem unbezahlbaren Überlebensgaranten für Abermillionen Menschen und noch mehr Meeresorganismen. Aus diesem Grund erfahren Schutz- und Restaurationsmaßnahmen in der Regel auch eine breite gesellschaftliche Unterstützung.

Die Wissenschaft spricht in Hinblick auf Blue-Carbon-Ansätze von Maßnahmen, die nur wenige Nachteile mit sich bringen und deshalb auch kaum Bedenken auslösen (low-regret measures). Zudem sind zumindest die Restaurationsmethoden für Mangroven und Salzmarschen technisch so weit ausgereift, dass ein Einsatz theoretisch möglich wäre und sich durch die Verwaltungseinheiten und politischen Institutionen vor Ort auch gut steuern ließe.

Investitionen in wirksame und wissenschaftsbasierte Schutz- und Wiederherstellungsprojekte für Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder zahlen sich daher heute schon aus. Solche Maßnahmen werden in einer wärmer werdenden Welt dringender benötigt als je zuvor.

Küstenökosysteme: Marine Kohlenstoffsenke mit unverzichtbaren Zusatzleistungen

Vegetationsreiche Küstenökosysteme wie Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder gehören zu den Schlüsselakteuren im Kohlenstoffkreislauf des Meeres. Die Pflanzengemeinschaften verantworten zusammengenommen mindestens 30 Prozent des im Meeresboden eingelagerten organischen Kohlenstoffs.

Ihre Kohlenstoffeinlagerung erfolgt nach einem festen Schema: Die Pflanzen nehmen Kohlendioxid auf und wandeln den darin enthaltenen Kohlenstoff in Biomasse um. Diese wird im Anschluss im Wurzelwerk eingelagert (Tange ausgeschlossen) oder sammelt sich im Laufe der Zeit in Form abgestorbener Äste, Blätter oder Halme am Meeresboden an. Herabsinkende Sedimente begraben die Pflanzenreste, aber auch diverses anderes organisches Material in der Folge unter sich und schließen es luftdicht ab. Unter diesen Bedingungen können die Tier- und Pflanzenreste nicht zersetzt werden. Stattdessen bilden sie Kohlenstofflagerstätten im Meeresboden, die größer sind als die unterirdischen Kohlenstoffspeicher der Wälder an Land und so lange erhalten bleiben, wie die Salzmarschen, Seegraswiesen und Mangrovenwälder gedeihen – im Idealfall viele Tausend Jahre.

Aus dieser klimarelevanten Eigenschaft der Meereswiesen und -wälder leiten sich zwei Schlussfolgerungen ab. Erstens: Wer bestehende Meereswiesen und -wälder schützt, verhindert den Zerfall ihrer Kohlenstofflager und damit die Freisetzung großer Mengen Treibhausgase. Zweitens: Es besteht die Hoffnung, durch das Anpflanzen neuer Pflanzengemeinschaften oder durch Wiederherstellen geschädigter Küstenökosysteme deren natürliche Aufnahme von Kohlendioxid derart zu verstärken, dass unvermeidbare Treibhausgasemissionen des Menschen ausgeglichen werden können.

Wie groß das Kohlendioxid-Entnahmepotenzial der Küstenökosysteme ist, wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert, denn noch immer fehlt wichtiges Grundlagenwissen – etwa zur Frage, wie viel Kohlenstoff einzelne Küstenökosysteme speichern. Vieles deutet darauf hin, dass es von Ort zu Ort große Unterschiede in der Kohlenstoffeinlagerung gibt, die in erster Linie auf die lokalen Standortbedingungen zurückzuführen sind. Neuanpflanzungen mit dem Ziel einer zusätzlichen Kohlendioxid-Entnahme machen daher nur in jenen Regionen Sinn, in denen optimale Wachstums- und Einlagerungsbedingungen gegeben sind.

Es wäre jedoch falsch, Entscheidungen zur Wiederherstellung oder zu einer möglichen Ausweitung vegetationsreicher Küstenökosysteme allein auf Grundlage ihres Kohlenstoff-Entnahmepotenzials zu fällen. Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder offerieren eine lange Liste existenzieller Zusatzleistungen. Sie produzieren Sauerstoff, reinigen das Wasser, bieten Lebensraum und Nahrung für Tiere und Pflanzen, bremsen Wellen und Strömungen, schützen die Küsten vor Erosion und versorgen Abermillionen Menschen rund um den Erdball mit Essen, Holz und Verdienstmöglichkeiten unterschiedlicher Art.

Investitionen in ihren Schutz und die Wiederherstellung zerstörter Meereswiesen und -wälder generieren somit einen doppelten Nutzen. Sie helfen, Emissionen auszugleichen, und verbessern die Lebensbedingungen für Mensch und Meeresbewohner. Ob geplante Vorhaben allerdings auch von Erfolg gekrönt sind, hängt nicht nur davon ab, ob sie fachmännisch konzipiert und umgesetzt werden. Eine entscheidende Rolle spielt auch, ob die lokale Bevölkerung in die Planung und alle wichtigen Entscheidungsprozesse eingebunden wird. Ohne ihre Unterstützung, so zeigen Erfahrungen aus vielen Teilen der Welt, sind Restaurationsprojekte auf dem Land wie im Meer zum Scheitern verurteilt.

6 Künstlicher Auftrieb: Die Idee von der Begrünung des Ozeans

> Algen, Zooplankton und Fische gehören zu den Schlüsselakteuren der biologischen Kohlenstoffpumpe. Damit diese allerdings optimal funktioniert, braucht es Nährstoffe, die vielerorts fehlen, zumindest im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser. Durch das Heraufpumpen nährstoffreichen Tiefenwassers könnte dieser Nährstoffmangel behoben werden. Ob ein solcher Schritt die natürliche Aufnahme von Kohlenstoff durch das Meer tatsächlich steigern würde, ist ungewiss.

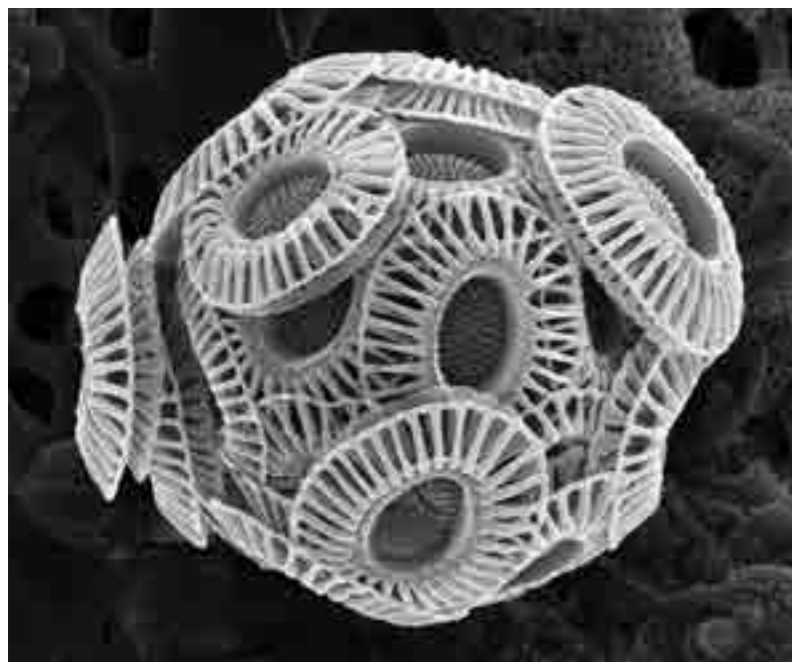


Eine Anschubhilfe für die biologische Kohlenstoffpumpe

> Auf etwa 75 Prozent der Ozeanfläche ist das Wachstum von Phytoplankton begrenzt, weil in diesen Regionen das lichtdurchflutete Oberflächenwasser nicht genügend Nährstoffe enthält. Im Tiefenwasser dagegen stehen ausreichend Nährstoffe zur Verfügung. Auf Grundlage dieses Wissens entstand die Idee, nährstoffreiches Wasser aus mehreren Hundert Meter Tiefe an die Meeresoberfläche zu pumpen, um dort das Algenwachstum zu verstärken und mit ihm die Leistung der biologischen Kohlenstoffpumpe. Ob dieses Konzept am Ende aufgeht, ist fraglich, denn die Forschung zu künstlichem Auftrieb stellt die Wissenschaft vor außergewöhnliche technische Herausforderungen.

Die Rolle der mikroskopisch kleinen Meeresalgen

6.1 > Die einzellige Alge *Emiliania huxleyi* gehört zu den Schlüsselarten des Ozeans. Sie bildet riesige Algenblüten und trägt auf diese Weise maßgeblich zur biologischen Kohlenstoffpumpe des Meeres bei. Ihr auffälliger Panzer besteht aus mikroskopisch kleinen Kalzit-Scheibchen, denen der Einzeller die Bezeichnung „Kalkalge“ verdankt.

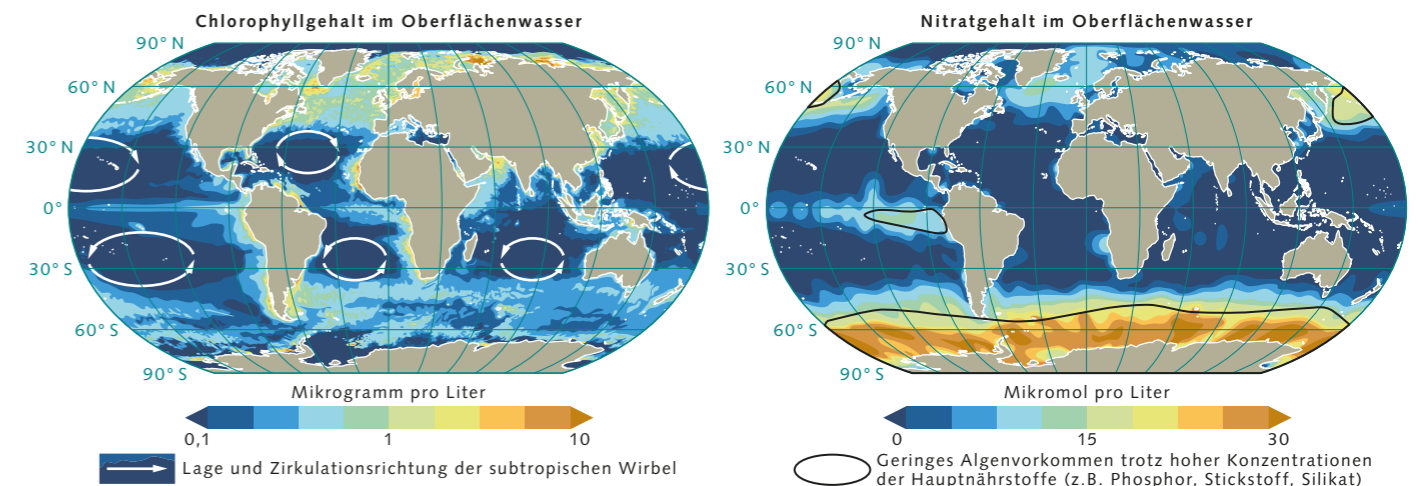


Die hochproduktiven Pflanzengemeinschaften der Küstenregionen zu schützen und zu erweitern (Kapitel 5), wäre eine mögliche biologische Methode, um die Aufnahme von Kohlendioxid durch den Ozean zu verstärken. Es gibt jedoch noch einen zweiten Lösungsansatz, der auf die Biologie des Meeres setzt. Dessen Grundidee lautet, die natürliche organisch-biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres anzukurbeln. Diese wird durch die Lebensgemeinschaften im Oberflächenwasser des Ozeans angetrieben, insbesondere durch einzellige, mikroskopisch kleine Algen, das sogenannte Phytoplankton, dessen Vertreter gerade einmal 0,0001 bis 0,5 Millimeter groß sind.

Zu den bedeutendsten Gruppen des Phytoplanktons gehören die Kieselalgen (Diatomeen), die Panzergeißler (Dinoflagellaten), die Haptophyta mit ihrer bekanntesten Untergruppe den Kalkalgen (Coccolithophoriden) sowie das winzig-kleine Picophytoplankton, welches in den großen nährstoffarmen Gebieten der Meere bis zu 80 Prozent der Biomasse im Oberflächenwasser ausmacht. Gemeinsam sind die Phytoplanktongemeinschaften des Weltozeans derzeit für etwa die Hälfte der weltweiten Kohlendioxidaufnahme und Kohlenstoffbindung verantwortlich. Schätzungen zufolge nehmen sie pro Jahr etwa 50 Milliarden Tonnen Kohlenstoff auf. Die einzelligen Meeresalgen beeinflussen den Kohlendioxidgehalt von Meer und Atmosphäre damit ganz entscheidend und sind wichtige Akteure im Kohlenstoffkreislauf des Meeres.

Phytoplankton braucht Sonnenlicht, um Fotosynthese zu betreiben. Deshalb sind die Algen nur im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser der Meere aktiv, je nach Wassertrübung in Tiefen bis zu 150 Metern. Wie schnell die Algen wachsen und in welcher Artzusammensetzung sie auftreten, hängt in erster Linie davon ab, welche Nährstoffe in welchen Mengen im Oberflächenwasser enthalten sind, denn gelöstes Kohlendioxid als Grundzutat für die Fotosynthese steht ja jederzeit in ausreichendem Maß zur Verfügung. Kieselalgen beispielsweise, die vergleichsweise viel Kohlenstoff binden und für etwa 40 Prozent der marinen Biomasseproduktion des Meeres verantwortlich sind, wachsen vor allem in Gebieten, in denen das Oberflächenwasser sowohl die Hauptnährstoffe Phosphor und Stickstoff enthält als auch Mikronährstoffe wie Eisen und im Wasser gelöste Kieselsäuren (Siliziumdioxid, auch Silikat genannt).

Phosphor sowie Stickstoff (oft in Form von Nitrat) werden für den Aufbau der Algenzellen benötigt. Beide Nährstoffe gelangen unter anderem über die Flüsse in das



Meer, werden über die Luft eingetragen oder aber bei mikrobiellen Recyclingprozessen etwa in der Sedimentschicht am Meeresboden freigesetzt. Der Stickstoff muss anschließend von Cyanobakterien in Nitrat umgewandelt werden – anderenfalls kann das Phytoplankton wenig mit ihm anfangen. Das Eisen wiederum brauchen die Algen, um Enzyme und Proteine zu bilden – vor allem solche, die essenziell sind für die Fotosynthese. Wichtige Eisenquelle für die Phytoplanktongemeinschaften der Meere sind das Schmelzwasser der arktischen und antarktischen Gletscher, sedimentgeladene Bäche und Flüsse, Staubwolken, die über Wüsten aufsteigen und deren Sandmengen im Anschluss über dem Ozean niedergehen, sowie hydrothermale Prozesse in der Tiefsee (etwa Schwarze Raucher), bei denen eisenhaltiges Wasser aus dem Meeresuntergrund austritt. Fehlt Silikat im Wasser, sind Kieselalgen nicht in der Lage, ihre Siliziumschalen aufzubauen, welche die Einzeller unter anderem davor schützen, von kleineren Ruderfußkrebsen gefressen zu werden. Unter diesen Voraussetzungen wachsen anstelle der Kieselalgen dann andere, meist kleinere Algenarten.

Global betrachtet, gelten nur 25 Prozent der Meeresoberfläche als nährstoffreiche Gebiete. Diese liegen hauptsächlich in den höheren Breiten (z.B. Nordatlantik) sowie in den natürlichen Auftriebsgebieten der Erde. Auf den restlichen 75 Prozent fehlen jeweils bestimmte Nährstoffe im Oberflächenwasser, sodass dessen Algenwachstum auf natürliche Weise begrenzt ist. Im Tiefenwasser stehen allerdings überall ausreichend Nährstoffe zur Verfügung.

Künstlicher Auftrieb: Nach dem Vorbild des Ozeans

Diese Zusammenhänge muss man kennen, um zu verstehen, wie die organisch-biologische Kohlenstoffpumpe theoretisch angekurbelt werden könnte. Der Plan lautet nämlich, in nährstoffarmen Meeresregionen, in denen bislang wenig Algenwachstum stattfindet, nährstoffreiches Wasser aus 200 bis 1000 Meter Wassertiefe an die Meeresoberfläche zu pumpen. Artificial Upwelling, künstlicher Auftrieb, nennt sich dieser Lösungsansatz. Dieser Idee zufolge würde das Tiefenwasser in der lichtdurchfluteten Oberflächenschicht wie Dünger wirken: Algen würden vermehrt wachsen – insbesondere Kieselalgen – und im Zuge der Fotosynthese mehr Kohlendioxid aus dem Wasser aufnehmen und den enthaltenen Kohlenstoff in ihre Biomasse einbauen. Der Kohlendioxidgehalt des Oberflächenwassers würde demzufolge sinken und den Ozean in die Lage versetzen, neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen.

Ein verstärktes Algenwachstum im Oberflächenwasser wiederum würde mehr Futter für Krill, Ruderfußkrebse, Flügelschnecken und andere frei treibende Organismen (Zooplankton) und Fische bedeuten und zu einem zunehmenden Transport kohlenstoffhaltigen Materials in Form von Partikeln, Kotballen und Kadavern in größere Wassertiefe führen, bestenfalls tiefer als 1000 Meter. Der in dem herabsinkenden Material enthaltene Kohlenstoff wäre auf diese Weise für Jahrzehnte, mitunter sogar für

6.2 > Die für das Algenwachstum wichtigen Hauptnährstoffe Phosphor, Stickstoff (in Form von Nitrat) und Silikat sind ungleichmäßig im Meer verteilt. Daher können nur 25 Prozent der Meeresoberfläche als nährstoffreiche Gebiete bezeichnet werden. Sie liegen vor allem in höheren Breiten sowie in den natürlichen Auftriebsgebieten der Erde.

Jahrhunderte in den Tiefen des Meeres weggeschlossen – bis zu dem Zeitpunkt, wenn die kohlenstoffreichen Wassermassen eines Tages wieder zur Meeresoberfläche aufsteigen.

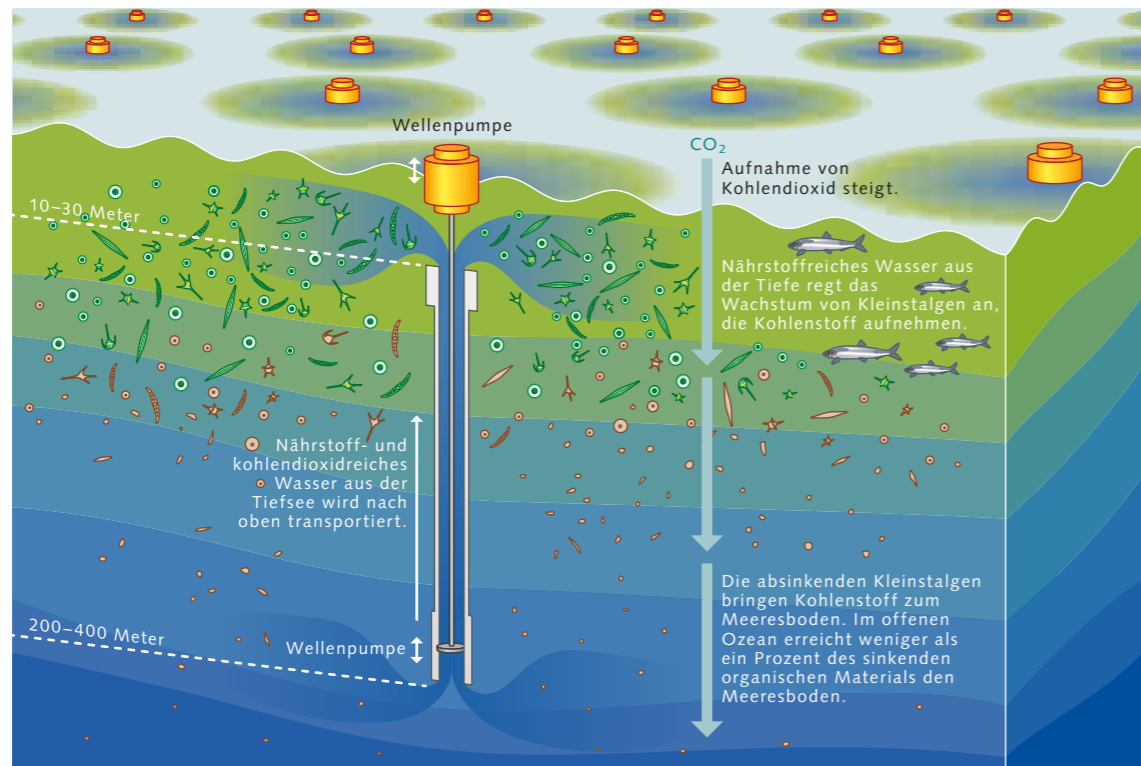
Bis dahin jedoch könnte der in der Tiefe eingelagerte Kohlenstoff nicht mehr in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre entweichen. Tatsächlich entzogen werden dem Kohlenstoffkreislauf allerdings nur jene Restmengen Biomasse, die unbeschadet bis zum Meeresboden rieseln und dort dauerhaft im Sediment eingelagert werden. Ihr Anteil entspricht jedoch weniger als einem Prozent des ursprünglich von den Algen aufgenommenen Kohlenstoffs. Stammt der Kohlenstoff aus anderen Quellen (Holz, Walknochen etc.) kann der Anteil höher sein (ausführlichere Informationen in Kapitel 2).

Künstlicher Auftrieb kopiert das Funktionsprinzip der großen natürlichen Auftriebsgebiete vor den Westküsten Perus, Namibias, Kaliforniens und Mauretaniens (subtropisches Afrika und Amerika). Vom Wind angetrieben, steigt dort kaltes, nährstoffreiches Tiefenwasser zur Meeresoberfläche auf und lässt das Leben im Oberflächenwas-

ser aufblühen. Die Nährstoffzufuhr aus der Tiefe ist der Grund, warum die Auftriebsgebiete zu den produktivsten und fischreichsten Meeresregionen der Welt gehören. Um dieses Erfolgskonzept des Ozeans jedoch technisch nachzuahmen und in bislang wenig produktiven Meeresregionen anzuwenden, bräuchte es allerdings Zehn- bis Hunderttausende Auftriebspumpen mit einem Gesamtfördervolumen von einer Million Kubikmeter Wasser pro Sekunde. Erst dann käme die künstlich erzeugte Auftriebswirkung in etwa jener in den natürlichen Auftriebsgebieten gleich.

Ob es zielführend und wirtschaftlich sinnvoll wäre, so viele Pumpen einzusetzen, darf angezweifelt werden. In einer Modellstudie aus dem Jahr 2022 kommen Forschende zu dem Ergebnis, dass die zusätzliche Kohlendioxid-Entnahme und Kohlenstoffeinlagerung in größerer Tiefe selbst dann nur 150 Millionen Tonnen pro Jahr betragen würde, wenn die Menschheit auf jedem Quadratkilometer Meeresfläche eine bis in 500 Meter Tiefe reichende Auftriebspumpe installieren würde – und das von den Tropen bis in die subpolaren Gewässer.

6.3 > Künstlicher Auftrieb lässt sich durch unterschiedliche Verfahren erzeugen. Eine Idee ist, schlauchähnliche Wellenpumpen im Meer auszusetzen. Sie besitzen am oberen Ende einen Schwimmkörper, der im Rhythmus der Wellen auf- und absteigt. Seine Bewegung wird auf einen Wasserheber im Aufstiegsschlauch übertragen, der das Tiefenwasser dann an die Meeresoberfläche hievt.



6.4 > Die Schönheit und Formenvielfalt der Kieselalgen zeigen sich erst, wenn man sie durch ein Elektronenmikroskop betrachtet. Abertausende Arten wurden bislang entdeckt. Sie alle leben in einem Haus aus Glas oder – genauer gesagt – in einem Schutzpanzer aus hydratisiertem Silikat.

Die erhoffte Verwandlung des Ökosystems

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

Ändert sich die verfügbare Nährstoffmenge durch künstlichen Auftrieb dauerhaft, würde sich die Lebensgemeinschaft des Oberflächenwassers vermutlich mit der Zeit daran anpassen. Zunächst würden vermehrt Kieselalgen wachsen, dann könnte sich größeres Zooplankton ansiedeln, welches in der Lage wäre, die harten Siliziumschalen der Kieselalgen aufzubrechen. Großes, nahrhaftes Zooplankton wiederum würde Fische anlocken, weshalb Fachleute davon ausgehen, dass künstlicher Auftrieb langfristig zu einem Anstieg der Fischbestände in der jeweiligen Meeresregion führen würde. Wie gut die erhofften Anpassungsprozesse jedoch in der Praxis funktionieren würden, ist Gegenstand aktueller Forschungsprojekte.

Zusammenwirken von biologischer und physikalischer Kohlenstoffpumpe

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

Die physikalische Kohlenstoffpumpe wird durch das Absinken kalter Wassermassen in den Polarregionen angetrieben. Da kaltes Wasser eine hohe Gaslöslichkeit hat – das heißt, viel Gas aufnehmen kann –, enthalten die in den hohen Breiten absinkenden und dann in der Tiefe Richtung Äquator wandernden Wassermassen entsprechend viel Kohlendioxid. Pumpt man nun dieses kalte, kohlendioxidreiche Tiefenwasser an die Meeresoberfläche, erwärmt es sich. Parallel dazu sinkt seine Gaslöslichkeit und das gespeicherte Kohlendioxid kann wieder in die Atmosphäre entweichen. Soll also durch künstlichen Auftrieb die Aufnahme von Kohlendioxid durch den Ozean verstärkt werden, muss mithilfe des Verfahrens mehr Kohlendioxid nachhaltig durch Algen gebunden und in große Tiefen transportiert werden, als mit dem emporgepumpten Tiefenwasser an die Oberfläche gelangt.

Für einen Einsatz von künstlichem Auftrieb spricht, dass der fortschreitende Klimawandel die Schichtung der Wassermassen im Ozean verstärkt. Infolgedessen vermischen sich das Oberflächenwasser und das darunterliegende Zwischenwasser in einem geringeren Maß, weshalb die natürliche Nährstoffzufuhr aus der Tiefe des Meeres abnimmt und damit langfristig auch die Biomasseproduktion im lichtdurchfluteten Teil der Wassersäule. Ein künstlich erzeugter Auftrieb könnte dieser Entwicklung ein Stück weit entgegenwirken.

Mithilfe von Computersimulationen haben Forschende zudem herausgefunden, dass das Kohlendioxid-Entnahmepotenzial durch künstlichen Auftrieb mit jedem Grad zusätzlicher Erwärmung steigt, ganz ungeachtet der abnehmenden Biomasseproduktion infolge von Meereserwärmung, -versauerung und Sauerstoffverlusten. Verantwortlich dafür ist abermals die physikalische Kohlenstoffpumpe. Sie würde laut Modellrechnungen in einer wärmeren Welt auf dreifache Weise von großflächigen Einsätzen des künstlichen Auftriebs profitieren:

- Erstens würde der Auftrieb kalten Tiefenwassers zu einer Abkühlung der oberflächennahen Luftschichten führen und gleichzeitig die Temperatur des Oberflächenwassers verringern.
- Zweitens ist ein Großteil des heutigen Tiefenwassers bereits vor Beginn der Industrialisierung entstanden. Das heißt, diese Wassermassen enthalten bislang nur

Kohlenstoff aus natürlichen Kohlendioxidquellen – und noch keine Anteile aus vom Menschen verursachten Emissionen. Aus diesem Grund besitzt das Tiefenwasser noch genügend Pufferkapazitäten, um zusätzliches Kohlendioxid aufzunehmen und dazu beizutragen, schwer vermeidbare Kohlendioxidemissionen des Menschen zu kompensieren (weiterführende Erläuterungen in Kapitel 2).

- Drittens ist das Säurebindungsvermögen des Tiefenwassers – die sogenannte Alkalinität – in einigen Meeresregionen höher als jene des Oberflächenwassers. Künstlicher Auftrieb würde dort zu einer Alkalinitätssteigerung im Oberflächenwasser führen, was eine verstärkte Aufnahme von Kohlendioxid erlaubt, die damit verbundene Versauerung jedoch abpuffern würde (weiterführende Erläuterungen in Kapitel 2).

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



6.5 > Das spanische Forschungsschiff „Sarmiento de Gamboa“ mit einer Wellenpumpe. Sie wurde im November 2022 zu Test- und Forschungszwecken in einem Meeresgebiet südlich Gran Canarias ausgelegt. Der dunkle Auftriebsschlauch ist dabei zunächst um den gelben Schwimmkörper gewickelt und entrollt sich erst, wenn das Bodengewicht in die Tiefe sinkt.

hievt. Ein Bodengewicht hält den Schlauch dabei senkrecht in der Wassersäule.

Als Wissenschaftler aus Deutschland eine solche Wellenpumpe mit einer Schlauchlänge von 30 Metern und einem Durchmesser von 0,4 Metern vor der Küste Gran Canarias einsetzten, erzeugte sie einen Aufwärtsstrom von circa 35 Kubikmeter Wasser pro Stunde. Bei Wellenfrequenzen und Wellenhöhen, wie sie typisch für ozeanische Regionen in niederen bis mittleren Breiten sind, lassen sich mit größer dimensionierten Pumpen dieser Art maximale Durchflussraten von ein bis zwei Kubikmeter Wasser pro Sekunde erzeugen. Um eine substantielle klimawirksame Leistung zu erreichen, müsste jedoch mindestens eine Million Kubikmeter Tiefenwasser pro Sekunde an die Oberfläche gepumpt werden.

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

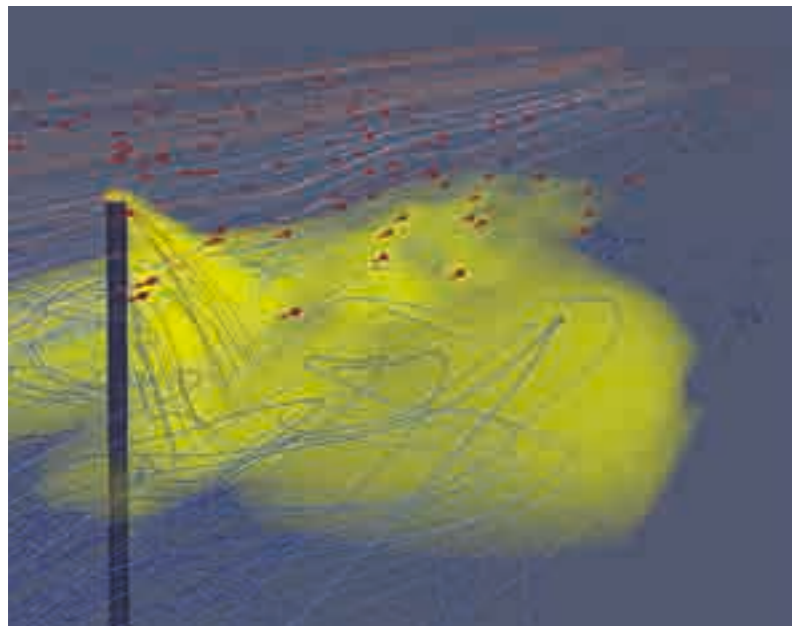
Sollten Verfahren zum künstlichen Auftrieb großflächig eingesetzt werden, entstünde zudem ein beträchtlicher Wartungsaufwand, denn die senkrecht im Wasser stehenden Pumpen wären rund um die Uhr enormen Belastungen ausgesetzt. Ein Problem wären beispielsweise die unterschiedlich starken Strömungen je nach Wassertiefe. Sie alle würden im unterschiedlichen Maß an der Pumpe zerren und das Material kontinuierlich strapazieren, vor allem in strömungsreichen Meeresregionen wie den subtropischen Wirbeln. Welche Folgen das haben kann, erlebten Forschende aus Deutschland beim ersten Testlauf einer neu entwickelten Wellenpumpe im November 2022. Drei Stunden nach dem Aussetzen der 200 Meter langen Pumpe löste sich deren Bodengewicht aus seiner Halterung und sank. Die Wellenpumpe versagte daraufhin ihren Dienst.

Einmal düngen oder besser dauerhaft?

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

Erste Ergebnisse aus Experimenten im Rahmen des EU-Forschungsprojektes „Ocean artUp“ deuten darauf hin, dass die biologische Kohlenstoffpumpe leistungsfähiger wird, wenn ein Wasserkörper kontinuierlich mit Nährstoffen versorgt wird. Das wiederum würde bedeuten, dass die Pumpen im Falle eines gezielten Einsatzes mit den Wassermassen mittreiben müssten – eine Voraussetzung, die viele Risiken für Mensch und Umwelt mit sich brächte und obendrein noch logistische und rechtliche Probleme.

6.6 > Das Aufsteigen des Tiefenwassers und sein anschließendes Verhalten in der Deckschicht des Meeres simulieren Forschende mithilfe verschiedener Strömungsmodelle. Diese Modell-Abbildung zeigt, wie das kalte, nährstoffreiche Wasser (gelb) aus der Pumpe aufsteigt, dann sofort in mittlere Tiefen absinkt und sich dort verteilt.



6.7 > In norwegischen Lachsfarmen kommen elektrisch betriebene Propellerpumpen zum Einsatz, um künstlichen Auftrieb zu erzeugen. Dieser zielt darauf ab, die Lachse mit sauerstoffreichem und im Winter vor allem wärmerem Tiefenwasser zu versorgen, damit sie schneller wachsen.

Simulationen von künstlichem Auftrieb in Strömungsmodellen lassen zudem vermuten, dass sich das emporgepumpte nährstoffreiche Tiefenwasser nicht gleichmäßig an der Meeresoberfläche verteilt. Stattdessen sinkt es aufgrund seiner kühleren Temperatur und der daraus resultierenden höheren Dichte wahrscheinlich in mittlere Tiefen ab, wo dem Phytoplankton dann aber nicht mehr genügend Sonnenlicht zur Verfügung steht, um viel Fotosynthese zu betreiben.

Über den Erfolg von künstlichem Auftrieb entscheidet außerdem der Nährstoffgehalt des Tiefenwassers. Dieser kann sehr unterschiedlich sein, je nachdem, in welchem Meeresgebiet der Pumpeneinsatz erfolgt und aus welcher Tiefe das Wasser nach oben verfrachtet wird. Welche Nährstoffkonstellation die Kohlendioxidaufnahme des Meeres am effizientesten verstärkt, ist noch nicht hinreichend erforscht.

Die Folgen für die Ökosysteme des Meeres

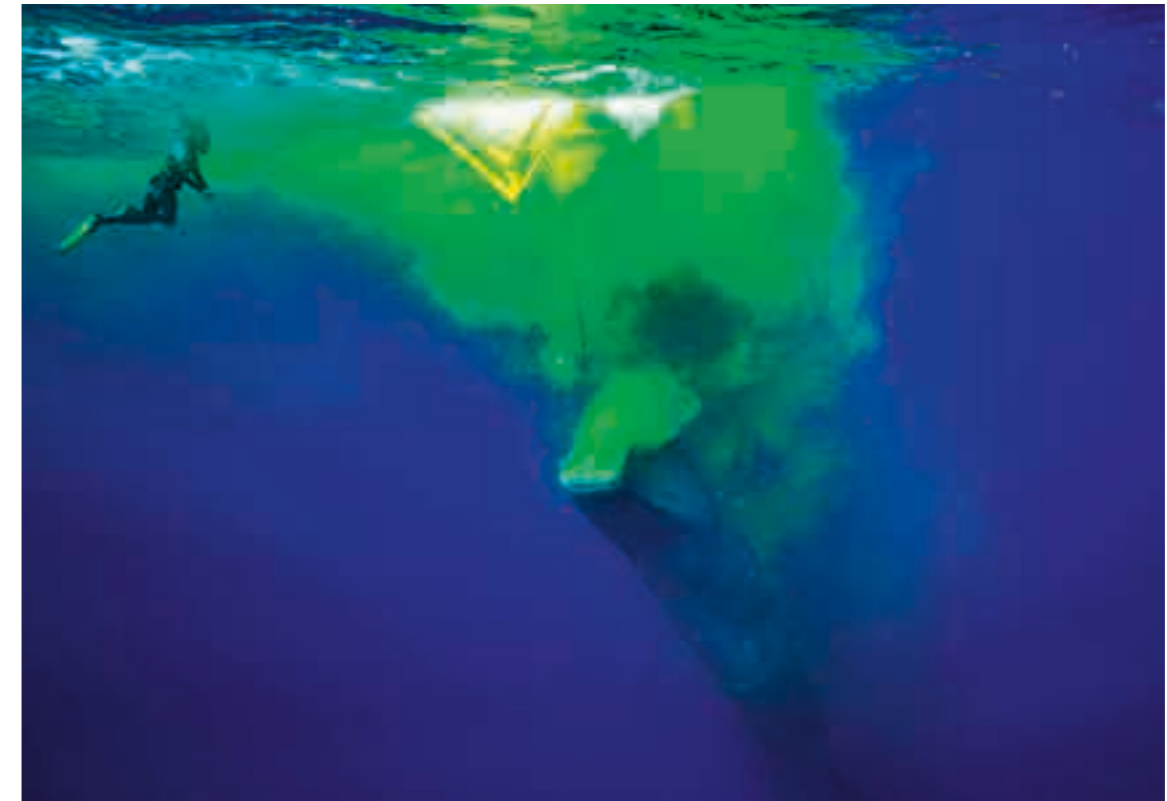
Künstlicher Auftrieb verändert die Nährstoffverfügbarkeit im Oberflächenwasser und somit eine der Säulen des Lebens im Meer. Wie tiefgreifend dieser Wandel sein kann und welche Unterschiede auftreten, haben Forschende durch vergleichende Experimente im Humboldtstrom (natürliches Auftriebsgebiet vor der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

Wie von den Forschenden erwartet, veränderten alle drei Parameter das Wachstum und die Artenzusammensetzung der Algen. Die stärksten Algenblüten entstanden, wenn viel Tiefenwasser heraufbefördert wurde, dieses viel Silikat enthielt und das Oberflächenwasser einmalig damit gedüngt wurde. Unter diesen Voraussetzungen lagerten die Algenblüten sogar besonders viel Kohlenstoff in ihre Biomasse ein. Kohlenstoff-Überkonsum nennen Fachleute dieses Phänomen.

Zur Überraschung des Forscherteams aber führten die zusätzlich gebildete Algenbiomasse und ihre vorteilhaften Eigenschaften bei den Experimenten vor Gran Canaria nicht automatisch zu einer Erhöhung des Kohlenstofftransportes in die Tiefe. Die zusätzlich gebildete Algenbiomasse wurde kaum vom Zooplankton und anderen Meeresorganismen gefressen. Das heißt, anders als im Humboldtstrom, dessen Lebensgemeinschaften an Nährstoffreichtum gewöhnt sind, fiel vor Gran Canaria sowohl die erhoffte Weitergabe des gebundenen Kohlenstoffs im Nahrungsnetz aus als auch die beschleunigende Wirkung des Zooplanktonfraßes auf den Tiefentransport. Stattdessen sank die im Oberflächenwasser gebildete kohlenstoffreiche Biomasse nur langsam ab und wurde von Mikroorganismen abgebaut, noch bevor sie große Tiefen erreichen konnte.

Eine Erklärung für diese Beobachtungen könnte die kurze Dauer der Experimente sein. Sie ließ der an Nährstoffmangel gewöhnten Lebensgemeinschaft vor der Küste Gran Canarias nur unzureichend Zeit, sich an das plötzlich zunehmende Nahrungsangebot anzupassen. Die Meeresorganismen waren deshalb nicht in der Lage, den plötzlichen Futterüberschuss zu verwerten und die gut gepanzerten Kieselalgen und andere große Algenarten zu vertilgen, sagen die Forschenden. Eine wichtige Erkenntnis, denn ähnliche Resultate erwarten die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen künftig für den Einsatz ortsfester Auftriebspumpen in nährstoffarmen Meeresregionen. Das Oberflächenwasser würde an diesen fest installierten Pumpen vorbeiströmen und nur einmalig einen Nährstoffpuls erfahren, was die Planktongemeinschaften vermutlich vor die gleichen Probleme stellen wird wie bei den Experimenten vor Gran Canaria.

Außerdem fehlen weiterhin Antworten auf die Fragen, welche Risiken für das Leben im Meer mit künstlichem Auftrieb einhergehen und wie lange es zum Beispiel dauern würde, bis sich nach der Inbetriebnahme einer oder mehrerer Pumpen das lokale Ökosystem vollständig angepasst hätte und in der Lage wäre, die maximale Menge Kohlenstoff zu binden und in die Tiefe zu exportieren. Experten vermuten, dass zunehmende Algenblüten unter Umständen zu Nährstoffknappheit und verringerter Lichtdurchlässigkeit im Oberflächenwasser führen würden sowie zu einem steigenden Sauerstoffmangel in mitt-



6.8 > Beim Wellenpumpentest vor Gran Canaria leiten die Wissenschaftler eine ungiftige grellgrüne Flüssigkeit aus Meerwasser und dem Farbstoff Uranin in den Auftriebschlauch, um erkennen zu können, wie sich das Tiefenwasser an der Meeresoberfläche verteilt. Technische Probleme lassen das Experiment am Ende scheitern.

leren Tiefen – dort, wo Mikroorganismen die herabsinkende Biomasse zersetzen würden.

Auch muss untersucht werden, welche Auswirkungen ein zunehmender Transport kohlenstoffreicher Biomasse auf die Ökosysteme im tiefen Ozean haben könnte und wie die Tiefseelebensgemeinschaften auf mögliche Veränderungen der Temperatur und Wassermassen-Schichtung reagieren. Entsprechende Experimente, Laborstudien und Computersimulationen führen Wissenschaftler im Rahmen der deutschen Forschungsmission „CDRMare“ durch, deren Ergebnisse jedoch erst im Laufe des Jahres 2024 vorliegen werden.

Ein unklarer rechtlicher Rahmen

Die rechtlichen Rahmenbedingungen eines Einsatzes von künstlichem Auftrieb sind bislang noch überhaupt nicht klar definiert. Es stellt sich zum Beispiel die Frage, ob das Ausbringen vieler Auftriebspumpen gegen derzeit geltendes Recht verstoßen würde oder ob ein Einsatz über-

haupt genehmigungspflichtig wäre – und wenn ja, wer unter welchen Bedingungen eine solche Genehmigung erteilen dürfte. Bedacht werden muss auch, dass es sich bei künstlichem Auftrieb um eine Aktivität im Meer handelt, die rechtlich in den Regelungsrahmen des Seevölkerrechts fällt, in der Sache aber auf die Erhöhung des Kohlendioxid-Aufnahmepotenzials des Ozeans abzielt und somit ein Klimaschutzrechtliches Ziel verfolgt. Solche neuen Meeresnutzungspläne berücksichtigt das Seevölkerrecht bislang noch nicht.

Aus diesem Grund überprüfen Rechtswissenschaftler derzeit die juristischen Rahmenbedingungen großangelegter Pumpeneinsätze zur Steigerung der Kohlendioxidaufnahme des Meeres. Relevante Konventionen und Prinzipien sind hierbei das internationale Londoner Protokoll sowie das deutsche „Gesetz über das Verbot der Einbringung von Abfällen und anderen Stoffen und Gegenständen in die Hohe See“. Darüber hinaus analysieren die Fachleute, inwiefern Einsätze zum künstlichen Auftrieb völkerrechtlich reguliert werden könnten, wel-

che Entscheidungsbefugnisse einzelne Staaten besitzen und auf welche Weise Maßnahmen zum künstlichen Auftrieb in das internationale Meeresumweltschutz- und Klimaschutzrecht integriert werden können, ohne andere Formen der Meeresnutzung sowie Belange des Umwelt- und Artenschutzes zu gefährden. Dabei wollen die Forscherinnen und Forscher herausfinden, welche Änderungen der rechtlichen Übereinkommen und Prinzipien vorgenommen werden müssten, um ein angemessenes Regelwerk für die Steuerung des künstlichen Auftriebs zu schaffen (mehr zu rechtlichen Rahmenbedingungen in Kapitel 9).

Wachstumshilfe für Großalgen

Angesichts des vergleichsweise geringen Kohlendioxid-Entnahmepotenzials, der doch zahlreichen immensen

Wissenslücken und des darüber hinaus enormen technischen und logistischen Aufwandes, der notwendig wäre, um künstlichen Auftrieb im industriellen Maßstab umzusetzen, gilt es als eher unwahrscheinlich, dass diese Verfahren tatsächlich eines Tages großflächig eingesetzt werden, um die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres zu verstärken. Viel zielführender scheint hingegen ihr Einsatz zu sein, wenn es um die Frage geht, Großalgenfarmen in Küstengewässern mit ausreichend Nährstoffen zu versorgen.

Diese Aussage beruht unter anderem auf Versuchen, die chinesische Forschende im Zeitraum von 2018 und 2020 im Gelben Meer durchgeführt haben, genauer gesagt in der Aoshan-Bucht in der chinesischen Provinz Shandong – einem Zentrum der chinesischen Großalgenproduktion. Dort werden mittlerweile so viele Großalgen angebaut, dass die Menge an Nährstoffen im Oberflächen-

wasser nicht mehr ausreicht und sich daher Krankheiten und Mangelerscheinungen in den Algenbeständen ausbreiten. Die bodennahen Wasserschichten als auch das Porenwasser im Meeresboden hingegen weisen viel zu hohe Nährstoffkonzentrationen auf, weil diese Küstengewässer lange Zeit überdüngt worden sind. Für die Algenkulturen an der Meeresoberfläche sind diese überschüssigen Nährstoffe in der Tiefe jedoch weiterhin außer Reichweite.

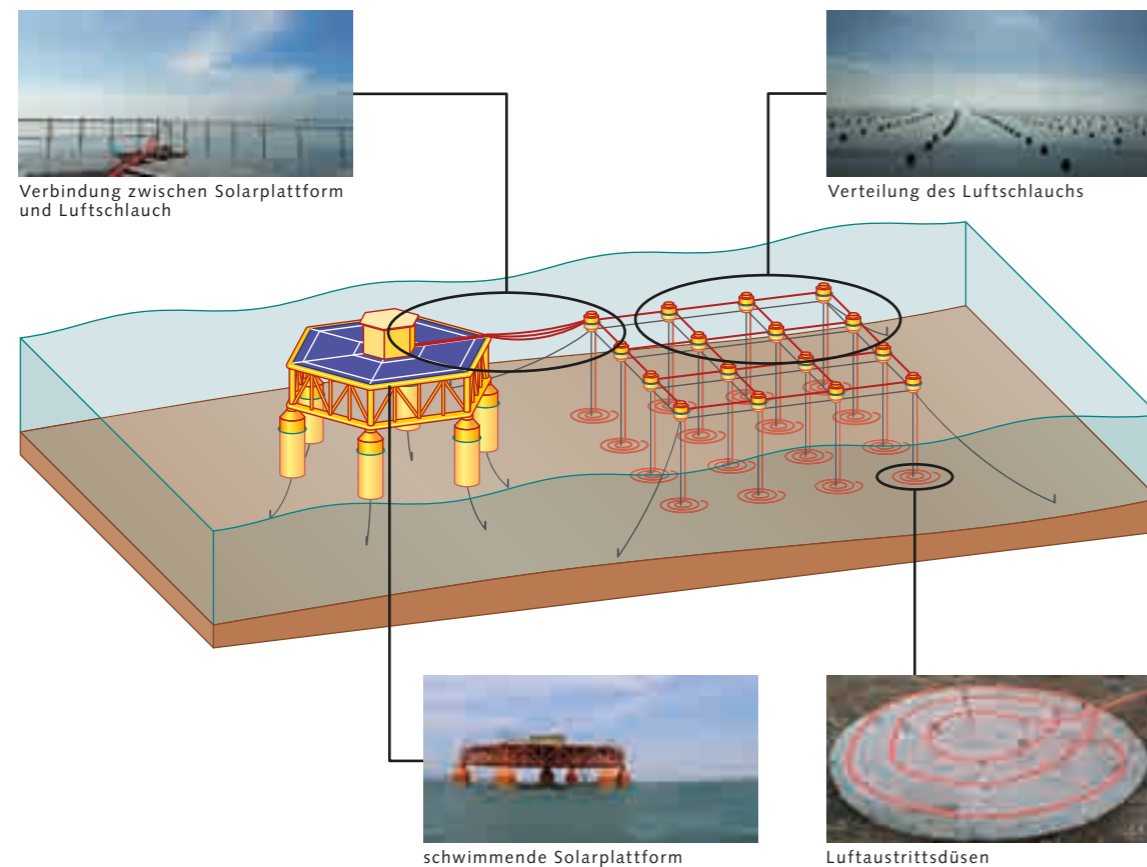
Diese Beobachtung brachte die Wissenschaftler auf die Idee, künstlichen Auftrieb zu nutzen, um das nährstoffreiche Tiefenwasser an die Meeresoberfläche zu transportieren. Den Auftrieb erzeugten sie, indem sie Luft zu einer am Meeresboden verankerten Plattform leiteten und diese dann durch viele kleine Düsen aufsteigen ließen, an jeweils zwei Stunden pro Tag. Die Ergebnisse bestätigten die Arbeitshypothese der Wissenschaftler:

Großalgen, die in der näheren Umgebung der Auftriebsstelle wuchsen, hatten mehr als viermal so viel Biomasse produziert wie Großalgen, die in größerer Entfernung geerntet wurden. Gleichzeitig hatten die Großalgen jede Menge Phosphor und Nitrat aus der Tiefe aufgenommen und auf diese Weise die Wasserqualität der überdüngten Meeresbucht verbessert.

Am richtigen Ort eingesetzt, haben Verfahren zum künstlichen Auftrieb also durchaus das Potenzial, das Algenwachstum und somit die ozeanische Aufnahme von Kohlendioxid zu verstärken und obendrein dazu beizutragen, dass sich der Umweltzustand überdüngter Küstengewässer verbessert. Ob die Verfahren aber tatsächlich jemals eingesetzt werden, um das Wachstum des Phytoplanktons und damit die biologische Kohlenstoffpumpe des Ozeans anzutreiben, erscheint zum aktuellen Zeitpunkt mehr als fraglich.

Schematische Darstellung eines künstlichen Auftriebsystems

6.9 > Mit dieser Anlage, bestehend aus einer solarstrombetriebenen Plattform, Luftschläuchen und vielen Düsen, ist es chinesischen Wissenschaftlern gelungen, in einer überdüngten Meeresbucht nährstoffreiches Tiefenwasser an die Meeresoberfläche zu befördern. Dort wuchsen im Anschluss nicht nur die angebauten Großalgen besser, zeitgleich nahm auch die Überdüngung des Wassers ab.



CONCLUSIO

Künstlicher Auftrieb – Prädikat: „nur bedingt nützlich“

Als künstlicher Auftrieb werden Verfahren bezeichnet, die darauf abzielen, nährstoffreiches Tiefenwasser an die Meeresoberfläche zu transportieren, um dort das Wachstum mikroskopisch kleiner Algen und somit die biologische Kohlenstoffpumpe des Ozeans zu verstärken. Diese würde einen gewissen Anteil der nun neu gebildeten Biomasse in den Tiefen des Ozeans einlagern und den darin enthaltenen Kohlenstoff für einige Jahrzehnte bis Jahrhunderte wegschließen.

Dieses Konzept geht jedoch nur dann auf, wenn durch die zusätzliche Biomasseproduktion mehr Kohlendioxid gebunden und in die Tiefe verlagert wird, als durch das Emporpumpen des zumeist kohlendioxidreichen Tiefenwassers an die Meeresoberfläche in die Atmosphäre entweicht – eine Anforderung, die vermutlich nur unter ganz bestimmten Bedingungen erfüllt werden kann, weshalb das

Potenzial einer zusätzlichen Kohlendioxid-Entnahme eher gering ist.

Ein hohes Maß an Ungewissheit gibt es zudem auch darüber, mit welchen technischen Mitteln künstlicher Auftrieb in einem klimarelevanten Maßstab erzeugt werden kann, welche Risiken die Verfahren für die Meeresumwelt mit sich bringen – hier vor allem für die zahlreichen Lebensgemeinschaften in mittlerer und großer Tiefe des Ozeans – sowie welche regulatorischen Rahmenbedingungen für einen großflächigen Einsatz benötigt werden würden, gerade weil der Einsatz vieler Pumpen andere Formen der Meeresnutzung vermutlich stark einschränken würde.

Sinnvoll und wirtschaftlich lohnenswert erscheint ein Einsatz von künstlichem Auftrieb bislang nur als Hilfsmittel in der Großalgenzucht. Der künstlich erzeugte Nährstoffeintrag aus der Tiefe steigert dabei das Wachstum der Großalgen und trägt dazu bei, dass diese mehr Kohlendioxid aufnehmen und mehr Kohlenstoff in ihrer Biomasse binden.

7 Gezielte Eingriffe in die Meereschemie

> Komplexe Prozesse versetzen den Ozean in die Lage, Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen, einen Großteil des enthaltenen Kohlenstoffs chemisch zu binden und in seinen Wassermassen einzulagern. Je mehr Kohlendioxid das Meer allerdings aufnimmt, desto stärker versauert sein Wasser. Diese Entwicklung jedoch ließe sich umkehren – durch eine gezielte Steigerung des natürlichen Säurebindungsvermögens. Über die Auswirkungen solcher Maßnahmen weiß man bislang allerdings wenig.



Alkalinitäts-erhöhung: Verfahren in den Kinderschuhen

> Wie viel Kohlendioxid der Ozean aufnehmen kann, ohne dabei stark zu versauern, hängt von der Alkalinität seines Oberflächenwassers ab. Hinter diesem Begriff verbirgt sich die Menge säurebindender Bestandteile mineralischer Herkunft, die zuvor aus verwittertem Gestein gelöst und in das Meer eingetragen wurden. Die Frage lautet nun: Könnte ein gezielter Eintrag von Mineralien helfen, die Kohlendioxidaufnahme des Ozeans zu steigern, ohne die Chemie und das Leben im Meer aus dem Gleichgewicht zu bringen?

Die Gesetze der Meereschemie

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

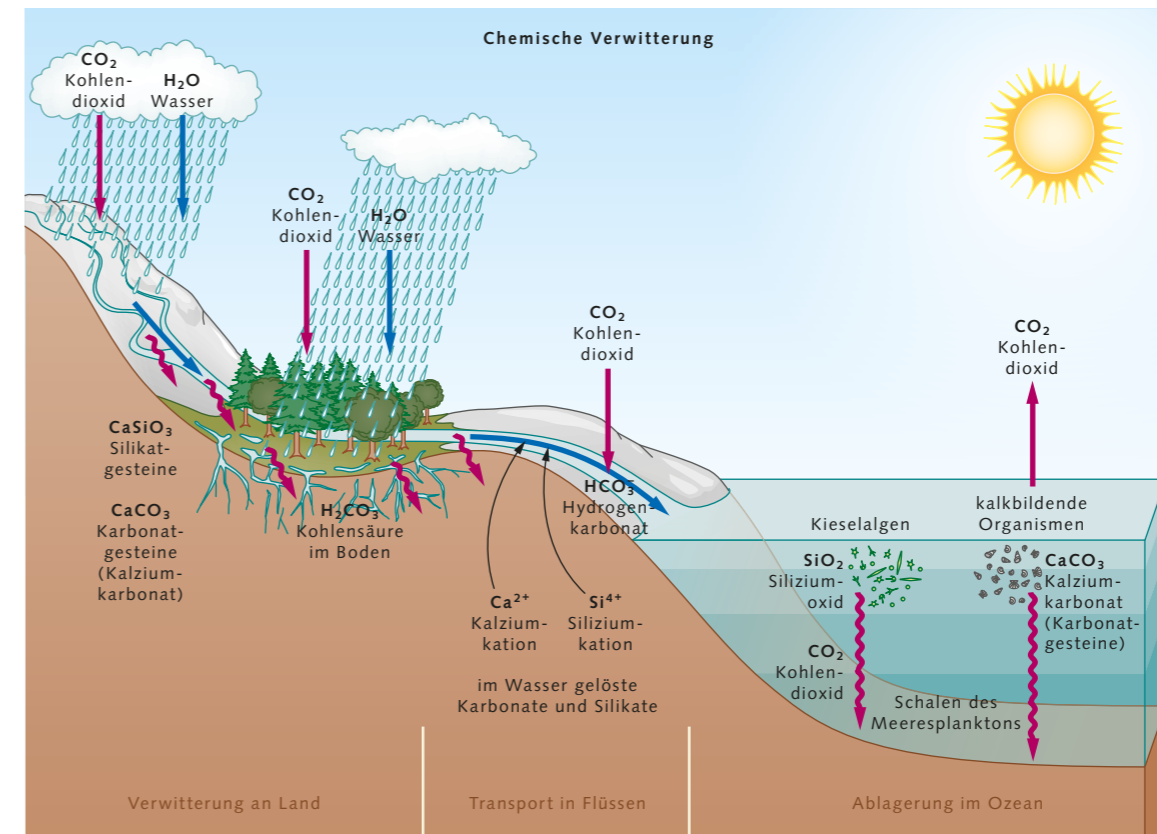
Die Kohlendioxidaufnahme des Ozeans erfolgt an der Meeresoberfläche und ist deshalb möglich, weil zwischen dem Oberflächenwasser und der Atmosphäre ein ständiger Gasaustausch stattfindet. Durch diesen werden etwaige Druckunterschiede zwischen dem im Meerwasser gelösten Kohlendioxid und dem Kohlendioxid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

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

Allerdings entstehen im Zuge dieser Reaktionskette auch sogenannte Protonen (Wasserstoffkationen), die den Ozean versauern lassen, wenn sie freigesetzt werden. In welchem Umfang sie freigesetzt werden, hängt vom Säurebindungsvermögen des Wassers ab – dem sogenannten Alkalinitätsgrad. Die Alkalinität des Meerwassers wird in erster Linie durch die Menge säurebindender Bestandteile mineralischer Herkunft bestimmt (Hydrogenkarbonat, Karbonat und andere), die zuvor im Laufe vieler Jahrmillionen aus verwittertem Gestein an Land gelöst und vom Regenwasser über Bäche und Flüsse in das Meer eingetragen wurden. Gestein verwittert aber auch direkt am oder im Meer: Die langsam erodierenden Kreidelfelsen an der Küste der Ostseeinsel Rügen stellen ein anschauliches Beispiel dar. Mit etwas Glück können Besucher hier live mit ansehen, wie Regen, Wind und Wellen Kreidereste (mürber Kalkstein) aus der Felswand waschen und die reaktionsfreudigen Mineralien anschließend im küstennahen Wasser verteilen.

Ist der Anteil solcher säurebindenden Lösungsprodukte der Gesteinsverwitterung im Meerwasser hoch, wird eine Vielzahl der sauer wirkenden Protonen gar nicht erst freigesetzt, sondern im Zuge der Kettenreaktion sofort durch die eingetragenen Minerale gebunden. Das bedeutet, die Versauerung des Wassers wird abgepuffert.

7.1 > Hunderte Fischer beteiligten sich im September 2009 an einem Protest gegen die zunehmende Ozeanversauerung vor der Südküste Alaskas. Die kalten Gewässer Alaskas nehmen besonders viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und versauern daher in besonderem Maß.



Enthält das Wasser jedoch nur wenige Minerale, ist sein Säurebindungsvermögen begrenzt. Die Zahl der freien Protonen steigt, und das Meer versauert zunehmend, was eine Verschlechterung der Lebensbedingungen für viele Meeresbewohner bedeutet (ausführliche Informationen in Kapitel 2).

Die Idee: Eine Beschleunigung der natürlichen Verwitterung

Die Gesteinsverwitterung und damit einhergehende Lösung der enthaltenen Minerale im Meer sind vergleichsweise langsam ablaufende natürliche Prozesse und beeinflussen das Klima der Erde über Zeiträume von Tausenden Jahren und mehr. Pro Jahr entfernen sie schätzungsweise 1,1 Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre. Diese Menge entspricht im langzeitlichen Mittel etwa jener Menge Kohlendioxid, die durch vulkanische Aktivität sowie durch Mineralisierungsprozesse im Erdmantel und

im Ozean in die Atmosphäre gelangt. Um diese Kohlendioxid-Entnahme zu steigern und so unvermeidbare Kohlendioxid-Restemissionen der Menschheit auszugleichen, müsste die natürliche Verwitterung etwa um den Faktor 5 beschleunigt werden. Ein Rechenbeispiel: Würde der Mensch die Alkalinität in den oberen 50 Metern des Weltozeans um 0,25 Prozent oder fünf Millimol pro Kubikmeter Wasser erhöhen, würde die veränderte Meereschemie zu einer Aufnahme von einer Milliarde Tonnen Kohlenstoff führen. Das entspräche rund 3,7 Milliarden Tonnen Kohlendioxid und damit einem Zehntel der globalen Kohlendioxidemissionen aus fossilen Quellen im Jahr 2022.

Modellstudien zufolge wäre eine gezielte Alkalinitäts-erhöhung des Ozeans durch eine beschleunigte natürliche Gesteinsverwitterung durchaus möglich. Dazu müssten säurebindende Mineralien zusätzlich in das Meer eingetragen werden. Entsprechende Verfahren werden im Englischen als Ocean Alkalinity Enhancement bezeichnet – übersetzt: marine Alkalinitäts-erhöhung.

7.2 > Der Alkalinitätsgrad des Meerwassers wird durch zwei grundlegende Prozesse bestimmt: zum einen durch den Eintrag von im Wasser gelösten, säurebindenden Lösungsprodukten der Gesteinsverwitterung; zum anderen durch die natürliche Aufnahme und Weiterverarbeitung dieser Lösungsprodukte durch Meeresbewohner wie kalkbildende Organismen (Karbonate) oder aber Kieselalgen (Silikate). Bei der Kalkbildung (CaCO_3) wird ein Teil des vorher gebundenen Kohlendioxids (CO_2) wieder freigesetzt.

Kalkstein

Als Kalkstein werden Sedimentgesteine bezeichnet, die hauptsächlich aus den Mineralen Kalzit und Aragonit bestehen und damit aus Kalziumkarbonat (CaCO_3). Der überwiegende Teil der Kalksteine ist biogenen Ursprungs, das heißt, er wurde von Lebewesen wie Muscheln oder Korallen gebildet und abgelagert. Kalkstein kann aber auch durch chemische Prozesse aus dem Wasser ausgefällt werden.

Der Muschelschalen-Trick der nordamerikanischen Ureinwohner

Die Ureinwohner an der Westküste Nordamerikas nutzen seit Jahrtausenden eine natürliche Form der Alkalinitätssteigerung, um ihre Muschelzucht voranzutreiben. Für diese Zucht haben sie eine besondere Technik entwickelt – die sogenannte Muschelgärtnerei. Dazu errichten die Muschelzüchter in Meeresbuchten Mauern aus Geröll und Gestein entlang der Niedrigwasserlinie. Strömt nun bei Flut Brandungswasser über diese Mauer, verfangen sich Sedimente, Schluff, Sand und Kies dahinter, setzen sich am Boden ab und bilden im Laufe der Zeit eine Art Terrasse. Im Sediment dieser Terrasse siedeln sich dann einheimische Muscheln an.

Um deren Wachstum zu fördern, verteilen die Ureinwohner seit Generationen zerbrochene Muschelschalen auf ihren Terrassen und arbeiten diese in das Sediment ein. Die Schalen bestehen aus Kalziumkarbonat, einem säurebindenden Mineral. Es erhöht den pH-Wert des Porenwassers, wovon vor allem der versauerungsempfindliche Muschelnachwuchs profitiert. Außerdem dienen die kalkhaltigen Schalenreste den jungen Muscheln gewissermaßen als Baustofflager.

Das Resultat kann sich sehen lassen. Auf den mit Muschelschalen gekalkten Terrassen wachsen viermal so viele einheimische Buttermuscheln (*Saxidomus gigantea*) und mehr als doppelt so viele Venusmuscheln der Art *Leukoma staminea* wie an einem naturbelassenen Küstenabschnitt. Zudem wachsen die Schalentiere schneller, was nicht nur an der Kalkzugabe, sondern auch an anderen Effekten liegt, welche die Terrassengärten hervorrufen. Muschelfischer in anderen Teilen Nordamerikas setzen mittlerweile ebenfalls alkalinitätssteigernde Methoden ein, um versauerungsbedingte Produktionsverluste zu verhindern. Wie viel zusätzliches Kohlendioxid die Muschelgärten der Ureinwohner der Atmosphäre jedoch entnehmen, ist noch nicht gemessen worden.



7.3 > In den Muschelgärten der Westküsten-Ureinwohner wachsen einheimische Muschelarten schneller und in höherer Dichte als an Küstenabschnitten ohne künstliche Terrassierung und zusätzlichen Kalkeintrag.

Ein solcher Eingriff in die Meereschemie hätte den Vorteil, dass der Ozean mehr Kohlendioxid aufnehmen könnte, ohne dabei weiter zu versauern. Zugleich ließe sich in Meeresregionen mit einer hohen Ozeanversauerung dieser für viele Meeresorganismen schädliche chemische Prozess umkehren, was die Wiederherstellung von Korallenriffen und Muschelbänken erleichtern könnte. Feldexperimente zur Reduktion der Ozeanversauerung wurden bereits im australischen Great Barrier Reef sowie an der Küste Floridas durchgeführt. In den Studien konnten Forscherinnen und Forscher nachweisen, dass sowohl Muscheln als auch Steinkorallen ihre Kalkbildung steigern, wenn der Versauerungsgrad des Umgebungswassers durch eine gezielte Alkalinitätssteigerung reduziert wird.

Der gesamte Ozean als Kohlenstoffspeicher

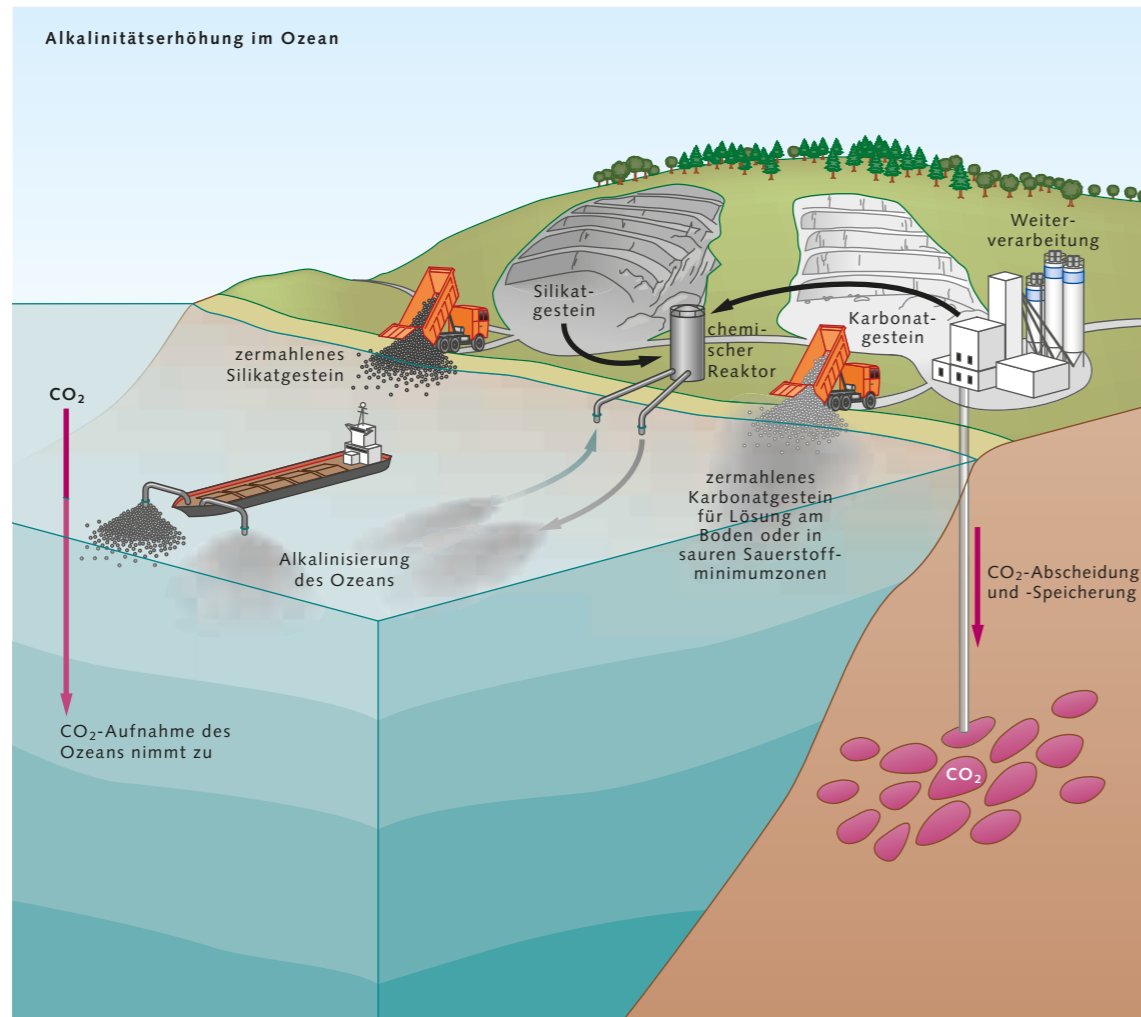
Als Folge der Alkalinitätssteigerung kann das Oberflächenwasser mehr Kohlendioxid aufnehmen, welches chemisch gebunden und anschließend vor allem in Form von Hydrogenkarbonat gespeichert wird. Die im Oberflächenwasser gelösten Hydrogenkarbonate und weitere Lösungsprodukte der Verwitterung werden von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

Bislang steigt in den sogenannten Auftriebsgebieten der Erde kontinuierlich Wasser an die Meeresoberfläche, dessen Alkalinität noch nicht vom Menschen erhöht wurde. Es besäße daher noch das volle Aufnahmepotenzial für eine gezielte Erhöhung der Alkalinität und die daraus resultierende Kohlendioxidaufnahme. Und selbst wenn eines Tages Wassermassen wieder an die Oberfläche steigen werden, die bereits vom Menschen freigesetztes Kohlendioxid in Form von gelöstem Kohlendioxid oder aber Hydrogenkarbonat gespeichert haben, so bleiben die Hydrogenkarbonate im Wasser erhalten, über einen Zeitraum von bis zu 100 000 Jahren. Das heißt, der in ihnen



7.4 > Eingefärbtes und mit Kohlendioxid angereichertes Meerwasser verteilt sich über Korallen, die in einem Flachwasserbereich des australischen Great Barrier Reef wachsen. In diesem ersten Feldexperiment zur Ozeanversauerung konnten Forschende belegen, dass die Versauerung das Wachstum der Korallen hemmt.

7.5 > Für zwei der vielversprechenden Verfahren zur Alkalinitäts-erhöhung des Ozeans müssten Kalk- oder Silikatgestein an Land abgebaut und zu Gesteinspulver zermahlen werden. Die dabei entstehenden Kohlendioxid-emissionen müssten abgeschieden und gespeichert werden – anderenfalls wären die Methoden kaum klimawirksam.



gebundene Kohlenstoff könnte nicht in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre ausgasen. Entweichen würde nur das gelöste Kohlendioxid.

Die Kalkbildung als Gegenspieler

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

Kalkbildung wiederum ist der umgekehrte Prozess der Verwitterung. Bei dieser chemischen Reaktion werden im Wasser gelöste Hydrogenkarbonate verbraucht, wodurch sich die Alkalinität des Meerwassers verringert. Gleichzeitig aber wird bei der Kalkbildung Kohlendioxid freigesetzt, was zur Folge hat, dass die Kohlendioxidkonzentration im Umgebungswasser steigt. Beim nächsten Kontakt mit der Meeresoberfläche kann dieses gelöste Kohlendioxid in die Atmosphäre entweichen. Das heißt, durch die Kalkbildung wird einst im Ozean gespeicherter Kohlenstoff wieder in ein Treibhausgas umgewandelt und damit erneut klimarelevant.

Kalk wird im Meer aber nicht allein durch Muscheln, Korallen und Kalkalgen gebildet. Er kann auch infolge

einer chemischen Reaktion als sogenanntes Sekundärmineral ausfallen. Werden Wassermassen zu oft alkalisiert oder zu viele säurebindende Mineralien auf einmal in einen Wasserkörper eingetragen, kann dies zu einer Übersättigung des Meerwassers führen. Infolgedessen fallen abhängig vom Ausgangsmaterial Sekundärminerale wie Karbonate oder Silikate aus. Das heißt, es bilden sich spontan feste Kalk- oder Silikatpartikel. Bei der Ausfällung von Karbonaten wird Kohlendioxid freigesetzt. Fachleute gehen deshalb davon aus, dass die Ausfällung von Sekundärmineralien infolge einer Mineralübersättigung die Wirksamkeit der Alkalinitäts-erhöhung als Kohlendioxid-Entnahmeverfahren beschränken und unter Umständen sogar völlig aufheben kann.

Sie ziehen deshalb zwei Lehren aus den Gesetzen der Meereschemie: Im Falle einer gezielten Alkalinitäts-erhöhung des Meerwassers müsste erstens genau überlegt werden, welche Minerale in welcher Menge und in welcher Form (als Gesteinsmehl oder alkalische Lösung) wo im Meer eingetragen werden können, um kritische Schwellenwerte nicht zu überschreiten und eine Übersättigung und anschließende Karbonatausfällung zu verhindern. So weiß man zum Beispiel, dass in Meeresgebieten, in denen Wind, Wellen und Strömungen das Oberflächenwasser gut durchmischen, die Wahrscheinlichkeit einer kritischen Übersättigung geringer ist als in Gebieten, in denen das eingetragene Mineral in hoher Konzentration an der Meeresoberfläche verbleibt. Eine gute Durchmischung wäre zum Beispiel in Küstengebieten oder im offenen Ozean gegeben.

Zweitens könnte die Alkalinitäts-erhöhung als Maßnahme zur Steigerung der natürlichen Kohlendioxidaufnahme des Meeres nicht unbegrenzt wiederholt werden. Sie wäre vermutlich „nur“ für viele Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte wirksam. Dennoch, so Experten, dürfte ein Einsatz über diesen Zeitraum vollkommen ausreichen, um die Restemissionen auszugleichen und damit das Klima zu stabilisieren.

Methoden zur Alkalinitäts-erhöhung

Derzeit werden verschiedene Verfahren entwickelt, mit denen die Alkalinität des Meerwassers erhöht werden könnte. Dazu gehören Überlegungen, natürlich vorkom-

mende Minerale wie Kalkstein und Kreide oder silikathaltige Gesteine wie Basalte und Olivin an Land abzubauen, sie anschließend zu zermahlen, um die Oberfläche für eine Verwitterung (chemische Reaktionen) zu vergrößern, und das Gesteinsmehl an Stränden oder direkt auf dem Meer zu verteilen. Für den gleichen Zweck könnten auch kalzium- oder magnesiumreiche Reststoffe oder Abfallprodukte aus der Zementherstellung verwendet werden. In Betracht kommen zum Beispiel künstlich erzeugte Minerale wie Brandkalk (Kalziumoxid), Löschkalk (Kalziumhydroxid), Periklas (Magnesiumoxid), Brucit (Magnesiumhydroxid) sowie Natriumhydroxid. Brucit und Natriumhydroxid beispielsweise fallen bei der Herstellung von grünem Wasserstoff an und könnten für eine Alkalinitäts-erhöhung genutzt werden. Die Verteilung der Minerale auf dem Meer würde von Schiffen oder Flugzeugen aus erfolgen; an Stränden kämen Streufahrzeuge oder auch Muskelkraft zum Einsatz.

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

7.6 > Basaltgestein bildet sich aus erkal-tender Lava und hat in der Regel einen dunklen Farbton. Dieser Basaltfelsen stammt aus dem Gebirgszug Cascade Mountain Range im US-Bundes-staat Washington.



Elektrochemische Verfahren: Mit Strom die Meereschemie beschleunigen

Mineralien im Meerwasser zu lösen braucht Zeit. Deshalb dauert es unter Umständen mehrere Monate, bis alkalisiertes Meerwasser seine chemische Wirkung entfaltet und zusätzliches Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt. Um diesen Prozess zu beschleunigen, entwickeln einige Fachleute sogenannte elektrochemische Verfahren. Dabei setzen sie auf eine elektrochemische Zelle, durch die Meerwasser geleitet wird. Die Zelle enthält zwei Elektroden. Setzt man die Zelle unter elektrische Spannung, verwandeln sich die Elektroden in eine positiv geladene Anode und eine negativ geladene Kathode. Die Anode zieht Basen an, während die Kathode Säuren anzieht, was zu einem „Säurestrom“ und einem „Basenstrom“ führt. Beide Ströme können verwendet werden, um die Kohlendioxidkonzentration im Meerwasser zu beeinflussen. Je nach Ansatz zielen die Methoden entweder darauf ab, die Alkalinität des Meerwassers zu erhöhen, oder aber Kohlendioxid direkt aus dem Meerwasser zu entnehmen.

Zwei Beispiele:

So könnten elektrochemische Verfahren angewendet werden

Wissenschaftler der Universität von Kalifornien haben ein elektrochemisches Verfahren entwickelt, bei dem im Meerwasser gelöstes Kohlendioxid mit ebenfalls im Wasser befindlichen Kalzium- und Magnesiumkationen reagiert und anschließend mineralisiert. Das heißt, das Kohlendioxid wird chemisch fest gebunden, indem es neues Mineralgestein bildet. Dadurch sinkt der Kohlenstoffgehalt des Wassers insgesamt, sodass es nach der Wiedereinleitung in das Meer wieder neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen kann.

Für diese chemische Bindung wird das Meerwasser durch einen sogenannten Durchflussreaktor geleitet. In seinem Inneren muss das Wasser ein Elektrodennetz passieren, welches das Wasser elektrisch auflädt und seine Alkalinität elektrochemisch erhöht. In diesem Zustand können das im Wasser enthaltene gelöste Kohlendioxid und die mineralischen Bestandteile blitzartig miteinander reagieren. Als Ergebnis dieser Reaktion entstehen zum einen verschiedene Feststoffe wie Kalziumkarbonat – CaCO_3 –, Magnesiumkarbonat – MgCO_3 – und Magnesiumhydroxid – Mg(OH)_2 –, die als mineralische Rohstoffe weiterverarbeitet werden können; zum anderen kohlendioxidarmes Wasser, welches wieder

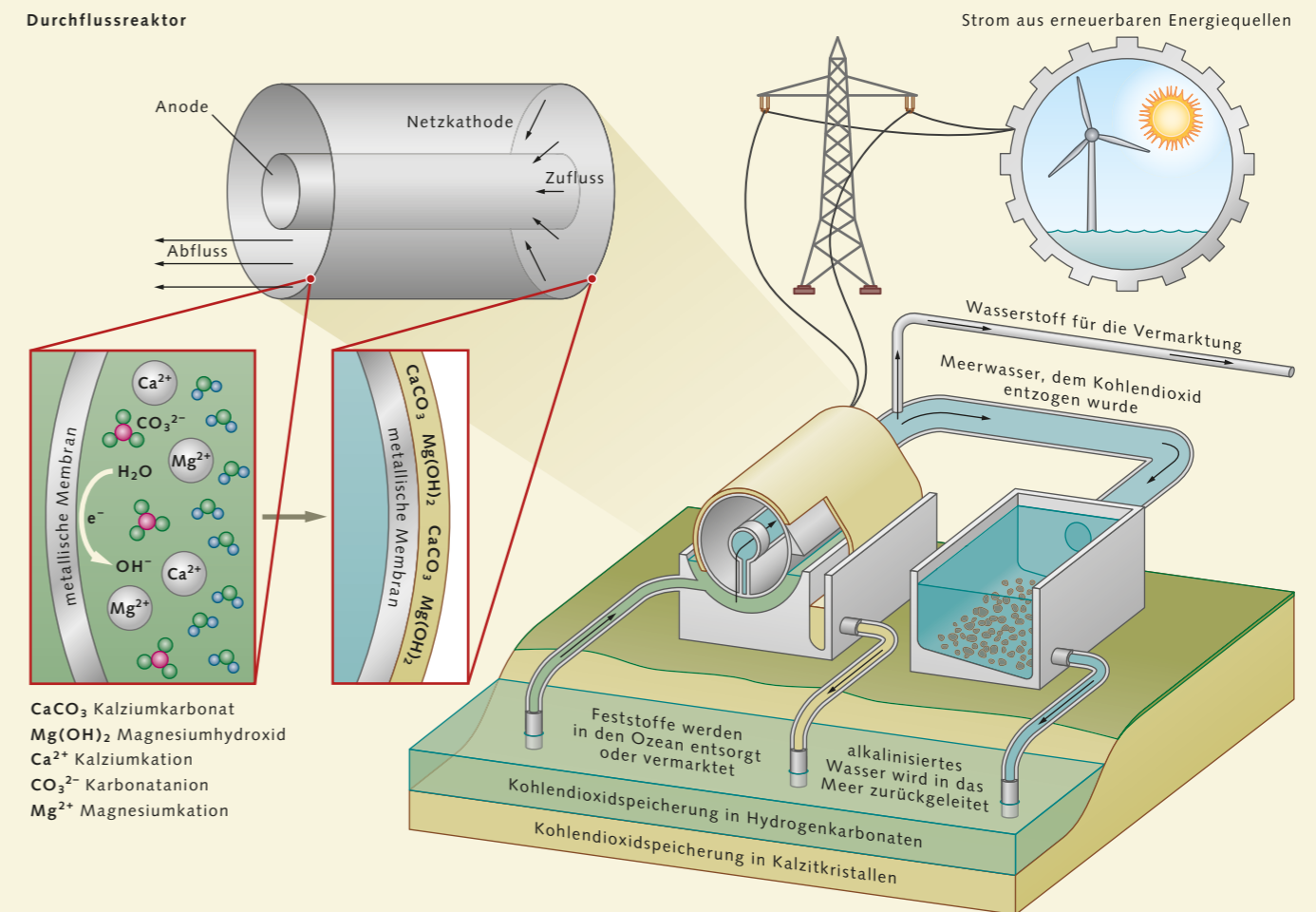
ins Meer geleitet wird. Außerdem wird Wasserstoff produziert, der als erneuerbarer Treibstoff benötigt wird.

Die Forschenden haben zudem berechnet, in welchem Maßstab dieses Verfahren eingesetzt werden müsste, wenn das Ziel lauten würde, pro Jahr zehn Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus dem Meer und damit indirekt aus der Atmosphäre zu entnehmen. Demnach müssten weltweit rund 1800 solcher Anlagen errichtet werden. Die Kosten für den Bau und Betrieb dieser Durchflussreaktoren beliefen sich auf mehrere Billionen US-Dollar. Der benötigte Strom müsste zudem aus erneuerbaren Energiequellen stammen.

Eine deutlich billigere Lösung haben Forschende vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge im US-Bundesstaat Massachusetts gefunden. Sie leiten das Meerwasser in eine elektrochemische Zelle, in der es durch Protonen einer Bismut-Elektrode stark angesäuert wird. Durch diese Versauerung zerfallen die im Wasser enthaltenen Karbonate und Hydrogenkarbonate und geben das in ihnen gebundene Kohlendioxid wieder frei. Es wird anschließend abgesaugt und gesammelt. Das angesäuerte Wasser muss jedoch neutralisiert werden, bevor es in das Meer zurückgepumpt werden kann. Dazu durchläuft es eine zweite Zelle mit umgekehrter elektrischer Spannung, wodurch sich die Protonen aus dem ersten Durchgang wieder zurückgewinnen lassen. Das dann wieder leicht basische Wasser kann im Anschluss wieder neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen. Die Kosten pro Tonne extrahiertem Kohlendioxid belaufen sich auf 56 US-Dollar.

Im Gegensatz zum ersten Verfahren ist das entnommene Kohlendioxid hier jedoch nicht fest in Gestein gebunden, sondern gasförmig und damit hochflüchtig. Es muss demzufolge zu Produkten weiterverarbeitet oder so gelagert werden, dass es nicht mehr in die Atmosphäre entweichen kann. Dafür lässt sich das zweite Verfahren auf einfache Weise in Meerwasserentsalzungsanlagen integrieren, an denen die benötigten Wasser-Ansaug- und -Auslassinstallationen bereits vorhanden sind. Bevor die MIT-Fachleute jedoch eine erste Demonstrationsanlage errichten können, müssen sie noch einige Details verbessern. Eines der Probleme: Im Zuge des Verfahrens fallen Minerale aus und diese verschmutzen die elektronischen Klammern und Elektroden in den Zellen.

Durchflussreaktor



7.7 > Ein Durchflussgenerator bildet das Kernstück eines elektrochemischen Verfahrens, welches Wissenschaftler im US-Bundesstaat Kalifornien entwickelt haben. In dem Generator reagiert im Meerwasser gelöstes Kohlendioxid mit Kalzium- und Magnesiumkationen und mineralisiert. Dadurch sinkt der Kohlenstoffgehalt des Wassers insgesamt, sodass es nach der Wiedereinleitung in das Meer wieder neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen kann.

7.8 > Komplexe Meereschemie: Durch welche chemischen Reaktionen der Eintrag von Kalksteinpulver und dessen anschließende Verwitterung dazu beitragen, die Ozeanversauerung zu reduzieren, ist hier schematisch dargestellt. Die illustrierten Reaktionen würden in karbonatunter-sättigten Gewässern ablaufen, etwa in sauerstoffarmen Gebieten dicht unter der Meeresoberfläche.

zu installieren. In diesen Reaktoren würde das kalzium- oder magnesiumhaltige Gesteinsmehl nach der Zugabe von kohlendioxidangereichertem Wasser besonders schnell verwittern und unter kontrollierten Bedingungen eine alkalische Lösung erzeugen. Diese würde anschließend in das Meer geleitet oder an dessen Oberfläche versprüht werden. Auf diese Weise würde sich vor allem die Konzentration der Hydrogenkarbonate und, je nach verwittertem Gestein, der Anteil an Kalzium, Magnesium oder auch Silikat im Meerwasser erhöhen. All diese Verbindungen sind bereits heute in hohen Konzentrationen im Meerwasser enthalten, sodass die relativen Änderungen durch einen gezielten Mineraleintrag im Bereich weniger Prozente lägen. Die Auswirkungen dieser Konzentrationsänderungen auf die marinen Ökosysteme müssen jedoch noch untersucht werden.

Ob und wie viel zusätzliches Kohlendioxid der Atmosphäre aber am Ende durch eine Alkalinitätserhöhung des Ozeans entnommen werden kann, hängt davon ab, wie viele Emissionen bei den dazu notwendigen Arbeiten freigesetzt werden. Schätzungen zufolge beläuft sich das Entnahmepotenzial alkalinitätssteigernder Verfahren auf 100 Millionen bis eine Milliarde Tonnen Kohlendioxid pro Jahr. Würden diese ozeanweit zum Einsatz kommen – und nicht nur in besonders geeigneten Gebieten –, wäre das Entnahmepotenzial vermutlich sogar noch etwas größer als eine Milliarde Tonnen Kohlendioxid pro Jahr.

Studien weisen jedoch darauf hin, dass die Wirksamkeit der Verfahren auch davon abhängt, in welchen Meeresgebieten und zu welchen Jahreszeiten sie eingesetzt werden, denn die chemischen und physikalischen Ausgangsbedingungen unterscheiden sich regional und sind

saisonalen Änderungen unterworfen. So können starke Oberflächenströmungen die eingetragenen Minerale schnell in Regionen verfrachten, in denen die Alkalinität des Wassers ohnehin schon höher ist und eine zusätzliche Kohlendioxidaufnahme erschwert wird. Oder aber eine starke Durchmischung des Oberflächenwassers durch Wind und Willen führt dazu, dass die Minerale in die Tiefe verlagert werden und so den Alkalinitätsgrad des Oberflächenwassers gar nicht maßgeblich verändern. Fachleute wissen zudem aus Klimasimulationen, dass die Wirksamkeit der Alkalinitätserhöhung mit zunehmender globaler Erwärmung abnimmt. In einer Welt, die sich bis zum Jahr 2100 um mehr als vier Grad Celsius erwärmt, müssten für eine bestimmte zusätzliche Kohlendioxidaufnahme des Ozeans viel mehr Minerale in das Meer eingetragen werden, als dies erforderlich wäre, wenn die globale Erwärmung auf weit unter zwei Grad Celsius begrenzt würde.

Mineralbedarf: Mehrere Kilogramm Kalk pro Person pro Tag

Bisherige Schätzungen gehen davon aus, dass für eine klimawirksame Alkalinitätserhöhung des Oberflächenwassers in der Praxis pro Tonne gebundenen Kohlendioxids eine halbe bis fünf Tonnen Mineralprodukte zum Einsatz kommen müssten. Das Entnahmeverhältnis für Basaltgestein beispielsweise wäre in etwa drei zu eins. Das heißt, drei Tonnen Basaltgestein müssten im Meer verwittern, damit der Ozean der Atmosphäre eine weitere Tonne Kohlendioxid entnehmen kann.

Wie groß der zusätzliche Mineralbedarf einer großflächigen Alkalinitätserhöhung sein könnte, illustriert die folgende Rechnung: Geht man davon aus, dass die Bundesrepublik Deutschland auch im Jahr 2045 noch immer Restemissionen in Höhe von jährlich 60 bis 130 Millionen Tonnen Treibhausgasen ausstoßen wird, entfällt auf jeden einzelnen der 83,2 Millionen Einwohner ein Anteil von 0,7 bis 1,5 Tonnen. Würden nun alle Bürger Deutschlands diese Restemissionen allein durch eine Alkalinitätserhöhung des Ozeans kompensieren wollen, müsste jeder von ihnen pro Tag 6,5 bis 14 Kilogramm Basalt oder fünf bis elf Kilogramm Kalk im Meer auflösen. Auf die Gesamtbevölkerung Deutschlands hochgerechnet, entstünde demzu-

folge ein zusätzlicher Basaltbedarf von 200 bis 416 Millionen Tonnen beziehungsweise ein Kalkbedarf von 150 bis 312 Millionen Tonnen pro Jahr. Würden die Menschen die Kompensation hingegen auf mehrere Kohlendioxid-Entnahmefelder aufteilen, fiel der Mineralbedarf entsprechend kleiner aus.

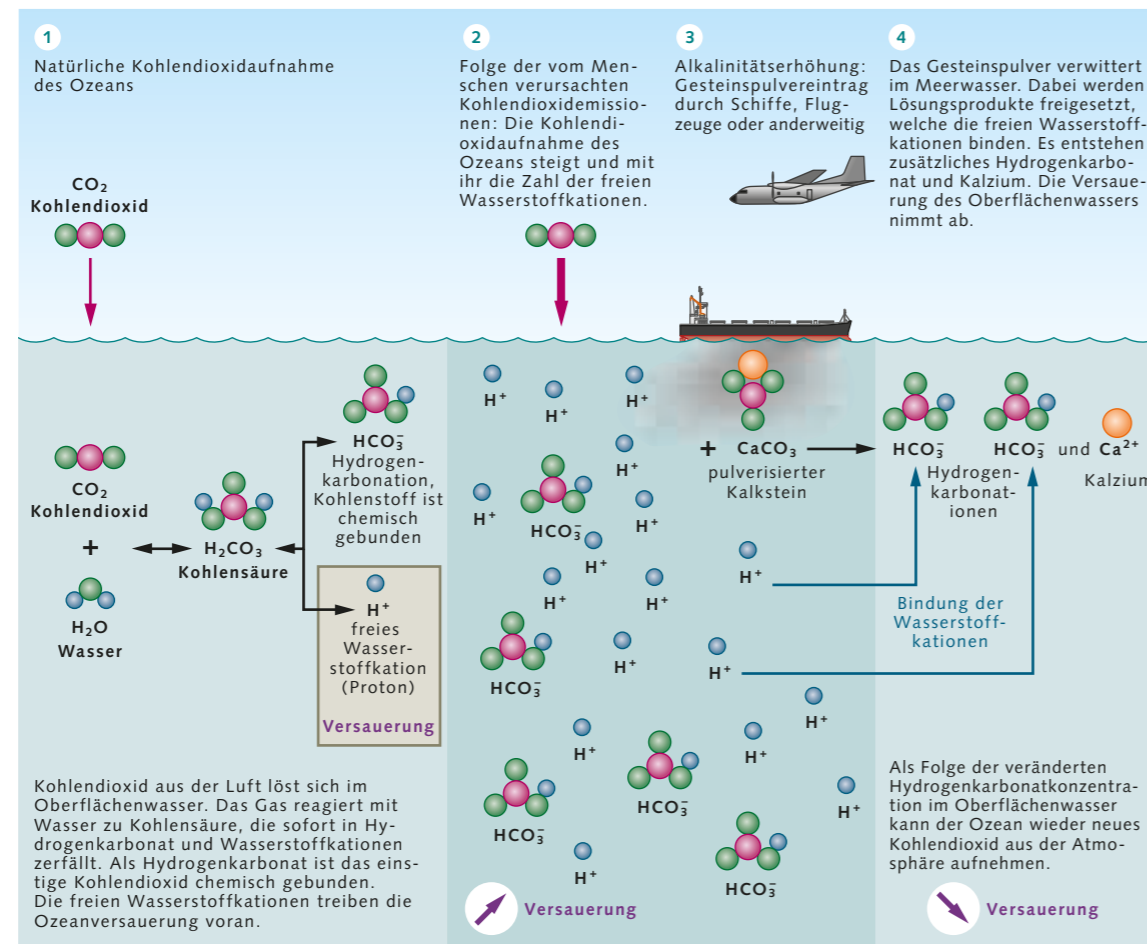
Die gute Nachricht an dieser Stelle lautet: Sowohl Kalkgestein als auch silikathaltige Gesteine wie Basalt und Olivin kommen in einem ausreichenden Maß im Untergrund vor. Letztere sind sogar die häufigsten Gesteine der Erdkruste. Unklar ist bisher allerdings, welcher Energieaufwand und welche Investitionen notwendig sein würden, um die Gesteine im industriellen Maßstab abzubauen, sie zu verarbeiten und an die Küste oder später auf das Meer hinaus zu transportieren – und welche Treibhausgasemissionen bei jedem dieser Einzelschritte entstünden. Eine Studie aus dem Jahr 2013 kam zu dem Ergebnis, dass man 100 Massengutfrachter mit einer Lagerkapazität von jeweils 300 000 Tonnen Trockengewicht bräuchte und diese quasi im Dauereinsatz sein müssten, um jährlich eine Milliarde Tonne Gesteinsmehl auf dem Ozean zu verteilen. Dieser Bedarf entsprach zum damaligen Zeitpunkt vier Prozent der globalen Schiffstransportkapazität.

Alte und neue Ausgangsmaterialien

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

Natürlich vorkommendes Kalk- und Silikatgestein sowie künstlich erzeugte Minerale (Brandkalk, Löschkalk

Grüner Wasserstoff
Für die Herstellung von grünem Wasserstoff wird Wasser mithilfe von elektrischem Strom aus erneuerbaren Energiequellen in seine molekularen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten (Elektrolyse). Die Wasserstoffproduktion ist somit klimaneutral.



etc.) sind jedoch nicht die einzigen Optionen. Forschende testen mittlerweile auch synthetisch hergestelltes Ikaite auf seine Eignung und Verwitterungseigenschaften. Ikaite ist ein sehr seltenes wasserhaltiges Kalziumkarbonat, welches sich in der Natur nur bei Temperaturen von unter 15 Grad Celsius im Meerwasser bildet. Sollte es sich als brauchbar erweisen, könnte es allerdings lediglich in Meeresregionen mit entsprechend kühlen Wassermassen eingesetzt werden.

Labor- oder Feldstudien zu Risiken und Nebenwirkungen fehlen

Ein Großteil des Wissens über die chemischen und biologischen Folgen einer Alkalinitätssteigerung stammt bisher aus Modellstudien (Computersimulationen). Aussagekräftige Labor- oder Feldstudien zu lokalen, regionalen und globalen Auswirkungen eines Mineraleintrages im industriellen Maßstab fehlen. Aus diesem Grund ist bisher auch wenig über mögliche Risiken und Nebenwirkungen eines großflächigen Mineraleintrages bekannt.

Fakt ist, dass der Abbau von Mineralen in Steinbrüchen häufig zu Nutzungskonflikten um das betroffene Land führt, zu Eingriffen in lokale Ökosysteme sowie zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen und einer steigenden Lärm- und Staubbelastung. Zum anderen weiß man, dass Silikatgesteine bestimmte Nährstoffe (Silizium, Eisen) und Schwermetalle (Nickel, Chrom, Zink) enthalten. Erstere können das Wachstum von Kieselalgen und damit marine Nährstoffkreisläufe beeinflussen, wobei einige Fachleute die Hoffnung hegen, dass ein zusätzliches Algenwachstum die biologische Kohlenstoffpumpe ankurbeln würde und der Ozean so zusätzliches Kohlendioxid aufnehmen könnte. Schwermetalle wiederum könnten giftig wirken und somit den Ökosystemen des Ozeans schaden. Es besteht jedoch die Hoffnung, dass sich durch die Herstellung reiner synthetischer Minerale schädliche Nebenwirkungen einer Alkalinitätssteigerung verhindern lassen.

Im Rahmen einer deutschen Forschungsmission untersuchen Wissenschaftler derzeit in verschiedenen Labor- und Mesokosmen-Experimenten, inwiefern der Eintrag mineralhaltigen Materials oder die Verwitterung von Gestein am Meeresboden die Küstenökosysteme der

Nord- und Ostsee beeinflussen würde und bis zu welchen Schwellenwerten sich negative Effekte der Alkalinitätssteigerung für die Lebensgemeinschaften des Meeres verhindern ließen. Dafür analysieren sie, wie Phytoplankton, Zooplankton sowie ausgewählte Organismen, die am oder im Meeresboden leben, auf den zusätzlichen Mineraleintrag reagieren. Besteht zum Beispiel die Gefahr, dass Ruderfußkrebse oder Fischlarven die Mineralpartikel für Futter halten, fälschlicherweise fressen und anschließend mit vollem Magen verhungern? Ausgeschlossen werden kann dies zum jetzigen Zeitpunkt nicht.

Es deutet sich zudem an, dass die Mineralart und -zusammensetzung darüber entscheiden, welche Meeresorganismen von einer Alkalinitätssteigerung profitieren und welche eher nicht. Sind die eingetragenen Minerale zum Beispiel reich an Kalzium, fällt es kalkbildenden Organismen leichter, ihre Skelette und Muschelschalen zu bilden. Sie hätten unter diesen Voraussetzungen einen Wachstumsvorteil, Kieselalgen hingegen das Nachsehen. Enthielte das eingetragene Material hingegen Silikate, würden Kieselalgen zu den Gewinnern zählen, denn sie brauchen diese Mineralien für den Bau ihrer Siliziumschalen. Die Vorteile bei der Kalkbildung brächten jedoch einen entscheidenden Nachteil mit sich: Wo Tiere die eingebrachten Mineralien verwenden, um daraus Schalen oder Skelette zu bilden, wird Kohlendioxid freigesetzt und nicht dem Meerwasser entnommen.

Ihre lokalen Forschungsergebnisse werden die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler anschließend mithilfe numerischer Modelle auf die regionale und globale Ebene hochrechnen und einen Einsatz von Maßnahmen zur Alkalinitätssteigerung in deutschen Hoheitsgewässern und in anderen Meeresgebieten simulieren. Auf diese Weise wollen die Fachleute Risiken identifizieren, kritische Schwellenwerte benennen, Konzepte für Beobachtungs- und Kontrollverfahren testen und entsprechende Handlungsoptionen für die lokale, nationale und internationale Ebene ableiten.

Viel Entwicklungsarbeit wartet auf die Forschenden auch im Hinblick auf die Frage, wie eine durch Alkalinitätssteigerung erzielte Kohlendioxidaufnahme des Ozeans gemessen und überwacht werden soll. Eine Nutzung dieses Verfahrens ist nur sinnvoll, wenn sich die angestrebten Effekte auch messen und dem Mineraleintrag zuschrei-



7.9 > Kalkstein wird in großen Steinbrüchen wie diesem abgebaut. Aus diesem Grund müssen auch mögliche Umweltschäden an Land berücksichtigt werden, wenn überlegt wird, ob Verfahren zur Alkalinitätssteigerung des Ozeans eine erstrebenswerte Klimaschutzmaßnahme wären oder nicht.

Mesokosmen

Die in den Experimenten verwendeten Mesokosmen sind durchsichtige, schlauchähnliche Röhren, die mit Meerwasser gefüllt werden und im Oberflächenwasser treiben. So sind die Organismen in den Röhren den gleichen Umweltbedingungen (Temperatur, Licht etc.) ausgesetzt wie die Organismen im Meer, können aber individuell untersucht werden, weil kein Wasseraustausch zwischen Meer und Röhre erfolgt.

7.10 > Wissenschaftler haben einen Mesokosmos vor der Küste Gran Canarias im Meer verankert. In den schlauchartigen Röhren untersuchten sie vor einigen Jahren die Reaktionen von Mikroalgen und Zooplankton auf eine zunehmende Ozeanversauerung. Aktuell erforschen sie darin die möglichen Folgen einer Alkalinitätserhöhung.



ben lassen. Fachleute sprechen in diesem Zusammenhang von der Verifikation und Attribution einer Veränderung – in diesem Fall einer veränderten Alkalinität und Erhöhung des Kohlenstoffgehalts des Meeres. Diese zu messen, von natürlichen Schwankungen zu unterscheiden und einzelnen Maßnahmen zuzuordnen, stellt eine große wissenschaftliche Herausforderung dar, für die es bislang keine verlässliche Methode gibt.

Erschwerend kommt hinzu, dass sich im Gegensatz zur Wiederherstellung von Seegraswiesen oder Mangrovenwäldern die Auswirkungen einer Alkalinitätserhöhung nicht auf ein bestimmtes Meeresgebiet eingrenzen lassen. Der Weltozean ist ein globales, zusammenhängendes System: Veränderungen in einem Meeresgebiet führen zu Wechselwirkungen mit anderen verknüpften Teilbereichen. Das gilt insbesondere für Parameter der Meereschemie. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass ein lokaler Mineraleintrag Auswirkungen nach sich ziehen wird, die nicht nur weit über die Grenzen des

ursprünglich betroffenen Meeresgebietes hinausgehen, sondern sich auch über sehr lange Zeiträume erstrecken können. Welche das sein könnten, wird aktuell noch untersucht.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Säurebindende Minerale in Form von Gesteinsmehl oder aber alkalischer Lauge auf dem Ozean zu verteilen, würde aus rechtlicher Sicht einen zusätzlichen Eintrag von Stoffen in das Meer darstellen. Entsprechende Aktivitäten werden international vor allem über die Londoner Konvention aus dem Jahr 1972 reguliert – bekannt auch als Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen – sowie durch dessen Ergänzung aus dem Jahr 1996, dem sogenannten Londoner Protokoll. Unter Umständen ziehen Fachleute aber auch die Biodiversitätskonvention zurate.

Der Anwendungsbereich des Londoner Protokolls wurde im Jahr 2013 derart erweitert, dass marine CDR-Verfahren unter dem Schirm des Vertragswerkes reguliert werden können. In Kraft tritt diese Änderung jedoch erst, wenn sie von ausreichend Vertragsstaaten ratifiziert wurde, was bislang nicht geschehen ist. Aktuell listet ein Zusatz zum Londoner Protokoll nur die Eisendüngung als regulierbare CDR-Methode. Nach Expertenmeinung ließen sich aber auch Verfahren zur Alkalinitätserhöhung des Ozeans über das Protokoll regulieren. Dafür müssten diese aber zum Protokoll hinzugefügt werden (mehr dazu in Kapitel 9).

In Deutschland ist der Einsatz von Verfahren zur Alkalinitätserhöhung der Meere nach aktueller Rechtslage

verboten. Ausschlaggebend sind hierbei abermals die Bestimmungen im deutschen Gesetz über das Verbot der Einbringung von Abfällen und anderen Stoffen und Gegenständen in die Hohe See. Wissenschaftlern deutscher Forschungsinstitutionen ist es damit auch untersagt, entsprechende Feldexperimente durchzuführen – in nationalen Gewässern ebenso wie auf Hoher See. Dieser Rechtsrahmen wird zu überdenken sein, wenn sich die Gesellschaft entscheiden sollte, die Kohlendioxidaufnahme des Ozeans durch den Eintrag säurebindender Minerale zu verstärken. Fakt ist nämlich, dass sich ohne Feldexperimente kaum umfassende Erkenntnisse über die Risiken und Nebenwirkungen solcher Einsätze gewinnen lassen.

CONCLUSIO

Alkalinitätserhöhung – theoretisch verstanden, im Feld jedoch kaum getestet

Mineralhaltige Lösungsprodukte aus der natürlichen Verwitterung von Gesteinen versetzen den Ozean in die Lage, im Wasser gelöstes Kohlendioxid chemisch zu binden und anschließend neues Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen. Dieser natürliche Prozess der Klimaregulation ließe sich gezielt beschleunigen, wenn der Mensch große Mengen Kalk- und Silikatgestein abbauen und in Form von Gesteinsmehl oder alkalischer Lösungen in das Meer eintragen würde. Entsprechende Verfahren zur Alkalinitätserhöhung brächten zudem den Vorteil mit sich, dass die Versauerung der behandelten Wassermassen zurückgehen und sich die Lebensbedingungen für viele Meereslebewesen verbessern würden.

Die chemischen Prozesse einer gezielten Alkalinitätserhöhung des Ozeans sind mittlerweile ziemlich gut verstanden. Ihre technische Machbarkeit kann jedoch nur schwer eingeschätzt werden, weil das meiste Wissen aus Computersimulationen und kleinen Laborexperimenten stammt. Großflächige Feldexperimente fehlen bislang.

Im Labor testen Forschende derzeit verschiedene natürlich vorkommende und künstlich hergestellte Minerale auf ihre Eignung und Verwitterungseigenschaften. Parallel dazu laufen erste Untersuchungen zu möglichen Umweltfolgen und -risiken, zu denen man bisher erst sehr wenig weiß. Außerdem arbeiten Fachleute an elektrochemischen Verfahren zur Alkalinitätserhöhung. Diese erfordern zwar einen hohen Energieeinsatz, kämen im Gegensatz zu anderen Verfahren jedoch ohne den Einsatz von Gesteinen aus.

Das tatsächliche Kohlendioxid-Entnahmepotenzial von Verfahren zur Alkalinitätserhöhung ist ebenfalls schwer zu beziffern. Würden bislang bekannte Verfahren weltweit eingesetzt, könnten Berechnungen zufolge 100 Millionen bis mehr als eine Milliarde Tonnen Kohlendioxid der Atmosphäre zusätzlich entnommen werden. Dem gegenüber stehen allerdings neue Treibhausgasemissionen, die im Zuge des Abbaus, Transportes und der Verarbeitung der Gesteine entstehen würden. Verfahren für eine gezielte Alkalinitätserhöhung des Ozeans sind demzufolge noch immer mit großen Unsicherheiten behaftet.

8 Kohlendioxid verpressen tief unter dem Meer

> Wenn Kohlendioxid in Industrieprozessen abgeschieden oder direkt aus der Atmosphäre entnommen wird, stellt sich auch die Frage nach einem geeigneten Speicherort. Da eine unterirdische Kohlendioxidspeicherung an Land nicht risikolos ist und Proteste der Anwohnenden hervorruft, suchen Verantwortliche vermehrt nach Speichermöglichkeiten tief unter dem Meer. Die Technik dazu existiert bereits und wird seit Jahrzehnten in Pilotprojekten eingesetzt.



Gasspeicherung in Sandsteinschichten und Basaltgestein

> Als Kohlendioxidspeicher bieten sich Gesteinsschichten in 1000 bis 4000 Meter Tiefe unter dem Meer an. Das können erschöpfte Erdöl- oder Erdgasfelder sein oder Gesteine, deren Porenraum mit Salzwasser gefüllt ist. Erforscht werden derzeit zwei Speicherverfahren: Beim ersten wird Kohlendioxid in tief liegende Sandsteinformationen verpresst – ein Ansatz, der in der Nordsee bereits praktiziert wird. Im zweiten Verfahren wird das Gas in die reaktionsfreudige, poröse obere Basaltschicht der Ozeankruste eingeleitet, in der Hoffnung, dass es dort zeitnah mineralisiert.

Kohlendioxidabscheidung: Eine Technologie mit Entsorgungsproblem

Theoretisch ließen sich unvermeidbare Restemissionen ausgleichen, indem der Mensch Kohlendioxid direkt aus der Atmosphäre entnimmt – und zwar im selben Umfang, wie er zuvor das Treibhausgas freigesetzt hat. Die für eine solche Entnahme eingesetzten Technologien werden unter dem Begriff Direct Air Capture (DAC) zusammengefasst. Sie alle sind jedoch mit der Anforderung verbunden, dass das entnommene Kohlendioxid anschließend weiterverarbeitet oder irgendwo sicher eingelagert werden muss. Gleiches gilt für Kohlendioxid, welches in Stahl- und Zementwerken, Müllverbrennungsanlagen und anderen großen Emissionsquellen (oft Punktquellen genannt) abgeschieden wird, um seine Freisetzung in die Atmo-

sphäre zu verhindern. Fachleute bezeichnen diese technologische Option zur Vermeidung von Kohlendioxidemissionen als Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (englisch: Carbon Capture and Storage), kurz CCS.

CCS soll nicht nur eingesetzt werden, um die Treibhausgasemissionen der Schwerindustrie aus fossilen Quellen zu reduzieren. Die Technologie ist auch ein zentraler Baustein der Energie- und Wärmeenergiegewinnung in Biomasse-Heizkraftwerken mit Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (BECCS), einer der bisher wichtigsten landbasierten Kohlendioxid-Entnahmemethoden. Ohne CCS wäre sie ebenso undenkbar wie ein Einsatz von Verfahren zur direkten Kohlendioxid-Entnahme aus der Luft oder dem Wasser mit anschließender Speicherung (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS).

Zum Anfang des Jahres 2023 waren weltweit 35 Anlagen zur Abscheidung oder Entnahme von Kohlendioxid in Betrieb. Ihr gemeinsames Entnahmepotenzial betrug 45 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr. Das entsprach ziemlich genau jener Menge an Kohlendioxid, die Unternehmen in Deutschland im Jahr 2021 im Zuge ihrer Industrieprozesse ausgestoßen haben. Weitere Entnahmeanlagen werden derzeit geplant oder gebaut. Nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) sollen Ankündigungen zufolge bis zum Jahr 2030 mehr als 200 neue Anlagen zur Abscheidung oder Entnahme von Kohlendioxid den Betrieb aufnehmen. Deren zusätzliches Entnahmepotenzial addiert sich auf mehr als 220 Millionen Tonnen Kohlendioxid.

Es gibt mittlerweile eine Reihe technischer Verfahren, mit denen Kohlendioxid aus Gasströmen abgeschieden werden kann. Die am besten erprobten und am weitesten verbreiteten Abscheidetechnologien sind die chemische Absorption und die physikalische Abscheidung. Bei der chemischen Absorption reagiert das Kohlendioxid mit einem chemischen Bindemittel, von dem es anschließend

mit viel Energieaufwand wieder getrennt werden muss. Bei der physikalischen Abscheidung hingegen lagert sich das Kohlendioxid entweder auf einer festen Oberfläche an (zum Beispiel auf Aktivkohle) – oder es löst sich in einem flüssigen Lösungsmittel.

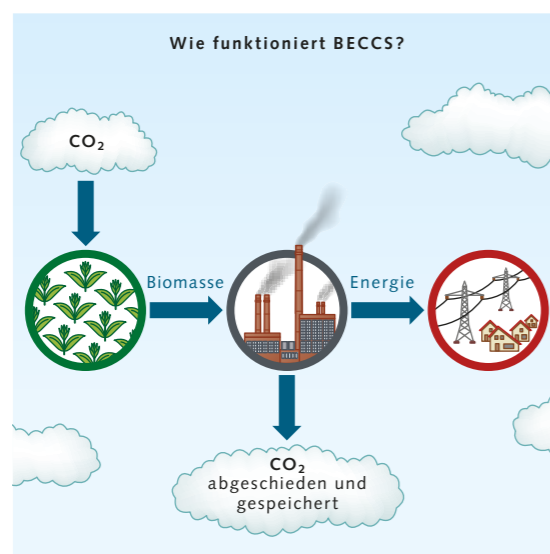
Sowohl chemische als auch physikalische Abscheidungsverfahren kommen bei der Erdgasförderung zum Einsatz, wo derzeit rund zwei Drittel des weltweit abgetrennten Kohlendioxids gewonnen werden. Vielerorts enthält das aus dem Untergrund geförderte Erdgas nämlich nicht nur den Energieträger Methan, sondern auch Kohlendioxid zu einem Anteil von weniger als drei Prozent bis zu maximal 80 Prozent – Letzteres allerdings nur in seltenen Fällen. Dieses Kohlendioxid muss abgetrennt werden, bevor das Erdgas als nahezu reines Methan in Pipelines eingespeist werden darf. Wird dieses Gas später verbrannt, entstehen abermals Kohlendioxidemissionen.

Abscheidungsanlagen werden vereinzelt aber auch schon in anderen emissionsintensiven Industrieprozessen eingesetzt, so zum Beispiel bei der Energie- und Wärmeenergiegewinnung aus fossilen Brennstoffen und aus Biomasse, bei der Düngemittel- und Stahlherstellung, in Raffinerien sowie bei der Müllverbrennung. Benötigt wird eine Kohlendioxidabscheidung langfristig zudem bei der Gewinnung von blauem Wasserstoff sowie bei der Herstellung des Biokraftstoffs Bioethanol. Größere Mengen Kohlendioxid werden künftig auch durch den zunehmenden Einsatz von Direct-Air-Capture-Verfahren anfallen. Im Jahr 2024 soll die erste DAC-Anlage der Welt in Betrieb gehen, die der Atmosphäre pro Jahr mehr als eine Million Tonnen Kohlendioxid entnehmen soll.

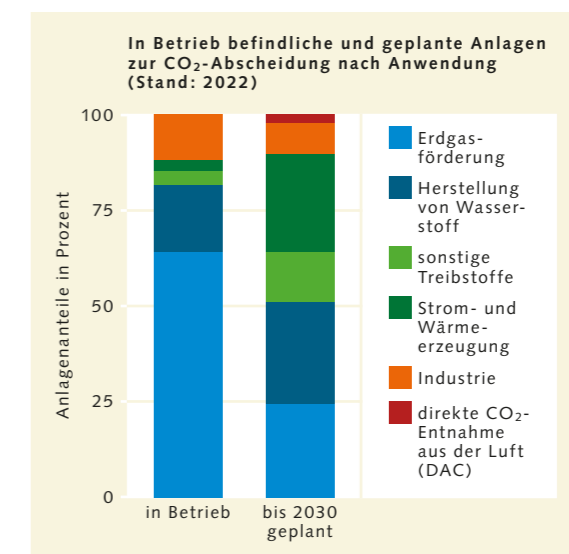
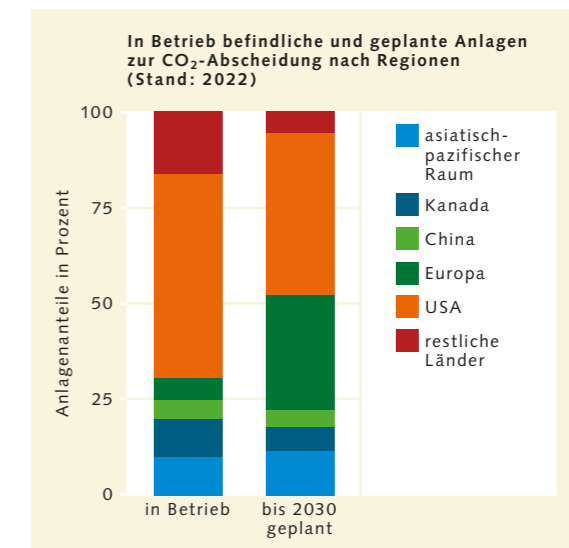
Hinzu kommt die Schlüsselrolle, die CCS für eine Dekarbonisierung der Zement- und Kalkindustrie zugeschrieben wird. Bei der Produktion von einer Tonne Zementklinker (Kalziumoxid), dem Hauptinhaltsstoff von Zement, entstehen unabhängig von den eingesetzten Brennstoffen etwa 0,8 Tonnen Kohlendioxid als Prozessmission. Sollen diese riesigen Emissionen der Zement- und Kalkindustrie vermieden werden – global sind es jährlich über zwei Milliarden Tonnen Kohlendioxid –, muss nicht nur der Zementklinkerbedarf drastisch reduziert werden. Es gilt auch, die schwer vermeidbaren Emissionen aufzufangen, das Gas dauerhaft einzulagern oder aber es sinnvoll weiterzunutzen.

Der norwegische Zementhersteller Norcem installiert aktuell die weltweit erste Zement-CCS-Anlage in seiner Fabrik in Brevik. Sie soll im Jahr 2024 den Betrieb aufnehmen und jährlich 400 000 Tonnen Kohlendioxid abscheiden. Das Gas soll anschließend verflüssigt und per Schiff zu einem Kohlendioxid-Terminal des „Northern Lights“-Projektes an der westnorwegischen Küste transportiert werden. Von dort wird das Flüssiggas dann über

Prozessemissionen
Als „Prozessemission“ wird die Freisetzung von Treibhausgasen bezeichnet, die nicht aus dem Einsatz fossiler Brenn- und Rohstoffe für die Energieerzeugung resultiert, sondern aus der verfahrensbedingten Nutzung kohlenstoffhaltiger Ausgangsstoffe bei der Produktion. In Deutschland entstehen Prozessemissionen vor allem in der Glas-, Kalk- und Zementindustrie. Sie machen ein Viertel der Industriemissionen aus.



8.1 > Bei BECCS wird Pflanzenmaterial zur Strom- oder Wärmeenergiegewinnung genutzt. Dadurch frei werdendes CO₂ wird abgetrennt und gespeichert oder dauerhaft weiterverarbeitet.



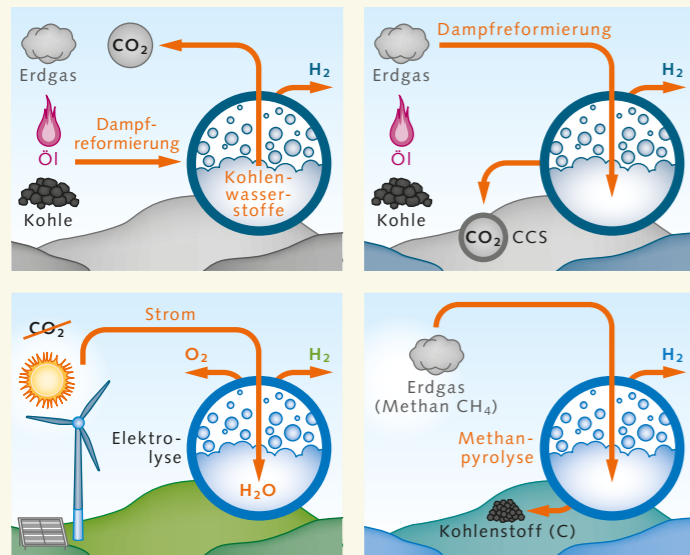
8.2 und 8.3 > Anlagen zur Abscheidung von Kohlendioxid sind aktuell vor allem in den USA in Betrieb und werden vornehmlich bei der Erdgasförderung eingesetzt.

Die Farben des Wasserstoffs

Wasserstoff kann auf unterschiedliche Weise hergestellt werden. Die gängigste Methode ist derzeit die Dampfreformierung, bei der Erdgas in Kohlendioxid und Wasserstoff zerlegt wird. Entlässt man das Kohlendioxid anschließend in die Atmosphäre, entstehen Treibhausgasemissionen und der Wasserstoff wird als „grau“ bezeichnet. Wird das Kohlendioxid hingegen gespeichert oder aber weiterverarbeitet, darf der Wasserstoff als „blau“ bezeichnet werden. Sowohl grauer als auch blauer Wasserstoff werden für industrielle Prozesse und die Stromproduktion eingesetzt.

Blauer Wasserstoff soll langfristig durch „grünen“ Wasserstoff ersetzt werden. Dieser wiederum wird durch Elektrolyse gewonnen, das heißt, Wasser wird mithilfe von elektrischem Strom in seine molekularen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Stammt der dazu verwendete Strom aus erneuerbaren Energiequellen, ist die Wasserstoffproduktion klimaneutral und der gewonnene Wasserstoff wird als „grüner“ Wasserstoff bezeichnet.

Eine weitere Option, Wasserstoff klimaneutral herzustellen, ist die Methanpyrolyse mit Energie aus erneuerbaren Quellen. Dabei wird Erdgas (Methan) in Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten. Fester Kohlenstoff ist ein Granulat, das zum Beispiel in alten Bergwerkstollen sicher gelagert und später wiederverwendet werden kann. Der durch Methanpyrolyse gewonnene klimaneutrale Wasserstoff wird als „türkiser“ Wasserstoff bezeichnet.



8.4 > Die vier Methoden der Wasserstoffherstellung unterscheiden sich im Ausgangsmaterial, in der Energiequelle, in den erforderlichen Arbeitsschritten und schlussendlich in ihrer Emissionsbilanz.

eine Pipeline 100 Kilometer weit auf die Nordsee geleitet und zum Schluss in eine Sandsteinformation 2600 Meter tief unter dem Meeresboden verpresst. CCS-Projekte in großem Maßstab planen zudem Zementhersteller in den USA und Großbritannien.

Angesichts der ambitionierten Einsatzpläne für Anlagen zur Abscheidung und Entnahme von Kohlendioxid müssen weltweit auch neue unterirdische Speicherkapazitäten erschlossen werden. Hunderte solcher Erschließungsprojekte befinden sich derzeit in Planung. Die Internationale Energieagentur (IEA) geht deshalb davon aus, dass ab dem Jahr 2030 mehr als 420 Millionen Tonnen abgeschiedenes Kohlendioxid pro Jahr im tiefen Untergrund eingelagert werden können. Diese Speicherkapazität entspricht ungefähr jener Menge Kohlendioxid, die nach derzeitigen Schätzungen im Jahr 2030 abgeschieden werden kann und anschließend sicher eingelagert werden muss.

Die Kohlendioxidspeicherung im Untergrund

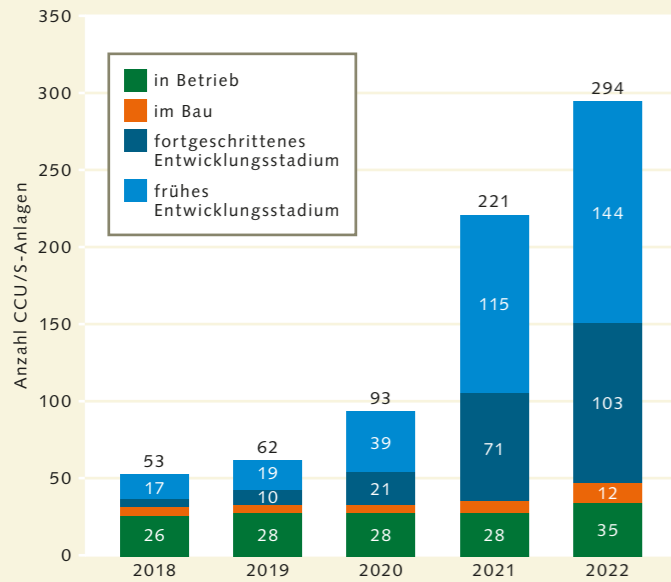
Als Kohlendioxidspeicher bietet sich vor allem der Porenraum von Gesteinsschichten in 1000 bis 4000 Meter Tiefe an. Das können einerseits erschöpfte Erdöl- oder Erdgasfelder sein oder Gesteine, deren Porenraum mit Salzwasser gefüllt ist. Um als Speicher dienen zu können, müssen diese Gesteinsschichten jedoch von einer undurchlässigen Deck- oder Barrierschicht überlagert werden. Diese besteht in der Regel aus feinem Ton- oder Salzgestein, welches ein Entweichen des eingelagerten Kohlendioxids aus dem Speichergestein verhindern soll.

Ob das immer gelingt, hängt von den lokalen geologischen Bedingungen ab. In Algerien, wo die Erdölkonzern BP und Statoil im Jahr 2004 begannen, Kohlendioxid aus der Erdgasförderung in 1,9 Kilometer Tiefe zu verpressen, stimmten diese nicht. Sieben Jahre nach Beginn des „In Salah“-CCS-Projektes – die Betreiber hatten bis dahin 3,8 Millionen Tonnen Kohlendioxid verpresst – stellten die Konzerne die Arbeiten ein: Geophysikalische und geochemische Kontrollmessungen hatten den Verdacht erhärtet, eingeleitetes Kohlendioxid könnte durch druckbedingte Risse und Störungen im Untergrund aus dem Speichergestein in die 300 Meter dicke Barrierschicht aufsteigen. Das Leckagerisiko war zu groß.



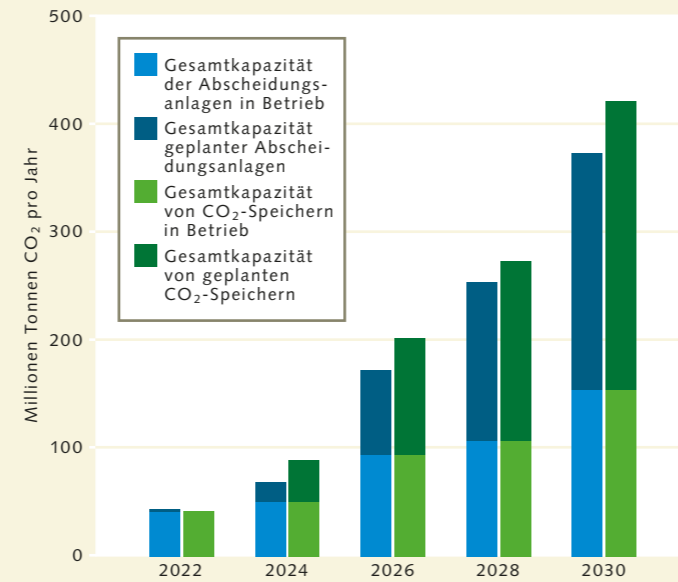
8.5 > Hochreines Kohlenstoffpulver entsteht, wenn Methan (Erdgas) bei der Pyrolyse auf über 1000 Grad Celsius erhitzt und in seine Bestandteile Kohlenstoff und Wasserstoff aufgespalten wird. Das Pulver wird für die Herstellung vieler Produkte benötigt: von modernen Bau- und Konstruktionswerkstoffen bis hin zu Hightech-Anwendungen wie Energiespeicher.

Entwicklung der Projektanzahl zur CO₂-Abscheidung von 2018 bis 2022



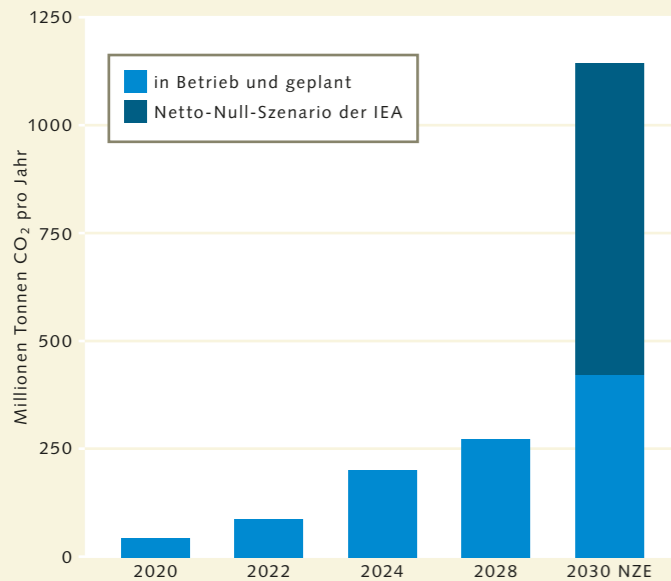
8.6 > Die Zahl der weltweit in Planung, Bau oder Betrieb befindlichen Anlagen zur Abscheidung von Kohlendioxid ist im Zeitraum von 2018 bis 2022 kontinuierlich angestiegen.

Vergleich der aktuellen und geplanten CO₂-Abscheidungs- und -Speicherkapazitäten für die Jahre 2022 bis 2030 (Stand: September 2023)



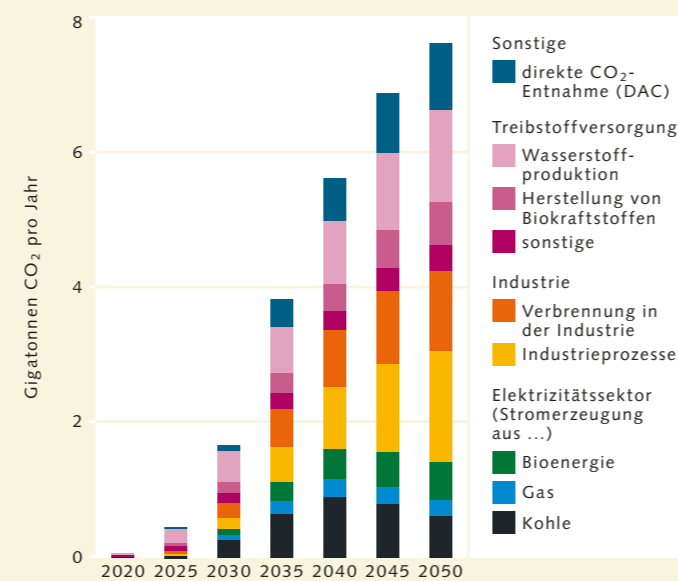
8.7 > Deutlich zugenommen hat auch die Zahl der geplanten Erschließungsprojekte für geologische Speicher. Prognosen zufolge stehen im Jahr 2030 ausreichend Speicherkapazitäten für abgeschiedenes CO₂ zur Verfügung.

Aktuelle und geplante CO₂-Speicherkapazität in den Jahren 2020 bis 2030 im Vergleich zum Netto-Null-Szenario (NZE) der Weltenergieagentur (IEA) (Stand: September 2023)



8.8 > Groß ist aber die Diskrepanz zwischen den geplanten und in Betrieb befindlichen CO₂-Speicherkapazitäten und jenen, die nach IEA-Berechnungen bereits im Jahr 2030 für ein Netto-Null-Szenario benötigt würden.

Globale CO₂-Abscheidung in den Jahren 2020 bis 2030 im Netto-Null-Szenario (NZE) der Weltenergieagentur (IEA)



8.9 > Nach Berechnung der IEA müssen im Jahr 2050 schätzungsweise 7,6 Milliarden Tonnen CO₂ abgeschieden werden – darunter rund 40 Prozent energie- und prozessbezogene Emissionen des Industriesektors.



8.10 > Diese Anlage scheidet Kohlendioxid aus der Umgebungsluft ab und stellt daraus einen Treibstoff her. Sie wurde vom kanadischen Unternehmen Carbon Engineering entwickelt, welches auch am Bau erster großer DAC-Anlagen in den USA beteiligt ist.

Die Fachleute haben jedoch aus dem Debakel gelernt und einige der damals angewandten Messmethoden in ihr Manual relevanter Vorerkundungs- und Überwachungsmethoden für geologische Kohlendioxidspeicher übernommen. Werden heutzutage bei der Kohlendioxid-Verpressung alle Druckgrenzwerte eingehalten, verbleiben in geeigneten Gesteinsformationen mindestens 99 Prozent des eingeleiteten Kohlendioxids. Bekannt ist allerdings auch, dass im Zuge der Einlagerung von Kohlendioxid bestimmte geotechnische Risiken zunehmen. So können Druckveränderungen im Untergrund Erdbeben auslösen oder dazu führen, dass sich an Land die Erdoberfläche anhebt. Denkbar ist außerdem, dass infolge einer Einlagerung von Kohlendioxid Porenwasser aus dem tiefen Untergrund aufsteigt und grundwasserführende Schichten versalzen oder verschmutzen könnte.

Aus diesen Gründen stoßen Pläne, abgeschiedenes Kohlendioxid an Land zu verpressen, vor allem in dicht besiedelten Regionen auf Ablehnung und rufen Proteste der lokalen Bevölkerung hervor. Neben der fehlenden öffentlichen Akzeptanz trugen in der Vergangenheit aller-

dings auch die hohen Kosten sowie der erhebliche Energieaufwand für eine Kohlendioxidabscheidung dazu bei, dass entsprechende Verfahren bisher nur in relativ wenigen Industrieprojekten in großem Maßstab angewendet wurden.

Eine umstrittene Methode im Aufwind

Seit Kurzem findet jedoch ein Umdenken in Politik und Wirtschaft statt: Unter dem Druck, die eigenen Emissionen tatsächlich zu reduzieren, planen immer mehr Staaten und Unternehmen einen Einsatz von CCS. Die US-amerikanische Regierung beispielsweise hat in ihrem Infrastrukturgesetz vom November 2021 mehr als zwölf Milliarden US-Dollar eingeplant, welche für CCS-Projekte und dazugehörige Aktivitäten ausgegeben werden dürfen. Davon sind 2,5 Milliarden US-Dollar für die Speicher-suche und -validierung vorgesehen; acht Milliarden US-Dollar können in die Entwicklung von Wasserstoff-produktionsstätten fließen, auch in solche für blauen Wasserstoff; und mehr als 200 Millionen US-Dollar will das

Kohlendioxid-Nutzung: Neue Ideen mit dem Langfristziel einer Kreislaufwirtschaft

Abgeschiedenes Kohlendioxid kann entweder direkt weiterverwendet werden oder muss verschiedene biologische oder chemische Prozesse durchlaufen, bevor es als Ausgangsstoff oder Zutat für die Herstellung verschiedener Produkte benutzt werden kann (englisch: Carbon Capture and Utilisation, CCU). Aktuell werden nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) weltweit jährlich etwa 230 Millionen Tonnen Kohlendioxid auf direkte Weise eingesetzt. Knapp 130 Millionen Tonnen werden verwendet, um synthetischen Harnstoff für Düngemittel herzustellen. Schätzungsweise 80 Millionen Tonnen verpressen erdölfördernde Konzerne im Untergrund, um Erdölvorkommen schneller und möglichst umfassend abzubauen (englisch: Enhanced Oil Recovery). Das restliche Kohlendioxid kommt in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie zum Einsatz oder wird in Gewächshäuser eingeleitet, um das Wachstum der Pflanzen zu steigern. Außerdem kann Kohlendioxid als Lösch- oder Kältemittel eingesetzt werden.

Relativ neu sind Überlegungen, abgeschiedenes Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle zu nutzen und daraus synthetische Kraftstoffe für den Schiffs- und Flugverkehr, kohlenstoffbasierte Grundstoffe für die Chemieindustrie oder aber Kunst- und Bauzusatzstoffe herzustellen. Gelänge dies im großen Maßstab, könnten kohlenstoffhaltige Produkte aus abgeschiedenem Kohlendioxid die bisher verwendeten Stoffe und Materialien aus fossilem Kohlenstoff ablösen. Das Endziel dieser Entwicklung wäre, eine Kohlenstoff-Wertschöpfungskette und -Kreislaufwirtschaft zu etablieren, in denen Kohlenstoff aus Kohle, Erdöl oder Erdgas nicht mehr benötigt würde.

Für die Herstellung von Chemikalien und Treibstoffen aus Kohlendioxid muss das Gas mit Wasserstoff synthetisiert werden. Auf diese Weise lassen sich Methanol und andere Kohlenwasserstoffe gewinnen, die anschließend als Grundstoffe in der chemischen Industrie und als synthetische Treibstoffe eingesetzt werden können. Ein entsprechendes Pilotprojekt wird zum Beispiel in einer Raffinerie in Schleswig-Holstein geplant. Setzt die chemische Industrie ihre bereits angekündigten CCU-Projekte um, könnte der Sektor im Jahr 2030 weltweit schätzungsweise fünf Millionen Tonnen abgeschiedenes Kohlendioxid für die Treibstoffherstellung ver-

wenden. Knapp die Hälfte der angekündigten Projekte befindet sich zum jetzigen Zeitpunkt allerdings noch in einer frühen Entwicklungsphase, und vielerorts fehlen die Pipelines und andere Infrastrukturen zum Transport von Wasserstoff und Kohlendioxid.

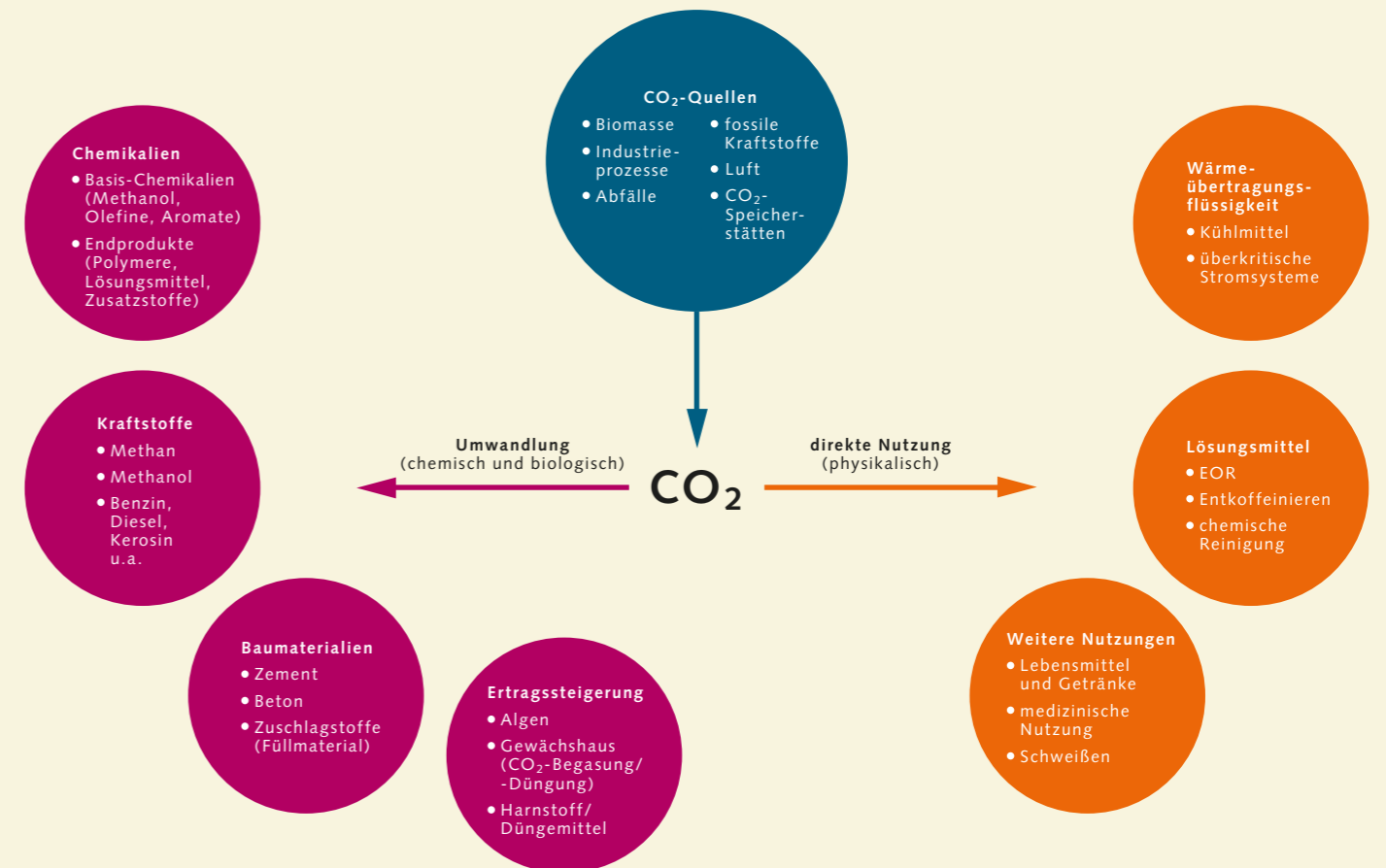
Emissionsbilanz: Die Details entscheiden

Die Emissionsbilanzen der verschiedenen Verfahren zur Kohlendioxid-Weiterverarbeitung sind nur schwer zu durchschauen. Klimaneutral sind die entstehenden Produkte nur dann, wenn das verwendete Kohlendioxid aus der Atmosphäre stammt, grüner Wasserstoff verwendet wurde und alle Herstellungsprozesse mit Energie aus erneuerbaren Quellen gespeist wurden. Doch selbst unter diesen Voraussetzungen kann die Kohlendioxid-Weiterverarbeitung nur in wenigen Ausnahmefällen als dauerhafte Entnahmemethode bezeichnet werden – so zum Beispiel, wenn die hergestellten Produkte über einen klimarelevanten Zeitraum (länger als 100 Jahre) genutzt oder wiederverwertet werden und den enthaltenen Kohlenstoff auch so lange speichern. Beides ist jedoch nur sehr selten der Fall.

In der Regel werden CCU-Produkte nur wenige Wochen oder Monate alt und setzen den enthaltenen Kohlenstoff während ihrer Nutzung oder aber bei ihrer Entsorgung wieder in Form von Kohlendioxid frei – beispielsweise, wenn der synthetische Kraftstoff in Schiffsmotoren oder in Flugzeugturbinen verbrannt wird. Die Klimabilanz der Kraftstoffe ist nur dann ausgeglichen, wenn für ihre Herstellung ebenso viel Kohlendioxid der Atmosphäre entnommen wird, wie durch die Herstellung und Verbrennung an Emissionen entsteht.

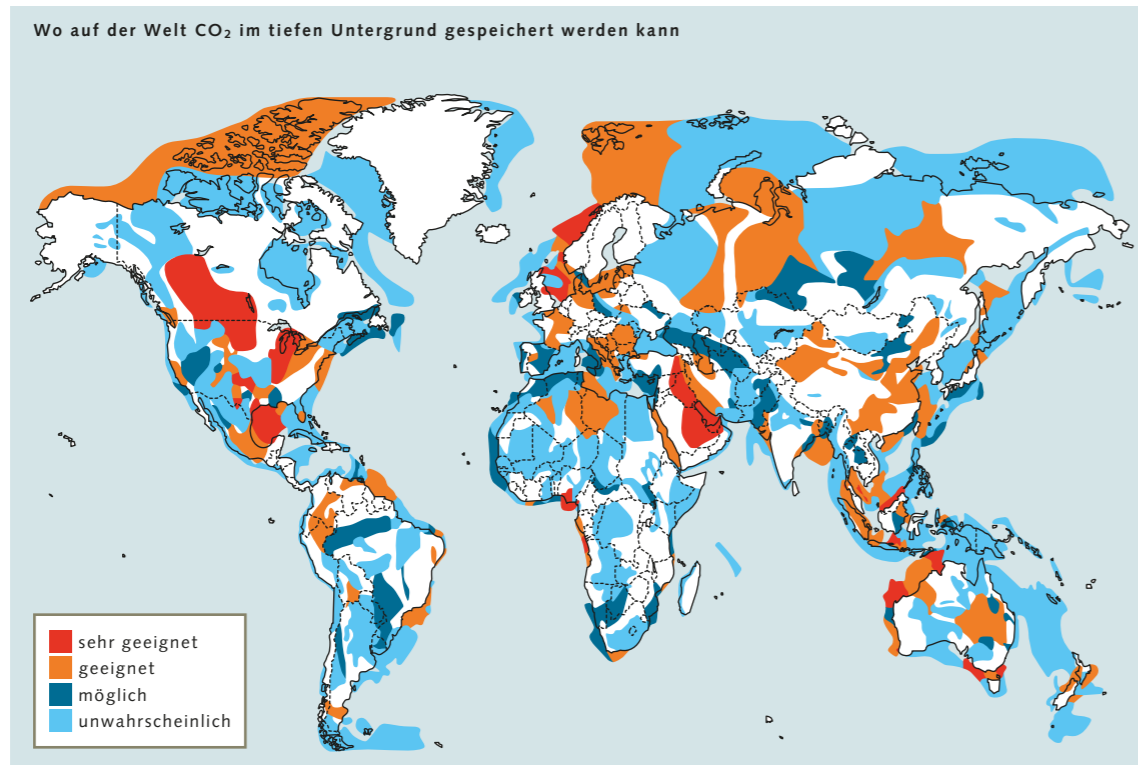
Stammt das in CCU-Produkten verwendete Kohlendioxid aus Erdöl, Erdgas oder Kohle, entstehen auf lange Sicht sogar neue Emissionen. Das bedeutet: Nur einige wenige der bislang bekannten und angewandten CCU-Technologien führen am Ende tatsächlich zu einer Entnahme von Kohlendioxid. Die IEA geht in ihrem Entwicklungsszenario für ein Erreichen der Kohlendioxidneutralität im Jahr 2050 davon aus, dass im Jahr 2030 nur etwa fünf Prozent des abgeschiedenen Kohlendioxids tatsächlich weiterverarbeitet werden. Der überwiegende Teil des Treibhausgases müsste demnach im Untergrund gespeichert werden.

Nutzungsmöglichkeiten von CO₂ mit Ausnahme der Förderung von fossilen Energieträgern
(Darstellung nach IEA 2019)



8.11 > Abgeschiedenes Kohlendioxid und vor allem der darin enthaltene Kohlenstoff lassen sich für eine Vielzahl von Anwendungen nutzen. Um eine klimawirksame Wirkung zu erzielen, müssen das Gas oder der Kohlenstoff aber so weiterverarbeitet werden, dass sie nicht mehr in die Atmosphäre entweichen können.

8.12 > Für die unterirdische Speicherung von Kohlendioxid eignen sich vor allem großporige Gesteinsformationen, die von einer undurchlässigen Barrierschicht bedeckt sind. Dies ist nur in einigen Regionen der Welt der Fall.



Energieministerium in die Entwicklung neuer Speichertechnik investieren. Kanada hat Steuererleichterungen für CCS-Projekte eingeführt, Dänemark CCS-Subventionen in Höhe von fünf Millionen Euro zugesagt und Norwegen Investitionen in Höhe von umgerechnet 100 Millionen US-Dollar. Das Geld soll in den Bau dreier großer Wasserstoffproduktionsstätten fließen. Die Europäische Union fördert bereits vier CCS-Projekte mit Mitteln aus ihrem Fond für Energie und Innovation – darunter ein BECCS-Projekt in Stockholm, Schweden, eine Zementfabrik in Frankreich, eine Anlage zur Gewinnung von Wasserstoff in Finnland sowie eine Fabrik zur Herstellung von Wasserstoff, Ammonium und Ethylen in Belgien. Weitere sieben CCS-Projekte haben es in die zweite Ausschreibungsrunde dieses Förderwettbewerbs geschafft.

Großbritannien will neuen Regierungsplänen zufolge ab dem Jahr 2030 etwa 20 bis 30 Millionen Tonnen Kohlendioxid in seinen Industriesektoren abscheiden und einen Großteil des anfallenden Kohlendioxids in mindestens zwei Speicherprojekten („East Coast“ und „HyNet“) unterirdisch verpressen. In Japan, China, Malay-

sia, Indonesien und Australien unterstützen die Regierungen ebenfalls die Suche und den Ausbau geologischer Kohlendioxidsspeicher und der dazugehörigen Infrastrukturen. In Australien betreiben die beiden Erdölkonzerne Chevron Australia und Exxon bereits seit dem Jahr 2019 das „Gorgon“-CCS-Projekt. Dabei wird aus dem Meer gefördertes Erdgas über eine Pipeline an Land geleitet, das enthaltene Kohlendioxid abgetrennt und anschließend unter Barrow Island verpresst – einer Insel vor der Nordwestküste Westaustraliens.

Die ölfördernden Staaten in Nordafrika sowie im Mittleren Osten verfolgen ebenfalls CCS-Expansionspläne. Drei Anlagen für Kohlendioxidabscheidung sind bereits in der Region in Betrieb – jeweils eine in den Vereinigten Arabischen Emiraten, in Saudi-Arabien sowie in Katar. Neue Speicherprojekte werden ebenfalls bereits geplant. Die Zukunftsperspektiven für CCS seien nie besser gewesen als jetzt, schreibt das Global CCS Institute in seinem Jahresbericht für 2022. Insgesamt aber zieht die Denkfabrik ein ernüchterndes Fazit: Die globalen Anstrengungen, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren – ein-

schließlich der Investitionen in CCS –, seien nach wie vor völlig unzureichend.

Umwelt- und Klimaschützer kritisieren die staatliche Unterstützung für CCS scharf – insbesondere für Projekte, die von erdöl- und erdgasfördernden Unternehmen vorangetrieben werden und darauf abzielen, Kohlendioxid aus der Verbrennung oder Verarbeitung fossiler Rohstoffe abzuscheiden und zu speichern. Entsprechende Projekte dienen dem „Greenwashing“ und würden den Ausstieg aus fossilen Rohstoffen unnötig hinauszögern, argumentieren Kritiker. Würde man alle grüne Energie, die für eine klimaneutrale Abscheidung von Kohlendioxid aus fossilen Quellen benötigt würde, in das Stromnetz einspeisen, könnte man die Verstromung von Kohle, Erdöl und Erdgas vermutlich einstellen, so die CCS-Gegner. Andere Experten verweisen darauf, dass CCS unverzichtbar sei, wenn Kohlendioxid-Entnahmemethoden wie BECCS und DACCS im industriellen Maßstab zum Einsatz kommen sollen. Daher müssten die Speichersuche, der

Infrastrukturaufbau und die technologische Entwicklung vorangetrieben werden.

In der Bundesrepublik Deutschland müssten nach Angaben der Deutschen Energie-Agentur (dena) pro Jahr etwa rund 34 bis 73 Millionen Tonnen Kohlendioxid aufgefangen und in tiefen Gesteinsschichten gespeichert werden, wenn das Land sein Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 erreichen will. Da eine technische Speicherung von Kohlendioxid an Land vielerorts politisch kaum durchsetzbar ist, ziehen Fachleute immer häufiger eine Speicherung im geologischen Untergrund der Meere in Betracht.

Machbar wäre dies mithilfe zweier Verfahren. Beim ersten würde komprimiertes oder verflüssigtes Kohlendioxid in tief liegende Sandsteinformationen verpresst werden – ein Ansatz, der in allen Meeresregionen möglich ist, in denen diese sehr weit verbreiteten Formationen vorkommen. Im zweiten Verfahren würde verflüssigtes oder aber in Meerwasser gelöstes Kohlendioxid in die reakt-



8.13 > In dieser Flüssiggasanlage auf Barrow Island, Australien, wird Kohlendioxid bei der Erdgasaufbereitung abgeschieden und in einiger Entfernung in zwei Kilometer Tiefe unterirdisch verpresst.



8.14 > Im „Sleipner“-Projekt des norwegischen Erdölkonzerns Equinor werden seit dem Jahr 1996 etwa 0,9 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr bei der Erdgasaufbereitung abgeschieden und anschließend tief unter der Nordsee eingelagert.

Mechanismen für eine Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund

Struktureller Einschluss

Eine undurchlässige Deckschicht verhindert, dass das Kohlendioxid aus dem Speichergestein nach oben entweicht.

Kapillarer/residualer Einschluss

Ein großer Teil des CO₂ wird im Porenraum zwischen den Sandkörnern eingeschlossen.

CO₂-Lösung

Mit der Zeit löst sich das injizierte CO₂ im salzigen Porenwasser des Speichergesteins. Das CO₂-reiche Wasser wird schwerer und sinkt nach unten.

Mineralisierung

Das im Wasser gelöste Kohlendioxid reagiert mit im Speichergestein enthaltenen Mineralen, wird in gelöstes Bikarbonat umgewandelt und fällt am Ende in Form von Karbonatmineralen aus. In diesen ist das einstige Kohlendioxid fest gebunden.

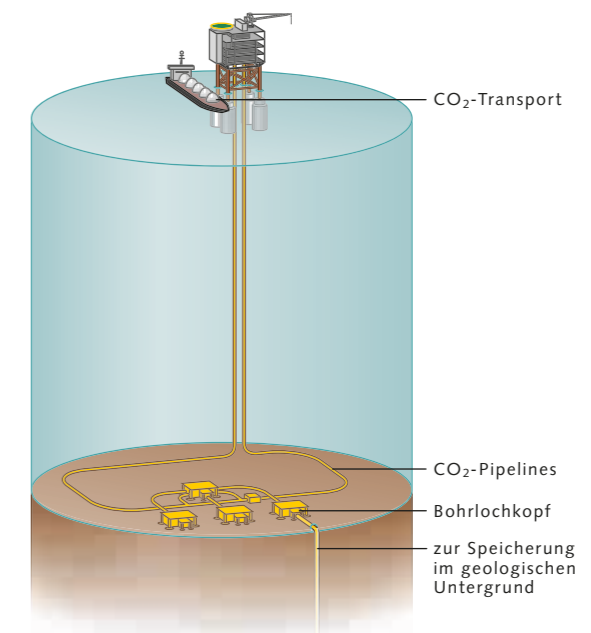
Das eingelagerte CO₂ muss während und nach der Injektion mit verschiedenen Technologien überwacht werden.

tionsfreudige, poröse obere Basaltschicht der Ozeankruste oder in sogenannte Flutbasalte eingeleitet. Erstere finden sich vor allem an den Mittelozeanischen Rücken. Letztere können auch in Küstennähe vorkommen.

Die Speicherung von Kohlendioxid in Sandsteinformationen

Sandsteinformationen, die als geologischer Kohlendioxid-speicher infrage kämen, existieren sowohl an Land als auch im tiefen Untergrund unter den Meeren (800 Meter und tiefer). Im Vergleich zu manch anderen Gesteinen sind diese Sedimentgesteinsschichten durchlässiger und weisen Poren zwischen den einzelnen Sandkörnern auf, in denen sich das eingeleitete Kohlendioxid ausbreiten kann. Voraussetzung für eine dauerhafte Speicherung ist auch hier, dass die Speichergesteine von einer geeigneten Barrierschicht, zum Beispiel aus Tonstein oder Salzgestein, überlagert werden. Eine solche Schicht dichtet nämlich das Speichergestein ab und verhindert ein Aufsteigen und mögliches Entweichen des eingeleiteten Kohlendioxids.

Erfüllt ein Speicherstandort diese und weitere geologische Voraussetzungen, kann das abgeschiedene Kohlen-

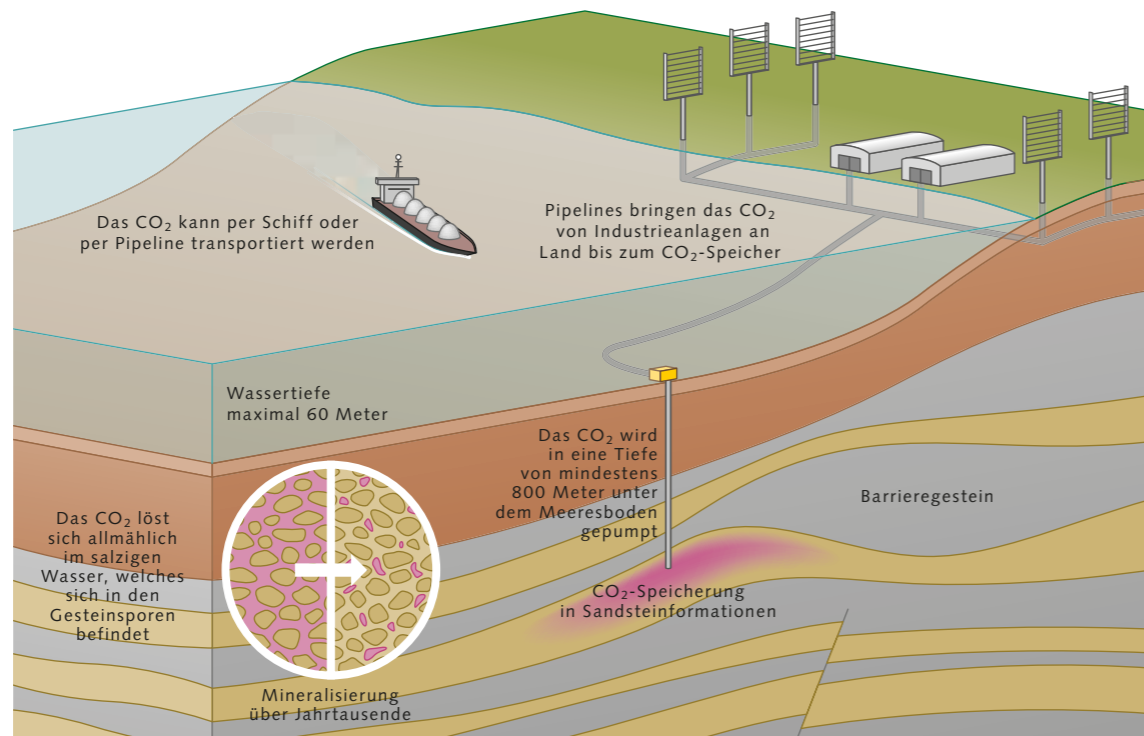


8.15 > Vier Mechanismen tragen dazu bei, dass Kohlendioxid in tief liegenden Gesteinsformationen gespeichert werden kann. Wirklich sicher ist das Gas allerdings erst dann eingelagert, wenn es sich im Porenwasser gelöst hat und anschließend mineralisiert ist.

dioxid komprimiert, gegebenenfalls verflüssigt und über eine oder mehrere Bohrungen in die Speicherformationen injiziert werden. Dort breitet sich das Kohlendioxid in den mit salzigem Wasser gefüllten Gesteinsporen aus. Fachleute nennen dieses salzige Porenwasser auch Formationswasser. Da das injizierte Kohlendioxid leichter ist als das Formationswasser, steigt es im Speichergestein auf. Es sammelt sich am höchsten Punkt unter der Barrierschicht und verbleibt dort – vorausgesetzt, die Barrierschicht ist wirklich undurchlässig.

Im Laufe der Zeit löst sich das Kohlendioxid dann im Formationswasser auf. Die dabei entstehende Lösung ist schwerer als Wasser, sodass das Kohlendioxid nicht mehr zur Oberfläche aufsteigt. Anschließend reagiert das im Wasser gelöste Kohlendioxid mit im Sandstein enthaltenen Mineralen und wird dabei in gelöstes Bikarbonat umgewandelt. In dieser Form hat der eingebrachte Kohlenstoff keine schädliche Klimawirkung mehr, selbst dann nicht, wenn das gelöste Bikarbonat in das Meer entweichen sollte. Wie schnell die Umwandlung von Kohlendioxid in Bikarbonat abläuft, hängt davon ab, wie viele reaktive Minerale im Speichergestein vorhanden sind. Das Bikarbonat fällt schließlich aus und bildet Feststoffe, in denen der eingebrachte Kohlenstoff dauerhaft gebun-

8.16 > Das abgeschiedene und komprimierte Kohlendioxid kann entweder über eine Pipeline zur Injektionsstelle transportiert werden oder per Schiff.



den wird. Es können jedoch viele Jahrtausende vergehen, bis diese Prozesse abgeschlossen sind.

Kohlendioxid-Speicherprojekte in der Nordsee

Die Nordsee weist viele Gebiete auf, die sich für die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund eignen könnten. Berechnungen zufolge könnten etwa 150 bis 190 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in ihren unterirdischen Sandsteinformationen eingelagert werden – die Norwegische See und die Barentssee mit eingeschlossen. Als Schelfmeer ist die Nordsee zudem nicht besonders tief. Ihre maximale Wassertiefe beträgt in deutschen Gewässern gerade einmal 60 Meter, was den Aufbau oder die Installation von Injektionsanlagen auf Plattformen und am Meeresboden vergleichsweise einfach macht.

Einige Nordsee-Anrainerstaaten injizieren Kohlendioxid bereits heute tief in den Meeresuntergrund oder stehen kurz davor, mit der Einleitung zu beginnen. Den Auftakt machte der norwegische Erdölkonzern Equinor (ehemals Statoil) im Jahr 1996: Nachdem die Regierung

Norwegens im Jahr 1991 eine landesweite Kohlendioxidsteuer eingeführt hatte, begann der Konzern damit, das im Erdgas enthaltene Kohlendioxid nicht mehr in die Atmosphäre freizusetzen, sondern es vor Ort auf seinen Offshore-Produktionsplattformen abzutrennen und es in Sandsteinformationen tief unter den Plattformen zu injizieren. Im sogenannten „Sleipner“-Projekt werden so seit dem Jahr 1996 etwa 0,9 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr im Untergrund verpresst.

Im „Snøhvit“-Projekt in der Barentssee wiederum deponiert der Konzern jährlich etwa 0,7 Millionen Tonnen Kohlendioxid tief unter dem Meer – und das seit dem Jahr 2009. Das bedeutet, die Einlagerung und Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund der Nordsee ist seit Jahrzehnten technisch machbar. Zudem verfügen Fachleute über einen hohen Erfahrungs- und Kenntnisstand zur technischen Durchführung solcher Speicherprojekte in tief liegenden Sandsteinformationen.

Andere Firmen und Länder folgen nun dem Beispiel Equinors, denn aufgrund der steigenden Preise für Kohlendioxid-Emissionszertifikate wird die Speicherung des Treibhausgases im tiefen Meeresuntergrund allmählich

zum lohnenden Geschäft. Eine Tonne Kohlendioxid abzuscheiden, über eine Pipeline in das Meeresgebiet hinauszuleiten und dort im Untergrund zu verpressen, kostet je nach Standort schätzungsweise rund 80 bis 200 Euro. Zertifikate zur Emission der gleichen Menge Kohlendioxid in die Atmosphäre kosteten im Jahr 2022 etwa 80 Euro. Derzeit werden mehrere neue Projekte zur Speicherung von Kohlendioxid im Untergrund der Nordsee geplant und umgesetzt – so zum Beispiel vor der Küste Rotterdams (Niederlande), unter der dänischen und britischen Nordsee sowie unter norwegischen Gewässern. In allen Fällen werden dabei Sandsteinformationen erkundet, die entweder mit Salzwasser gesättigt sind (zum Beispiel „Sleipner“ und „Snøhvit“) oder aus denen zuvor Erdgas und Erdöl gefördert wurden.

Da sich industrielle Emissionsquellen wie Zementwerke oder Müllverbrennungsanlagen meist nicht am selben Ort befinden wie mögliche Nutzer des abgeschiedenen Kohlendioxids oder aber Speicherstätten, muss Kohlendioxid transportiert werden. Im „Sleipner“-Projekt in der norwegischen Nordsee wird das Kohlendioxid direkt vor Ort an der Erdgasförderstelle auf dem Meer abgeschieden und verpresst, während im „Snøhvit“-Projekt in der Barentssee das Kohlendioxid von einer Aufbereitungsanlage an Land über Pipelines am Meeresboden zu den Injektionsbohrungen transportiert wird. Ein Transport mit Pipelines oder Schiffen ist auch für die Speicherung von Kohlendioxid im norwegischen „Northern Lights“-Projekt in der Nordsee sowie für weitere Projekte vor der Küste der Niederlande, Dänemark und Großbritanniens vorgesehen.

CCS wird heutzutage im Verbund geplant und umgesetzt

Wurden in der Vergangenheit vor allem CCS-Projekte mit einer einzelnen Anlage für die Abscheidung von Kohlendioxid und einem eigenen nachgeschalteten Transport- und Speichersystem geplant und umgesetzt, bilden sich seit einigen Jahren verstärkt regionale Verbünde von Unternehmen, die eine gemeinsame Transport- und Speicherinfrastruktur (zum Beispiel Pipelines, Hafenanlagen, Zwischenspeicher, Speicherstandorte) entwickeln und

nutzen wollen. Ein prominentes Beispiel ist das CCS-Projekt des Hafens von Rotterdam, an dem viele der dort ansässigen Unternehmen beteiligt sind. Ein ähnlicher Zusammenschluss hat sich auch in Houston, Texas, gebildet. Dort treiben aktuell 14 Unternehmen den Aufbau einer großen CCS-Infrastruktur voran, darunter vor allem erdölfördernde Konzerne und der Chemieriese Dow. Sie wollen Kohlendioxid in ihren Raffinerien und Fabriken im Hafen von Houston abscheiden, über Pipelines in den Golf von Mexiko leiten und dort tief im Meeresuntergrund verpressen.

Andere Konzerne planen grenzüberschreitende Kohlendioxid-Transportnetzwerke an Land und im Meer, um das Treibhausgas von den Abscheidungsanlagen an Punktquellen zum finalen Speicherplatz zu transportieren. Der Erdölkonzern Santos beispielsweise will künftig abgeschiedenes Kohlendioxid von der nordaustralischen Stadt Darwin zur Verpressung in das Seegebiet des benachbarten Inselstaates, der Demokratischen Republik Timor-Leste, leiten und dafür eine ausgediente Erdgaspipeline nutzen.

8.17 > Vor dem Hafen von Rotterdam soll ab dem Jahr 2026 abgeschiedenes Kohlendioxid in einem leergeförderten Gasfeld unter der Nordsee verpresst werden. Allerdings geht es auch hierbei vor allem darum, Kohlendioxid aus fossilen Quellen einzulagern – das heißt, zusätzliche Emissionen zu verhindern. Es findet keine echte CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre statt.



In Europa wollen die Unternehmen Wintershall Dea und Equinor eine Kohlendioxid-Pipeline bauen, die von Wilhelmshaven an der deutschen Nordseeküste bis in die norwegische Nordsee führt. Parallel dazu untersuchen Fachleute in weiteren Projekten, ob es zielführend sei, Tankschiffe mit einem Ladevolumen von 30 000 bis 70 000 Kubikmeter einzusetzen, die abgeschiedenes Kohlendioxid auch aus weiter entfernten Quellen kostengünstig zu speichern vor der Küste Norwegens und anderer Schelfmeer-Anrainer befördern könnten.

Die Risiken einer Speicherung von Kohlendioxid in Sandsteinformationen unter dem Meer

Aufgrund der Erfahrungen aus laufenden Kohlendioxid-Speicherprojekten und von Forschung in den vergangenen zwei Jahrzehnten kennen Fachleute die Risiken, welche das Verpressen von Kohlendioxid in Sandsteinformationen unter dem Meer mit sich bringt, recht gut. Dazu gehören die vier Gefahrschwerpunkte, wonach:

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

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

Wenn Kohlendioxid oder Formationswasser aus dem Meeresboden entweicht

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

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

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

Freisetzungsexperimente am Meeresboden der Nordsee zeigen, dass sich austretendes Kohlendioxid sofort im bodennahen Meerwasser löst und dabei dessen chemische Eigenschaften verändert. Das Meerwasser rund um die Austrittsstelle versauert, wodurch die Lebensbedingungen insbesondere für Muscheln und andere kalkbildende Tiere beeinträchtigt werden. Das von der Versauerung betroffene Gebiet ist dabei vergleichsweise klein (circa zehn bis 50 Quadratmeter), wenn in etwa die

gleiche Menge Kohlendioxid entweicht wie Erdgas an den oben beschriebenen Austrittsstellen der Nordsee.

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

Dennoch müssen Leckagen weitgehend vermieden werden. Geeignete Frühwarn- und Überwachungssysteme sind nötig, um Abweichungen vom erwarteten Speicherverhalten frühzeitig zu erkennen und schnell geeignete Gegenmaßnahmen zu treffen. Bei der Erforschung, Erprobung und kommerziellen Anwendung von Überwachungstechnologien sind in den zurückliegenden Jahren Fortschritte gemacht worden. So wurden insbesondere Überwachungstechnologien für den Offshore-Bereich getestet und weiterentwickelt. Dabei führten die beteiligten Fachleute auch Experimente durch, in denen sie Kohlendioxid gezielt am oder im Meeresboden freisetzen, um zu testen, wie effektiv eine Technologie oder ein Verfahren das austretende Kohlendioxid detektieren kann. Bei einem solchen Experiment in der britischen Nordsee konnten die eingesetzten Sensoren das freigesetzte Kohlendioxid sogar bei einer sehr geringen Freisetzungsrate von sechs Kilogramm pro Tag im Sediment und in der Wassersäule nachweisen.

Insgesamt, so das Expertenurteil, steht eine große Bandbreite von Überwachungstechnologien zur Verfügung, die für die Kohlendioxidspeicherung im großen Maßstab genutzt werden kann. Technische Verbesserungen sind trotzdem möglich und wünschenswert – so zum Beispiel in den Bereichen Sensortechnik, Datenmanagement und intelligenten autonomen Systemen, zu denen auch autonome Unterwasserroboter zählen. Diese haben bislang eine eingeschränkte Entscheidungsautonomie und folgen bei ihren Patrouillenfahrten vordefinierten Fahrwegen. Gebraucht würden jedoch vollständig autonom agierende Unterwasserfahrzeuge, die in der Lage sind, basierend auf Sensormessungen, in Echtzeit intelligent zu handeln. An der Entwicklung entsprechender Technologien wird bereits gearbeitet. Sollten sie in naher Zukunft einsetzbar sein, würden auch die Kosten der Speicherüberwachung sinken.

Große Hoffnungen setzen Ingenieure zudem auf glasfaserbasierte Überwachungssysteme. Gemeint sind Glasfaserkabel, die mit vielen Sensoren gespickt sind. Die Kabel können an der Erdoberfläche verlegt werden, im Boden entlang von Rohrleitungen, auf dem Meeresboden sowie direkt in Tiefbohrungen, sodass sowohl die Injektion als auch die Speicherung des Kohlendioxids engmaschig überwacht werden können. Abhängig von den ausgewählten Sensoren lassen sich nämlich verschiedene Parameter engmaschig und in hoher zeitlicher Abfolge erfassen. So können freies und in Wasser gelöstes Kohlendioxid direkt bestimmt werden. Die Glasfaserkabel werden außerdem genutzt, um den Druck, die Temperatur, die Gassättigung des Porenraums sowie die Seismizität und Deformationen des Untergrundes zu ermitteln. Setzt man die Glasfaser als Geofon ein, lassen sich auch seismische Messungen durchführen. Alles, was derzeit noch fehlt, sind aussagekräftige langjährige Einsatzerfahrungen mit solchen Überwachungskabeln, insbesondere was die Langzeitstabilität der Fasern und Sensoren in anspruchsvoller Umgebung angeht. Daher wird der Einsatz solcher Verfahren unter anderem in einem europäischen Verbundforschungsprojekt getestet und weiterentwickelt. Experten zufolge kann ihr Einsatz in Kombination mit herkömmlichen Überwachungsverfahren heute schon sinnvoll sein. Langfristig könnten die Kabel herkömmliche Überwachungstechnologien sogar vollständig ersetzen. Die Kosten für den Aufbau und Einsatz solcher Glasfaserkabel sind bislang nämlich konkurrenzlos günstig.

Wenn die Kohlendioxid-Injektion Bewegungen im Untergrund auslöst

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

In Meeresgebieten, in denen schon auf natürliche Weise Erdbeben auftreten, könnte es infolge der Druck-

8.18 > Für die Erkundung und Überwachung von Kohlendioxidsspeichern unter dem Meer müssen sogenannte Luftpulser eingesetzt werden. Ihr Lärm stellt für Schweinswale und viele andere Meeresbewohner vermutlich eine hohe Gefahr und Belastung dar.



Veränderungen im Speichergestein zu Spannungsänderungen im Untergrund kommen. Dadurch könnten Erdbeben ausgelöst werden, welche die Standfestigkeit von Windkraftanlagen oder Pipelines gefährden würden. Ein Kohlendioxid-Pilotspeicher im japanischen Nagaoka in der Präfektur Niigata überstand ein schweres Erdbeben der Intensität 7 unbeschadet. Rückschlüsse auf andere Speicherstandorte sind jedoch nur bedingt möglich, weil dafür standortspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen.

Ob an Land oder im Meer: Potenzielle Standorte für die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund müssen umfassend erkundet werden. Es gilt, ihre geologische Beschaffenheit, mögliche Leckagepfade und die lokal herrschenden Druck- und Temperaturverhältnisse zu untersuchen, bevor über ihre Eignung als Speicher von Kohlendioxid entschieden werden kann.

Lärmbelästigungen für Wale, Fische & Co.

Bei der Suche und Erkundung möglicher Kohlendioxid-Speicherstandorte im Meeresuntergrund werden diesel-

ben geophysikalischen Methoden angewandt wie für die Suche nach Erdöl- und Erdgaslagerstätten. Gemeint sind unter anderem aktive seismische Verfahren, bei denen zum Beispiel sogenannte Luftpulser vom Schiff aus zu Wasser gelassen werden. Diese erzeugen bei jedem Puls Schallwellen, die tief in den Untergrund eindringen und von den Gesteinsschichten auf unterschiedliche Weise reflektiert werden. Anhand der Ausbreitung und Reflexion der Schallwellen können Fachleute die Gestalt und den Aufbau des Untergrundes abbilden.

Der Nachteil der Luftpulser: Ihre Schallwellen verursachen Unterwasserlärm, über dessen Auswirkungen auf das Leben im Meer und insbesondere auf lärmempfindliche Nordseebewohner wie Schweinswale bisher nur wenig bekannt ist. Da Schweinswale sowohl zur Orientierung als auch zur Kommunikation und zur Nahrungssuche auf akustische Signale angewiesen sind, beeinflusst Unterwasserlärm ihr Verhalten und kann sie langfristig aus ihrem ursprünglichen Lebensraum vertreiben. Sehr hohe Schallpegel bestimmter Frequenzen können die Tiere zudem verletzen und mitunter dauerhaft schädigen.

Das Gleiche gilt in anderen Schelfmeeren für die dort heimischen Meeressäuger und andere Tiere.

Auf Grundlage dieses Wissens und in Anbetracht des ohnehin stetig steigenden Lärmaufkommens in den Küstenmeeren ist es unabdingbar, die Risiken lärmintensiver Arbeiten für Meeresorganismen zu kennen und entsprechende Schutzmaßnahmen zu entwickeln. Berücksichtigt werden müssen die Risiken einer Lärmsteigerung durch die Speichersuche, -befüllung und -überwachung, aber auch bei der marinen Raumplanung – etwa, wenn es um die Frage geht, ob geeignete Gesteinsschichten unter Meeresschutzgebieten für eine Kohlendioxidsspeicherung freigegeben werden sollten oder nicht.

Als lärmarme Überwachungsmethode bieten sich zum Beispiel passive seismische Verfahren an. Für sie werden hoche sensible Messgeräte auf dem Meeresboden platziert, die dann völlig geräuschlos sowohl natürlich auftretende seismische Ereignisse aufzeichnen würden als auch solche, die durch eine Kohlendioxid-Injektion entstünden. Bedacht werden muss allerdings: Wo passiv-seismische Messgeräte am Meeresboden liegen, müssen diese vor Zerstörungen geschützt werden. Das heißt, der Fischfang und das Ankern von Schiffen und Booten müssten eventuell eingeschränkt werden.

Wachsende Nutzungsansprüche an die Nordsee

Schifffahrt, Windparks, Fischerei, Pipelines, Erdgasförderung: Die deutsche Nordsee und viele andere Meeresgebiete werden bereits heute intensiv vom Menschen genutzt. Gleichzeitig sind die meisten von ihnen aber auch ein wichtiger Lebensraum für viele verschiedene Meereslebewesen, die durch das Ausweisen von Meeresschutzgebieten geschützt und erhalten werden sollen. Um Konflikte mit dem Meeresschutz und anderen Nutzungen zu vermeiden, müssten potenzielle Kohlendioxid-Speicherstandorte in die maritime Raumordnung integriert werden.

Bislang aber berücksichtigen die Meeresraumpläne für deutsche Gewässer nur die Nutzung des Meeresbodens, der Wassersäule sowie des Luftraums darüber. Eine weitergehende Nutzung des Meeresuntergrundes in verschiedenen Tiefenlagen ist auch in den überarbeiteten, im Jahr 2021 in Kraft getretenen Festlegungen nicht erwähnt.

Im Hintergrund diskutieren Experten aber bereits darüber, wie die Kohlendioxidsspeicherung in die maritime Raumplanung Deutschlands integriert werden kann.

Kohlendioxidsspeicherung im reaktionsfreudigen Basaltgestein der oberen Ozeankruste

Neben den Sandsteinformationen der Erde bieten sich auch eisen- und magnesiumreiche Gesteinsschichten als möglicher Kohlendioxidsspeicher an. Fachleute bezeichnen diese auch als „mafische“ oder „ultra-mafische“ Gesteine – eine Bezeichnung, die sich aus den Elementsymbolen „Ma“ für Magnesium und „F“ für Ferrum (Eisen, Fe) zusammensetzt.

Reich an Eisen und Magnesium sind vor allem magmatische Gesteine: Dazu zählen vulkanische Fest- und Lockergesteine, vor allem aber Basaltgesteine. Diese sind weitverbreitet und kommen sowohl an Land vor (etwa in Indien, Australien, Kanada oder Südafrika) als auch unter dem Meeresboden. Aus Basaltgestein besteht zum Beispiel die obere ozeanische Erdkruste.

Wer beim Wort Basaltgestein an dunkles Kopfsteinpflaster denkt, hat tatsächlich Basaltgestein vor Augen. Die Gesteine der oberen 100 bis 400 Meter Ozeankruste aber haben wenig mit dem dichten, feinkörnigen Gestein zu tun, mit dem wir Menschen Marktplätze oder Hofeinfahrten pflastern. Stattdessen sind diese Gesteinsschichten hochporös und stellenweise von millimetergroßen Blasen und Rissen durchzogen.

Diese offenporige Struktur entsteht, wenn sich die sechs bis acht 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, reißt auf oder bildet Schrumpfungsrisse an vielen Stellen. Auf diese Weise entsteht ein Netzwerk aus winzigen Hohlräumen und Gängen, welches den oberen Teil des Basaltgesteins fortan flächendeckend durchzieht.

Durch dieses unterirdische Porennetzwerk zirkuliert Meerwasser. Man kann sich die oberen 400 Meter Basaltgestein wie ein riesiges Leitungssystem für Fluide (Flüssigkeiten und Gase) vorstellen. Es bildet die größte wasserführende Gesteinsformation (Aquifer) der Erde, direkt unter dem Ozean. Ihr Porenraum böte daher ausreichend Speichervolumen, um große Mengen verflüssigtes Kohlendioxid oder aber kohlendioxidreiches Wasser einzuleiten, argumentieren Fachleute.

Kohlendioxid in Basaltgestein einzulagern, bietet einen entscheidenden Vorteil gegenüber einer Speicherung in porösen Sandsteinformationen. Das basische Basaltgestein reagiert sehr schnell, wenn es mit kohlendioxidreichen Lösungen in Kontakt kommt. Die Erklärung dafür liegt in seiner chemischen Zusammensetzung. Das magmatische Gestein enthält Minerale wie Olivin, Plagioklas, Pyroxene oder vulkanisches Glas. Diese wiederum besitzen als Hauptbestandteile unter anderem Kalzium, Magnesium und Eisen.

Reichert man nun Meerwasser mit Kohlendioxid an oder löst sich injiziertes Kohlendioxid langsam im Porenwasser, wird dieses zu „Sprudelwasser“ und versauert. Kommt das Wasser in diesem Zustand mit dem Basaltgestein in Kontakt, greift die im Wasser enthaltene Säure die Basaltoberfläche an und löst deren Eisen-, Magnesium- und Kalzium-Bestandteile heraus. Diese reagieren anschließend mit dem gelösten Kohlendioxid und bilden Karbonate, die zunächst einmal im Wasser gelöst bleiben. Setzt sich diese Lösungsreaktion jedoch fort, übersättigt das Wasser zu einem bestimmten Zeitpunkt und die Karbonate fallen aus. Das heißt, es bilden sich Karbonatminerale wie Kalzit, Dolomit oder Ankerit – oder vereinfacht gesagt: Mineralgesteine, in denen das einstige Kohlendioxid fest gebunden ist, bestenfalls für viele Millionen Jahre.

Fachleute sprechen deshalb auch von einer Mineralisierung des Kohlendioxids. Sie läuft in mafischen Gesteinen viel schneller und umfassender ab als in Sandsteinformationen, in denen das eingeleitete Kohlendioxid lange als separate Phase (verflüssigtes Kohlendioxid) oder gelöst im Formationswasser erhalten bleibt. Ein weiterer Pluspunkt des Basaltgesteins: Die natürliche Mineralisierung lässt sich durch eine gezielte Zugabe von Kohlendioxid technisch beschleunigen.

Erfolgsprojekt auf Island

Wie viel Kohlendioxid sich theoretisch in der oberen Ozeankruste speichern ließe, ist noch nicht gründlich untersucht, und alle Kapazitätsschätzungen sind mit großen Unsicherheiten verknüpft. Derzeit aber gehen Fachleute davon aus, dass die theoretische mineralische Kohlendioxid-Speicherkapazität der Mittelozeanischen Rücken unseres Planeten um ein Vielfaches größer ist als die Menge an Kohlendioxid, die bei der Verbrennung aller fossilen Rohstoffvorkommen auf der Erde freigesetzt würde. Denn potenziell geeignete Gesteinsschichten finden sich nicht nur an Mittelozeanischen Rücken, sondern auch in den sogenannten Flutbasaltprovinzen, die oft untermeerische Plateaus aus Basalten mit hoher Porosität oder Blasigkeit bilden.

Auf Island wird im Projekt „CarbFix“ seit dem Jahr 2014 abgeschiedenes und im Wasser gelöstes Kohlendioxid in die obere Ozeankruste injiziert. Die Vulkaninsel liegt genau auf dem Mittelatlantischen Rücken, sodass junges, noch warmes und damit sehr reaktionsfreudiges Basaltgestein schon durch vergleichsweise kurze Bohrungen zu erreichen ist. Die Mineralisierungsraten sind dementsprechend hoch: Innerhalb von zwei Jahren mineralisieren aufgrund der hohen Reaktivität der heißen Kruste Islands circa 98 Prozent des injizierten Kohlendioxids und sind somit fest im Untergrund gebunden. Bis April 2023 hatte „CarbFix“ nach eigenen Angaben mehr als 90 000 Tonnen Kohlendioxid in die Erdkruste injiziert, wobei allerdings viel geothermische Energie und große Mengen Süßwasser verbraucht wurden.

Ein Rechenbeispiel: Um eine Tonne Kohlendioxid in dem von „CarbFix“ verwendeten Verfahren in Wasser zu lösen, werden 27 Tonnen Süßwasser, ein Druck von 25 Bar sowie eine Wassertemperatur von 25 Grad Celsius benötigt. Der Energie-Mehrbedarf für die Wasserinjektion ist nach aktuellem Forschungsstand schwer abschätzbar. Auf der Vulkaninsel Island spielt dieser Unsicherheitsfaktor keine Rolle, da dort erneuerbare geothermische Energie quasi unbegrenzt zur Verfügung steht. In anderen Regionen aber ist dies nicht der Fall. Experten mahnen daher an, für künftige Speicherprojekte, in denen diese Injektionsmethode angewandt werden soll, die Kosten und die Verfügbarkeit größer



8.19 > Island ist eine Insel, bei der die junge, reaktionsfreudige obere Ozeankruste über die Meeresoberfläche hinausragt – gut zu erkennen an dem schwarzen Basaltgestein dieser Steilküste.

8.20 > Diese Rohrleitung gehört zum isländischen Projekt „CarbFix“. Dort wird seit dem Jahr 2014 abgeschiedenes und in Wasser gelöstes Kohlendioxid in die obere Ozeankruste injiziert.



Mengen Wasser und Energie bei der Planung mit zu berücksichtigen und in die Kosten-Nutzen-Abwägung einfließen zu lassen.

Große Basaltvorkommen in der Tiefsee

Da es auf der Welt jedoch nur wenige Orte gibt, an denen ozeanische Kruste über die Meeresoberfläche ragt (etwa im Fall von Island und den Azoren), richtet die Wissenschaft ihren Blick in größere Wassertiefen, wo sich global betrachtet Zehntausende Kilometer Mittelozeanische Rücken finden, in deren junger, reaktionsfreudiger Basaltkruste man Kohlendioxid einlagern könnte.

Für diese Idee spricht, dass in größeren Tiefen hohe Drücke wirken. Diese tragen entweder dazu bei, das injizierte Kohlendioxid im Meerwasser zu lösen, welches in der Basaltkruste zirkuliert – selbiges würde dadurch dichter und schwerer –, oder aber, dass sich das Kohlendioxid verflüssigt. Dabei würde es sich derart verdichten, dass

es ab einem Druck von 280 Bar (ab einer Wassertiefe von etwa 2800 Metern) schwerer wäre als das Meerwasser in vergleichbarer Tiefe und nicht mehr aus dem Untergrund aufsteigen könnte. Kohlendioxidlecksagen aus dem Untergrund wären somit unwahrscheinlich, wobei ein mögliches Restrisiko von den lokalen Temperatur- und Druckbedingungen abhängt.

Um Leckagen letztendlich vollends ausschließen zu können, dürften künftig nur solche Basaltschichten als Kohlendioxidsspeicher ausgewählt werden, die unter einer mehrere Hundert Meter dicken Sedimentschicht liegen. Fernab der Küsten besteht diese Sedimentschicht überwiegend aus sehr feinem Tonmaterial, welches die Basaltschicht abdichtet.

Die mitunter große Entfernung Mittelozeanischer Rücken zur nächsten Küste brächte noch einen weiteren Vorteil: Sollten durch eine Verpressung von Kohlendioxid in der oberen Basaltschicht der Ozeankruste kleine Erdbeben ausgelöst werden, was nicht ausgeschlossen wer-

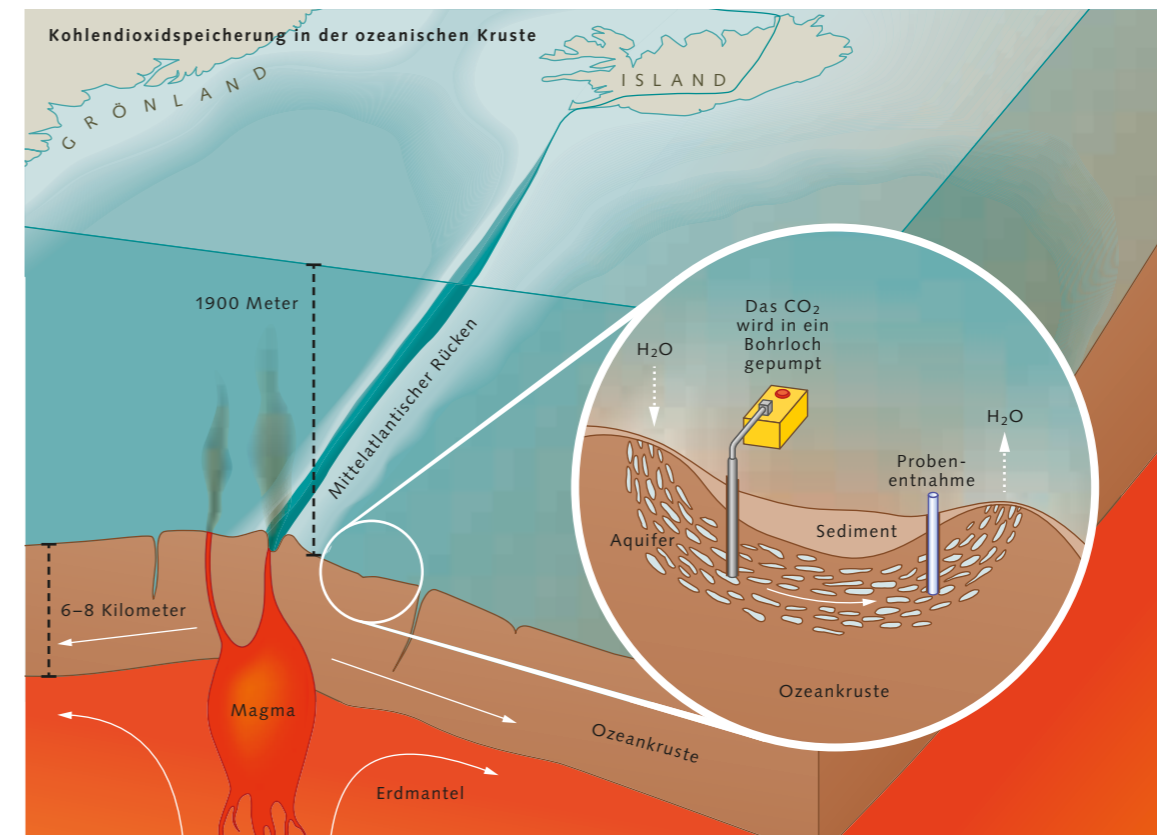
den kann, so würden diese in der Tiefe des Meeres keinen Menschen und Infrastrukturen gefährden. An Land hingegen würden sie ein Risiko darstellen.

Eine Kohlendioxideinlagerung im Tiefseeuntergrund brächte allerdings auch Nachteile: In erkalteter Basaltkruste würde injiziertes Kohlendioxid in einem deutlich geringeren Maß mineralisieren als in warmem Gestein wie auf Island. Außerdem entstünden durch die Arbeit in der Tiefsee hohe Kosten und die Fachleute liefen Gefahr, an die Grenzen der technischen Machbarkeit zu stoßen.

Aufgrund dieser komplexen Ausgangslage müssen die Ziele einer möglichen Speicherung von Kohlendioxid im oberen Teil der Ozeankruste genau abgewogen werden. Das kostengünstigste Verfahren wäre sicherlich, Kohlendioxid im Meerwasser zu lösen und in geringer Wassertiefe niedrigkonzentriert mit hohen Mineralisierungsraten in die Ozeankruste zu verpressen – genau so, wie es bereits auf Island gemacht wird. Die wenigen Gebiete, in denen ein Mittelozeanischer Rücken über den Meeres-

spiegel herausragt, liegen jedoch meist fernab industrieller Zentren, in denen das meiste Kohlendioxid anfällt. Folglich müsste das Treibhausgas zunächst in verflüssigter Form über lange Strecken transportiert werden, bevor es in das Basaltgestein eingeleitet werden könnte.

Würde man hingegen das verflüssigte Kohlendioxid in größerer Wassertiefe direkt in den Porenraum der Basalte verpressen, stünden nicht nur mehr potenzielle Speicherorte zur Auswahl. Es ließen sich innerhalb kurzer Zeit auch sehr große Mengen Kohlendioxid einlagern, die aufgrund von Druck und Temperatur automatisch im Speichergestein verbleiben, dort aber nur sehr langsam mineralisieren würden. Die Mineralisierungsrate wiederum ließe sich steigern, indem man dem Kohlendioxid Meerwasser beimischt und es so verdünnt. Allerdings würde man bei diesem Ansatz deutlich mehr Zeit benötigen, um dieselbe Menge Kohlendioxid zu verpressen, da die Ozeankruste an der Rückenflanke kälter ist als beispielsweise bei „CarbFix“ auf Island.



8.21 > Ob die Kohlendioxideinlagerung in der Tiefsee ein technisch machbares und ökonomisch sinnvolles Verfahren ist, wollen Forschende mit einem Tiefseeforschungsexperiment zur Kohlendioxid-speicherung an einer erkalteten Flanke des Mittelatlantischen Rückens überprüfen.

Verstärkte Forschung, um Wissenslücken zu schließen

Das Spektrum der Möglichkeiten, Kohlendioxid in der oberen Basaltschicht der Ozeankruste zu speichern, wird aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht. Dabei wollen die Forschenden herausfinden:

- ob alle theoretischen Vorüberlegungen zur Kohlendioxid-speicherung in der oberen ozeanischen Kruste richtig und zielführend sind und eine Kohlendioxid-Injektion in den Tiefseeuntergrund tatsächlich umsetzbar ist;
- in welcher Konzentration und in welchen Mengen Kohlendioxid in das Basaltgestein injiziert werden sollte, um damit optimale Reaktionsprozesse zu ermöglichen;
- in welcher Geschwindigkeit das eingeleitete Kohlendioxid im Gestein verteilt und mineralisieren würde;
- mit welchen Verfahren sich die Speicherstätte in der Tiefsee verlässlich und langfristig überwachen ließe und welche Kosten entstünden;
- ob es mögliche Fallstricke gäbe, die in den konzeptionellen Überlegungen bislang keinerlei Berücksichtigung gefunden haben, und
- ob eine Kohlendioxid-einlagerung in der Tiefsee im Vergleich zu Speicherungen an Land oder in den tiefen Sandsteinformationen unter den Schelfmeeren die nachhaltigere, effektivere und langfristig kostengünstigere Option wäre.

Entsprechende Forschungsvorhaben finden im „CarbFix“-Projekt auf Island statt, auf dem Vøring-Plateau vor der Küste Norwegens, im Cascadia-Becken vor der Westküste Kanadas sowie am sogenannten Reykjanes-Rücken, einige Hundert Kilometer südwestlich Islands. Die verschiedenen Projektteams arbeiten eng zusammen und teilen wissenschaftliche Daten zur Struktur, Beschaffenheit und zu den geochemischen Prozessen in den Basalten untereinander. Diese Erkenntnisse werden benötigt, um im Anschluss mithilfe von Computermodellen zu berechnen, wie viel Kohlendioxid sich an welchen Standorten in der oberen Ozeankruste einlagern ließe, welche Kosten dabei entstünden und mit welchen umwelttechnischen Pro-

blemen, Risiken und potenziellen Schäden zu rechnen wäre. Erst wenn diese vielen Fragen beantwortet sind und sich die Gesellschaft bewusst für eine Kohlendioxid-speicherung in der oberen Ozeankruste entscheiden sollte, kann die konkrete Suche nach geeigneten Standorten beginnen.

Rechtliche Rahmenbedingungen für die Kohlendioxid-speicherung unter dem Meer

Wer Kohlendioxid in der Basaltschicht der oberen Ozeankruste oder aber in tief liegenden Sandsteinformationen verpressen will, greift auf den Meeresuntergrund und somit auf ein Gebiet zu, welches von den Vorgaben des Seevölkerrechts geprägt ist. Fachleute geben außerdem zu bedenken, dass CCS-Projekte im Meer unter Umständen zu einem Entweichen von Kohlendioxid und Formationswasser aus dem Meeresboden führen und marine Ökosysteme schädigen können. Deshalb muss der rechtliche Rahmen für die Kohlendioxid-speicherung im Untergrund des Meeres insbesondere auch den Anforderungen des Meeresumweltschutzes Rechnung tragen.

Die Vorgaben des Seevölkerrechts

Am Anfang stellt sich aus seevölkerrechtlicher Sicht die Frage, ob und – gegebenenfalls – wo Staaten berechtigt sind, Kohlendioxid im Meeresuntergrund zu speichern. Antworten darauf liefert das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (UN-Seerechtsübereinkommen). Es teilt die Meere in verschiedene Zonen ein, in denen die Rechte der Küstenstaaten genau definiert sind.

Dazu gehören:

- die Inneren Gewässer und das Küstenmeer eines Staates,
- die Anschlusszone,
- die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ),
- der Festlandsockel,
- die Hohe See und „das Gebiet“ (der Meeresboden in internationalen Gewässern).

Da Innere Gewässer und Küstenmeere der Souveränität des Küstenstaates unterliegen, darf dieser dort ohne



8.22 > Der Verlauf des Mittelatlantischen Rückens lässt sich auf Island mit bloßem Auge erkennen. Diese Kluft ist entstanden, weil sich hier die Eurasische und die Nordamerikanische Erdplatte voneinander wegbewegen.

Weiteres CCS-Vorhaben genehmigen und nach seinen Vorstellungen regulieren. Komplexer wird die Rechtslage mit Blick auf die an das Küstenmeer angrenzende Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) und den Festlandsockel. Bei ihnen handelt es sich um Zonen, in denen dem Küstenstaat nur einzelne, wenn auch ausschließlich souveräne Rechte und Hoheitsbefugnisse zugewiesen sind. Dazu gehören unter anderem die alleinigen Rechte eines Küstenstaates, auf seinem Festlandsockel in den Meeresuntergrund zu bohren und Tunnel anzulegen. Fachleuten zufolge leitet sich daraus auch das alleinige Recht des jeweiligen Küstenstaates ab, die Speicherung von Kohlendioxid auf seinem Festlandsockel seinem nationalen Recht zu unterwerfen, durch eigene Gesetze zu regulieren und die nationalen Vorgaben durchzusetzen.

In den Zonen der Hohen See und des Tiefseebodens (das sogenannte „Gebiet“) verfügt kein Staat über alleinige Rechte. Auf dem Meer, in der Wassersäule sowie am Meeresboden internationaler Gewässer gilt der Grundsatz der Freiheit der Hohen See. Ausgenommen davon sind die Erforschung und Ausbeutung mineralischer Ressour-

cen am Meeresboden. Diese Tätigkeiten unterliegen der Regulierung und Aufsicht der Internationalen Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) mit Sitz in Kingston (Jamaika).

Die Speicherung von Kohlendioxid im Meeresuntergrund der Hohen See fällt hingegen unter das Regime der Hohen See. Damit hat jeder Staat grundsätzlich das Recht, in internationalen Gewässern Kohlendioxid im Untergrund zu verpressen und zu speichern.

Aspekte des völkerrechtlich verankerten Meeresschutzes

Mit der Unterzeichnung des UN-Seerechtsübereinkommens haben sich alle Vertragsparteien verpflichtet, die Meeresumwelt zu schützen und zu bewahren. Die dazu im Übereinkommen festgeschriebenen Vorgaben gelten für alle Meereszonen und zielen in erster Linie darauf ab, Verschmutzungen des Meeres zu verhindern. Nach ganz überwiegender Ansicht gilt dabei das Vorsorgeprinzip. Das heißt, die Vorgaben zum Meeresumweltschutz werden bereits aktiviert, wenn nur die bloße Möglichkeit einer Verschmutzung besteht.

Lange Zeit war fraglich, ob das Verpressen von Kohlendioxid im Meeresuntergrund als Meeresverschmutzung beziehungsweise als Einbringen von Stoffen zu betrachten ist. Seit dem Jahr 2006 jedoch sind diese Fragen auf internationaler Ebene geklärt: Das Protokoll zum Londoner Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen – welches die Normen des Seerechtsübereinkommens konkretisiert – erlaubt seitdem die unterirdische Einlagerung von Kohlendioxid im Festlandsockel eines Küstenstaates und in anderen Gebieten des Meeresuntergrundes, vorausgesetzt, die nach jeweiligem nationalem Recht zuständige Behörde erteilt ihre Genehmigung.

Um den Anforderungen des Vorsorgeansatzes Rechnung zu tragen, vereinbarten die Vertragsparteien, spezielle Richtlinien für die Anwendung von CCS zu erarbeiten. In einer neuen Anlage des Londoner Protokolls sind nun drei Voraussetzungen genannt, die bei der Erteilung der erforderlichen Speichergenehmigung zu beachten sind:

- *Erstens* darf Kohlendioxid nur in unterirdische Gesteinsformationen, nicht aber in die Wassersäule eingebracht werden.
- *Zweitens* muss das eingespeicherte Gas zum größten Teil aus Kohlendioxid bestehen.
- *Drittens* verbietet es, dem zur Speicherung vorgesehenen Kohlendioxid weitere Stoffe hinzuzufügen, um diese ebenfalls zu entsorgen.

Das Londoner Protokoll verpflichtet die Vertragsparteien, sicherzustellen, dass diese drei Vorgaben eingehalten werden, wenn eine Speichergenehmigung erteilt wird. Zudem entbindet die Möglichkeit einer Kohlendioxid-einlagerung die Vertragsparteien nicht davon, weitere Anstrengungen zu unternehmen, um die Notwendigkeit der submarinen Speicherung zu verringern.

Sofern das Einbringen von Kohlendioxid in den Meeresuntergrund genehmigungsfähig ist, muss die zuständige staatliche Behörde eine Auflistung aller sonstigen im Kohlendioxid-Strom enthaltenen Stoffe verlangen. Anderenfalls kann sie keine Genehmigung erteilen. Diese Auflistung soll unter anderem Informationen zu Zusam-

mensetzung, Form, Gesamtmenge, Herkunft, Eigenschaften, Toxizität, Beständigkeit und Bioakkumulationspotenzial aller Stoffe enthalten. Ist die vorzulegende Liste unvollständig oder nicht hinreichend genau, sodass keine ausreichende Beurteilung der Gefahren für die menschliche Gesundheit vorgenommen werden kann, darf das Einbringen nicht genehmigt werden.

Das Londoner Protokoll verpflichtet die Vertragsparteien außerdem, eine nationale Aktionsliste zu erstellen. Sie soll beschreiben, wie die infrage kommenden Kohlendioxid-Ströme und deren Bestandteile überprüft werden können – zum einen im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Meeresumwelt. Zum anderen sollen Grenzwerte für jeden Stoff erarbeitet werden, sodass im Einzelfall entschieden werden kann, ob diese eingehalten werden und das Verpressen des Kohlendioxids demnach erlaubt werden kann. Ist dies nicht der Fall, können Auflagen ausgesprochen werden oder aber die Verpressung wird ganz untersagt.

Vorgaben macht das Londoner Protokoll auch zur Auswahl des Speicherortes: So sollen unter anderem die physikalischen, chemischen und biologischen Gegebenheiten in der Wassersäule und im Meeresuntergrund, die Besonderheiten des Standortes sowie die wirtschaftliche und operative Umsetzbarkeit geprüft werden. Bei der Bewertung der potenziellen Auswirkungen einer Kohlendioxideinlagerung sollen nicht nur die Auswirkungen eines Einbringens in den Meeresuntergrund berücksichtigt werden, sondern auch mögliche Entsorgungsalternativen an Land.

Die Auswirkungen einer Kohlendioxid-speicherung und aller damit verbundenen Arbeiten auf die menschliche Gesundheit, die Meeresumwelt und andere Nutzungsmöglichkeiten im Meer sollen möglichst konservativ eingeschätzt werden und auch Unabwägbarkeiten wie Unfälle berücksichtigen. Kommt die Bewertung zu dem Ergebnis, dass die Auswirkungen zu gefährlich sind, soll die Genehmigung versagt werden. Eine Ablehnung ist jedoch nicht zwingend gefordert.

Wird eine Genehmigung für die unterseeische Speicherung von Kohlendioxid erteilt, gebietet das Londoner Protokoll den Aufbau eines Beobachtungs- und Überwachungsprogramms. Dieses soll gewährleisten, dass die zuvor angenommenen Gegebenheiten und Auswirkungen

tatsächlich zutreffen. Erteilte Genehmigungen sollen anhand der Beobachtungsergebnisse fortlaufend überprüft werden. Entsprechen die tatsächlichen Entwicklungen nicht den Annahmen, kann die Genehmigung zurückgezogen werden.

Die Vertragsparteien zum Londoner Protokoll haben zudem ein Rahmenregelwerk zu Risikobewertung und -management bei der Kohlendioxid-speicherung im Meeresuntergrund verabschiedet. Dieses konkretisiert die Anwendung oder die Umsetzung der Beobachtungsaufgaben und soll unter anderem behördliche Entscheidungsfindung unter Bedingungen wissenschaftlicher Unsicherheit erleichtern. Mit Blick auf die Standortwahl verlangt das Regelwerk zum Beispiel, dass die Speicherkapazitäten, die Speichersicherheit, die Nachhaltigkeit und potenzielle Leckagen sowie deren Effekte erfasst werden.

Bei der Bewertung der Folgen für die Meeresumwelt sollen unter anderem die Empfindlichkeit der ansässigen Arten und die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit analysiert und die jeweiligen temporären und räumlichen Reichweiten dargestellt werden. Mithilfe von Kontrollmessungen an der Speicherstätte, im darüberliegenden Meeresuntergrund sowie am Meeresboden sollen Leckagen rechtzeitig erkannt und ihr Auftreten durch präventive, notfalls aber auch durch vorher geplante reaktive Maßnahmen vermieden werden. Auch nach Stilllegung des Bohrlochs soll die Speicherstätte langfristig vor Ort überwacht werden. Mit wachsender Gewissheit, dass das Kohlendioxid nicht aus der Lagerstätte entweicht, kann die Häufigkeit der Messungen dann jedoch Schritt für Schritt verringert werden.

Dürfen Staaten Kohlendioxid zur Verpressung unter dem Meer exportieren?

Von der diskutierten Zulässigkeit der Kohlendioxid-Verpressung im Meeresuntergrund ist die Frage zu unterscheiden, ob abgeschiedenes Kohlendioxid von Völkerrechts wegen zur Speicherung in andere Staaten exportiert werden darf. Nach Artikel 6 des Londoner Protokolls war es den Vertragsparteien prinzipiell verboten, die Ausfuhr von Abfällen und anderen Stoffen in andere Staaten zur Einbringung oder Verbrennung auf See oder im Meeresuntergrund zu gestatten.

Dieser Artikel 6 wurde allerdings im Jahre 2009 mit spezifischem Bezug auf den grenzüberschreitenden Export von Kohlendioxid zur anschließenden Speicherung geändert. Weil die Änderung jedoch noch nicht von einer ausreichenden Zahl von Staaten ratifiziert wurde, ist sie noch nicht in Kraft getreten. Im Jahr 2019 sind die Vertragsparteien des Londoner Protokolls daher gemeinsam übereingekommen, dass der Artikel 6 vorläufig angewendet werden kann.

Die vorläufige Anwendung eines Vertrages setzt allerdings eine entsprechende Erklärung eines Staates voraus. Eine solche liegt bisher nur von Norwegen, den Niederlanden, Dänemark und Südkorea vor; Finnland und Belgien bereiten diese vor (Stand: September 2022). Wollte Deutschland abgeschiedenes Kohlendioxid in einen dieser beiden Staaten exportieren, müsste es dazu ebenfalls die entsprechende Erklärung abgeben. Zudem setzt der geänderte Artikel 6 des Londoner Protokolls auch für den Fall, dass er vorläufig angewendet wird, den Abschluss eines Abkommens zwischen exportierendem und importierendem Staat voraus.

Auf Grundlage dieser rechtlichen Rahmenbedingungen kommen Fachleute zu dem Schluss, dass die Vertragsparteien des Londoner Protokolls alle rechtlichen Voraussetzungen geschaffen haben, dass Kohlendioxid im Meeresuntergrund gespeichert und zu diesem Zweck exportiert werden darf. Die finale Entscheidung über die Zulässigkeit einer Speicherung und eines möglichen Kohlendioxid-Transportes aber wird weiterhin auf nationaler Ebene gefällt.

Wie die rechtlichen Rahmenbedingungen auf nationaler Ebene umgesetzt werden, hängt für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union derzeit auch noch von der EU-Richtlinie zur Speicherung von Kohlendioxid ab. Diese erlaubt die geologische Speicherung von Kohlendioxid im Hoheitsgebiet der EU-Mitgliedsstaaten, in ihren Ausschließlichen Wirtschaftszonen und in ihren Festlandsockeln im Sinne des UN-Seerechtsübereinkommens. Jedes Speicherprojekt muss jedoch durch die zuständige nationale Behörde genehmigt werden.

Die deutsche Bundesregierung hat diese EU-Richtlinie im August 2012 national unter anderem mit dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) sehr restriktiv umgesetzt. Das Gesetz stellt derzeit auf zweierlei Weise ein

Hindernis für die Durchführung von Kohlendioxid-Speicherprojekten in der deutschen Nord- und Ostsee dar: Es enthält zum einen eine Klausel, wonach Anträge für die Zulassung von Kohlendioxidsspeichern bis zum Ende des Jahres 2016 hätten eingereicht werden müssen. Zum anderen räumt der Bundesgesetzgeber den Bundesländern das Recht ein, bestimmte Gebiete von einer möglichen Kohlendioxidsspeicherung auszunehmen. Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein haben dieses Recht genutzt, um alle unter ihrer Verantwortung stehenden Meeresgebiete von einer Kohlendioxidsspeicherung im Untergrund auszuschließen. Auf diese Weise haben sie quasi ein Verbot der unterirdischen Kohlendioxidsspeicherung im küstennahen Bereich der deutschen Nord- und Ostsee verhängt.

Paragraph 44 des Kohlendioxid-Speichergesetzes erfordert, dass alle vier Jahre ein Evaluierungsbericht über die Anwendung des Gesetzes und die national und international gewonnenen Erfahrungen zu Carbon Capture and Storage (CCS) erstellt wird. Im aktuellen zweiten Evaluierungsbericht aus dem Jahr 2022 stellen die Autoren und Autorinnen abschließend fest, dass der zu jenem Zeitpunkt gültige deutsche Rechtsrahmen der konkreten Anwendung von CCS in der Praxis entgegensteht. Gleichzeitig zeigt der Bericht auf, dass CCS- und CCU-Technologien in unterschiedlichen Abstufungen dazu beitragen können, dass Deutschland sein Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 erreicht.

Welche Bedeutung Verfahren zur Kohlendioxidabscheidung, -speicherung oder anschließender -weiterverarbeitung künftig haben sollen, wird derzeit (Stand: Sommer 2023) in der Debatte um eine deutsche Carbon-Management-Strategie diskutiert. In dieser Strategie sollen denkbare Einsatzfelder für CCU- und CCS-Technologien näher bestimmt sowie die ökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für ihren möglichen schnellen und großflächigen Einsatz erarbeitet werden.

Im Zuge dessen empfiehlt die Bundesregierung, das Kohlendioxid-Speichergesetz derart zu erweitern und anzupassen, dass es einen geeigneten Rechtsrahmen für CCS und CCU von der Quelle des Kohlendioxids über dessen Transport bis zur dauerhaften Speicherung und Nutzung bietet. Dieser Rechtsrahmen wird dringend benötigt: Ein Entwurf zur Novelle des deutschen Klima-

schutzgesetzes sieht nämlich vor, dass die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund ein integraler Bestandteil der nationalen Klimapolitik werden soll und erstmals Speicherziele für die Jahre 2035, 2040 und 2045 vorgegeben werden sollen (Stand: Juni 2023). Die Ziele des Klimaschutzes, der Treibhausgasneutralität bis 2045 sowie einer Netto-Kohlendioxid-Entnahme nach dem Jahr 2050 sollen dabei ebenfalls fest im Gesetz verankert werden.

Handlungsdruck entsteht auch durch eine neue Initiative der EU-Kommission. Diese hat im März 2023 angekündigt, bis zum Jahr 2030 geologische Kohlendioxid-speicher für die langfristige Lagerung von 50 Millionen Tonnen Kohlendioxid zu schaffen. Der Plan gehört zum neuen Net-Zero Industry Act der EU-Kommission, in dem CCS als Brückentechnologie für eine nachhaltige Entwicklung aufgeführt wird.

In dem Gesetzesvorschlag sieht die Kommission vor, dass die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union zeitnah Daten über Gebiete veröffentlichen, in denen Kohlendioxid-Speicherstätten genehmigt werden könnten, und jährlich über die Fortschritte bei der Entwicklung von Kohlendioxid-Speicherprojekten auf ihrem Gebiet berichten. Die dafür notwendigen Erkundungs- und Erschließungsarbeiten wiederum sollen erdöl- und erdgasfördernde Unternehmen erbringen und finanzieren. Das heißt im Klartext: Die Öl- und Gasproduzenten werden von der Politik in die Pflicht genommen. Nicht die Staaten, sondern die Unternehmen sollen mehr geologische Speicher erkunden und die benötigten Speicherkapazitäten von mindestens 50 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr zur Verfügung stellen.

Die Reaktionen auf diesen Gesetzesvorschlag waren geteilt. Während CCS-Befürworter die Initiative begrüßten, gaben Kritiker zu bedenken, dass viel wichtiger sei, die Entstehung von Treibhausgasen grundsätzlich zu verhindern. Alle Anstrengungen müssten deshalb in entsprechende Technologien und Verhaltensänderungen investiert werden – und nicht in CCS.

Eines ist sicher: Die politischen und gesellschaftlichen Debatten zu CCS werden in den kommenden Monaten und Jahren weitergehen und mit großer Wahrscheinlichkeit auch zu neuen Regelungen und Gesetzen führen, insbesondere in Deutschland.

Kohlendioxidsspeicherung unter dem Meer: Ein umstrittenes Verfahren im Aufwind

Kohlendioxid lässt sich abscheiden – sowohl direkt aus der Luft als auch aus Abgasströmen. Beide Verfahrensansätze spielen in der Klimapolitik eine zunehmend wichtigere Rolle. Durch ihren Einsatz soll es gelingen, schwer vermeidbare Restemissionen von Industrie und Landwirtschaft auszugleichen oder aber ihre Freisetzung von vornherein zu verhindern. Zudem können auch Kohlendioxid-Entnahmemethoden wie die viel diskutierte Energie- und Wärmegewinnung in Biomasse-Heizkraftwerken nur dann zu einem Emissionsausgleich beitragen, wenn das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxid abgeschieden wird und man es anschließend zu langlebigen Produkten wie Kohlefasern weiterverarbeitet oder aber sicher eingelagert. Daher sind Technologien zur Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) zentral, wenn das Ziel der globalen Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 erreicht werden soll.

Die Zahl der weltweit in Betrieb befindlichen Abscheidungsanlagen steigt: Fraglich ist allerdings, wo das entnommene Kohlendioxid dauerhaft gespeichert werden soll. Fachleute gehen davon aus, dass der größte Teil des Gases nicht langfristig weiterverarbeitet werden kann, sondern stattdessen eingelagert werden muss – bestenfalls unterirdisch, in Gesteinsschichten, die von einer undurchlässigen Deckschicht verschlossen sind, sodass das Kohlendioxid nicht nach oben entweichen kann. An Land stoßen entsprechende Pläne vielerorts auf Widerstand, weil infolge einer Kohlendioxid-Verpressung das Erdbebenrisiko steigen und das Grundwasser verschmutzt werden könnte.

Fachleute suchen deshalb verstärkt nach geeigneten Speichergesteinen im Meeresuntergrund. Infrage kommen sowohl Sandsteinformationen als auch die poröse obere Basaltschicht der Ozean-

kruste. Technologien für eine Kohlendioxidsspeicherung in Sandsteinformationen werden seit dem Jahr 1996 erfolgreich eingesetzt, vor allem in norwegischen Gewässern. In die obere Ozeankruste wird Kohlendioxid bisher nur auf Island injiziert, weil das Basaltgestein dort bis über die Meeresoberfläche hinausragt und leicht zu erreichen ist. Über das Speicherpotenzial von Basaltgesteinen im tiefen Meeresuntergrund hingegen ist noch nicht viel bekannt. Es wird aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht.

Ein grundlegender Unterschied aber ist bereits bekannt: In Sandstein verpresstes Kohlendioxid verweilt unter Umständen viele Tausend Jahre lang im Porenwasser des Gesteins, bevor es mineralisiert und damit in fester Form sicher gebunden wird. Im reaktionsfreudigen Basaltgestein hingegen laufen die für eine Mineralisierung verantwortlichen Prozesse deutlich schneller ab.

Dennoch ist auch eine Kohlendioxid-Verpressung unter dem Meer nicht ohne Risiken. Lagerstätten müssen daher gründlich erkundet, wohlüberlegt ausgewählt und am Ende über lange Zeit hinweg und umweltschonend (lärm-)überwacht werden. Zudem kann eine Kohlendioxid-Verpressung andere Meeresnutzungsformen in dem betroffenen Gebiet unter Umständen einschränken.

Rechtlich geregelt wird die Kohlendioxidsspeicherung unter dem Meer in erster Linie durch neue Richtlinien im Protokoll zum Londoner Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Protokoll). Es macht zum Beispiel Vorgaben, was verpresst werden darf und wie eine Überwachung der Lagerstätte sichergestellt werden soll. Die finale Entscheidung über eine Genehmigung für beantragte Projekte obliegt jedoch den staatlichen Behörden, welche auf nationaler Ebene für eine Umsetzung des Londoner Protokolls verantwortlich sind.

9 Leitprinzipien und Regeln für einen Einsatz mariner CDR-Verfahren

> Es gibt keinen Zweifel mehr daran, dass die Menschheit der Atmosphäre Kohlendioxid entnehmen muss, wenn sie ihre Klimaziele erreichen will. Die Anforderungen an solch eine Entnahme sind allerdings enorm: Weder Natur noch Menschen sollen Schaden nehmen. Gleichzeitig soll die Entnahme klimawirksam und dauerhaft sein. Erste Thesen, Leitprinzipien und Regulierungsansätze dafür wurden entwickelt. Die Debatte darüber aber hat gerade erst begonnen.



Wie regelt man eine verstärkte CO₂-Aufnahme des Meeres?

> Die Menschheit steckt in einem Dilemma: Jahrzehntlang haben wir die Gefahr des Klimawandels ignoriert. Umso dringender werden jetzt Lösungen benötigt. Meeresbasierte Verfahren zur Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre könnten uns helfen, einen Teil unserer Restemissionen auszugleichen. Entsprechende Maßnahmen jedoch kontrolliert, fair und verantwortungsvoll umzusetzen, stellt eine Mammutaufgabe dar. Gebraucht werden klare internationale Regeln und Prinzipien, denn der Ozean lässt sich nur gemeinsam nutzen und schützen.

Eine ungewohnte Dynamik

Die zunehmend drastischeren Auswirkungen des Klimawandels führen aktuell in Politik und Wissenschaft zu einer ungewohnten Parallelität von Prozessen. Zwei Beispiele: In Deutschland berät die Regierung bereits mit einer Vielzahl an Fachleuten über eine Änderung der rechtlichen Rahmenbedingungen für eine Speicherung von Kohlendioxid tief unter dem Meer, während Meeresforschende noch dabei sind, potenzielle Speichergesteinsschichten unter deutschen Gewässern auf ihre Eignung zu überprüfen und geeignete Überwachungssysteme zu entwickeln. Auf internationaler Ebene hingegen wird unter anderem diskutiert, welche Entnahme- und Speicherungsarten zertifiziert werden dürfen, während noch nicht einmal wissenschaftliche Einigkeit darüber besteht, ab wann eine Entnahme und Speicherung von Kohlendioxid tatsächlich als dauerhaft und somit als klimarelevant gilt.

In Politik und Wirtschaft, so scheint es, macht sich allmählich die Hoffnung breit, durch den Einsatz von Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) oder durch die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid aus fossilen Quellen (Carbon Capture and Storage, CCS) könne man jene Zeit zurückgewinnen, die durch die dauernde Verschleppung wirksamer Klimaschutzmaßnahmen jahrzehntlang vergeudet wurde. Bei allem Handlungsdruck kommt dabei die gesellschaftliche Debatte zu kurz, die über den Einsatz meeresbasierter CDR-Verfahren geführt werden muss. Und diese ist, so viel kann an dieser Stelle schon gesagt werden, keine leichte, denn es gilt eine Vielzahl an Aspekten zu berücksichtigen.

Auf der einen Seite sind wir mit der stetig zunehmenden Dringlichkeit drastischer Emissionsreduktionen konfrontiert. Auf der anderen Seite gibt es berechnete

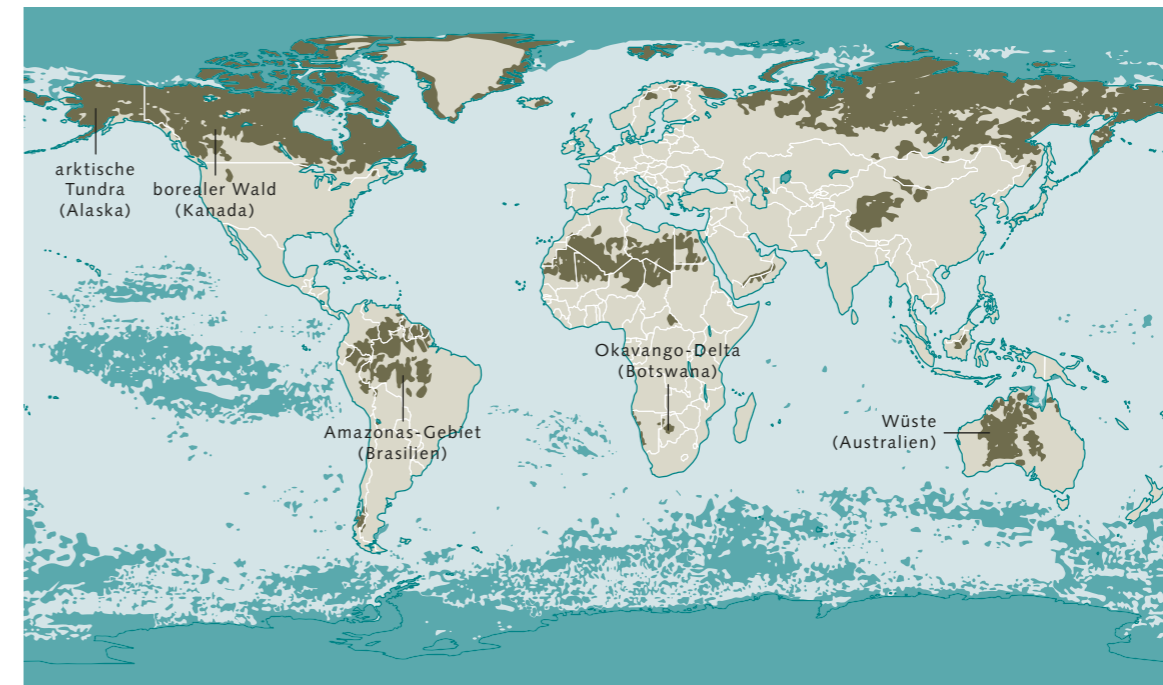
Bedenken zum Meeres- und Artenschutz sowie zu potenziellen Nutzungsansprüchen und -konflikten. Dazu gesellen sich Fragen zur Klima- und Verteilungsgerechtigkeit, und letztendlich geht es auch darum, rechtliche Rahmenbedingungen festzusetzen sowie Institutionen und Instrumente zu entwickeln, mit denen sich ein möglicher Einsatz meeresbasierter CDR-Verfahren steuern und kontrollieren ließe.

Mit der wissenschaftlichen und politischen Debatte zu CDR-Verfahren Schritt zu halten, ist für Außenstehende kaum möglich. Denn nahezu wöchentlich gibt es neue wissenschaftliche Erkenntnisse oder neue politische Strategien, Empfehlungen und Debatten, sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene. In den meisten Fällen ist dabei nicht sofort absehbar, welche Rolle die Erkenntnisse und Strategien eines Tages spielen werden. Harmlos anmutende technische Details können enorme Bedeutung erlangen – so zum Beispiel, wenn es um die Frage geht, ab wann eine Kohlendioxidspeicherung als „dauerhaft“ bezeichnet werden kann. Einige Fachleute schlagen einen Mindestzeitraum von 200 bis 300 Jahren vor. Andere argumentieren, dass auch eine Entnahme mit anschließender Speicherung über 50, 60 oder 100 Jahre kurzfristig helfe, Emissionen zu kompensieren, und somit wichtig sei und gefördert werden könne – beispielsweise durch die Zuteilung von Subventionen oder aber auch durch die Vergabe zeitlich begrenzter Entnahmezertifikate.

Dieses Kapitel kann daher nur eine Momentaufnahme vom Stand des Wissens und der Diskussionen liefern. Unsere Leitfragen lauten dabei: Sollten meeresbasierte CDR-Verfahren eingesetzt werden, wenn sie sich als klimawirksam erweisen? Und wenn ja, durch welche politischen und rechtlichen Instrumente ließe sich ein solcher Einsatz steuern und regulieren – und wer sind die wichtigsten Akteure in diesem Prozess?

Die wenigen Flecken verbliebener Wildnis auf der Erde

verbliebene Wildnis: ■ an Land ■ im Meer



9.1 > Echte Wildnis sucht man auf der Erde bald vergebens. 77 Prozent der Landoberflächen, mit Ausnahme der Antarktis, und 87 Prozent des Ozeans hat der Mensch bereits durch Eingriffe in die Natur verändert.

Der Ozean ist kein leerer, ungenutzter Raum

Anfang Juni 2023 veröffentlichte eine renommierte britische Tageszeitung einen flammenden Appell gegen einen übereilten Einsatz mariner CDR-Verfahren. Das Hauptargument darin lautete, der Ozean werde von einer wachsenden Zahl politischer und wirtschaftlicher Akteure als großer, leerer Raum betrachtet und damit als ungenutzte Ressource, welche die Menschheit ausbeuten und mit viel Erfindungsreichtum in etwas Nützliches verwandeln könne.

Diese Sichtweise sei höchst gefährlich, führt der Artikel fort, denn sie ignoriere zum einen die zentrale Rolle, welche der Ozean für den Fortbestand des Lebens auf der Erde spiele. Zum anderen werde übersehen, wie eng verzahnt die Physik, Chemie und Biologie der Meere seien und unter welchem Druck die Meeresorganismen bereits jetzt stünden. Jeder Einsatz von CDR-Verfahren werde deshalb Veränderungen in der Meeresumwelt hervorrufen, deren Ausmaß kaum vorhergesagt werden könne, eben weil noch nicht verstanden sei, wie alles funktioniere und ineinandergreife.

Wissenschaftliche Beobachter der politischen Debatte um marine CDR-Verfahren bestätigen, dass Befürworter einer verstärkten meeresbasierten Kohlendioxid-Entnahme häufig argumentieren, der Ozean sei ein Raum der unbegrenzten Möglichkeiten und seine Inanspruchnahme für einen Emissionsausgleich mit weniger Problemen und Konflikten verbunden als eine Nutzung von Landflächen. Dabei ignorieren die Fürsprecher jedoch, dass der Welt-ozean schon heute ein intensiv genutzter Raum und der Fußabdruck des Menschen in nahezu allen Meeresgebieten sichtbar ist. Eine Studie aus dem Jahr 2018 beispielsweise ergab, dass zum damaligen Zeitpunkt bereits 87 Prozent der Meeresfläche durch den Menschen verändert worden waren. Es existierten nur noch wenige Meeresgebiete in der Arktis und Antarktis, in denen bis dahin nicht oder nur wenig gefischt worden war, die nicht mit Schiffen befahren wurden und noch nicht nachweislich durch Chemikalien und Plastik verschmutzt worden waren.

Die Aussicht auf Einsätze meeresbasierter CDR-Verfahren im industriellen Maßstab weckt zudem Befürchtungen, Küstengewässer könnten für kommerzielle Zwecke privatisiert und die lokale Bevölkerung vertrieben

9.2 > Das Stelzenfischen ist eine jahrhundertealte Tradition in Sri Lanka und Nahrungs- und Einnahmequelle für viele Kleinfischerfamilien. Deren Ansprüche an das Meer müssen berücksichtigt werden, wenn über einen Einsatz von CDR-Verfahren nachgedacht und diskutiert wird.

werden. Solche Bedenken werden international unter dem Stichwort „Ocean Grabbing“ (Meeresvereinnahmung) diskutiert und verdeutlichen, wie wichtig in diesem Zusammenhang auch Fragen der Verteilungs- und Klimagerechtigkeit sind.

Ein möglicher Diskursrahmen: Neun Thesen zur Ethik von CDR-Verfahren

Die aktuelle Ausgangslage stellt sich also wie folgt dar: Der Mensch nutzt den Ozean intensiv und hat ihn und seine Lebensgemeinschaften bereits in großen Teilen verändert. Gleichzeitig zwingen uns die zunehmenden Folgen des Klimawandels, endlich wirksame Klimaschutzmaßnahmen zu treffen – womöglich auch mithilfe des Meeres. Aus diesem Dilemma, so argumentieren Philosophen, ergeben sich zwei entscheidende moralische Fragen für unsere Gesellschaft: Wenn CDR-Verfahren zum Klimaschutz beitragen können, sollten wir sie dann auch tatsächlich anwenden? Und was vom potenziell Machbaren ist auch erlaubt oder gar geboten? Deutsche Klima- und Umweltethiker haben versucht, die philosophische Debatte dazu in neun Thesen zusammenzufassen, die sich als Rahmen eines gesellschaftlichen Diskurses anbieten. Diese lauten:

1. Eine pauschale Bewertung von CDR-Verfahren ist nicht möglich – stattdessen muss differenziert werden.

Aus Sicht der Philosophen gibt es weder ein überzeugendes Argument, welches CDR-Verfahren immer und überall rechtfertigt, noch ein überzeugendes Argument, welches zeigt, dass solche Verfahren niemals eingesetzt werden dürfen. Die möglicherweise positive Klimawirkung der Verfahren sei moralisch so bedeutsam, dass eine nicht unerhebliche Menge konkreter CDR-Projekte aus moralischer Sicht wahrscheinlich erlaubt oder gar geboten sei.

2. Wer zu vorsichtig ist, verkennt die Gefahr des Klimawandels.

Der Klimawandel habe das Potenzial, eine der einschneidendsten Katastrophen der Menschheitsgeschichte zu werden. Außerdem, so die Ethiker, seien

gefährliche Auswirkungen des Klimawandels kein Zukunftsszenario mehr, sondern in vielen Teilen der Welt längst bittere Realität. Dennoch könne die Menschheit noch immer dafür sorgen, den Klimawandel einzudämmen. Die Position, nicht einzugreifen, sei hingegen wenig überzeugend. Dafür stehe viel zu viel auf dem Spiel. Sollte der Einsatz von CDR-Verfahren tatsächlich geeignet sein, die immense Gefahr des Klimawandels abzumildern, spräche vieles dafür. Negative Nebenwirkungen und andere Bedenken müssten sich daran messen, was der Einsatz von CDR-Methoden Positives leisten könne. Zu begreifen, dass es inzwischen auch moralisch geboten sein kann, Maßnahmen gegen den Klimawandel zu treffen, die selbst moralisch problematisch sind, bedeute nach Ansicht der Ethiker, die Tragik der Situation besser zu verstehen, in die sich die Menschheit selbst manövriert habe, indem sie nicht früher und entschiedener Klimaschutz betrieben hat.

3. Wer zu unvorsichtig ist, verkennt die Gefahren von CDR-Verfahren.

Dennoch gäbe es aus zwei Gründen keinen moralischen Freifahrtschein für klimaregulatorische Eingriffe in den Ozean. Erstens, weil uns auch alternative Optionen zur Verfügung stehen. Emissionen könnten stärker reduziert werden; es könnte noch mehr in Anpassung investiert werden. Und selbst schwer vermeidbare Restemissionen könnten vermieden werden, wenn wir als Gesellschaft bereit wären, den ökonomischen und nicht ökonomischen Preis dafür zu zahlen. Zweitens könnten CDR-Maßnahmen Nebenwirkungen haben, die moralisch hochgradig problematisch sind. Da CDR-Verfahren sich sehr voneinander unterscheiden können, gilt diese Aussage für jedes Verfahren in einem unterschiedlichen Maß, weshalb ein differenzierter Blick auf einzelne Methoden und konkrete Einsatzszenarien notwendig sei, so die Fachleute. Die moralische Situation werde zudem dadurch verkompliziert, dass die möglicherweise von den Folgen eines CDR-Einsatzes betroffenen Menschen nicht unbedingt dieselben sein müssen, die anderenfalls durch den Klimawandel selbst bedroht sind. Das Fazit müsste deshalb lauten: Auch die schwerste Krankheit

(die Folgen des Klimawandels) berechtige nicht die Verabreichung jeder potenziell nützlichen Medizin (Einsatz von CDR-Verfahren), wenn dadurch Dritte geschädigt werden.

4. Der Einsatz von CDR-Methoden darf die Dekarbonisierung nicht verhindern.

Moralisch oberste Priorität habe die Dekarbonisierung – das heißt in der Konsequenz die Vermeidung menschengemachter Treibhausgasemissionen. In der Debatte um CDR-Maßnahmen wird allerdings oft auch das Argument der sogenannten verdrängten Emissionsreduktion angeführt. Dahinter verbirgt sich die Sorge, die Aussicht auf und der Einsatz von CDR-Methoden könnten dazu führen, dass die Menschheit sich weniger anstrengt, Treibhausgasemissionen zu vermeiden. Während Klimaforschende ganz klar argumentieren, dass eine Vermeidung von Emissionen die viel wirksamere Methode ist, die Erderwärmung zu begrenzen, als Kohlendioxid nach seiner Freisetzung der Atmosphäre wieder zu entnehmen, verweisen die Ethiker auf eine andere wichtige moralische Frage, die ihrer Ansicht nach hinter dieser Diskussion stecke – nämlich die Frage, welche Emissionen durch CDR-Maßnahmen ausgeglichen werden dürften und welche nicht. Moralisch, so die Philosophen, könnten

bestimmte Formen eines Emissionsausgleiches als Übergangslösung durchaus akzeptabel sein – etwa bei besonders schwer vermeidbaren Restemissionen in der Lebensmittel- und Zementherstellung.

5. Der Klimawandel ist eine zentrale Umweltkatastrophe – und leider nicht die einzige.

Der Klimawandel ist eine Umweltkatastrophe, die massive globale Ungerechtigkeiten hervorruft und den Einsatz von CDR-Verfahren moralisch rechtfertigen kann. Nichtsdestotrotz sei das Ziel der Treibhausgasneutralität nicht das einzige Gebot der Stunde. Angesichts des gleichzeitig stattfindenden sechsten Massenaussterbens (mehr dazu in Kapitel 1) muss es nach Ansicht der Ethiker um eine ökologische Neutralität gehen. Klimaschutz und -techniken dürften nicht auf Kosten des Umwelt- und Artenschutzes erkaufte werden. Beides muss zusammen gedacht werden, um die natürlichen Ressourcen unseres Planeten zu schützen und eine Antwort auf die ökologischen Krisen zu finden.

6. CDR-Maßnahmen, die auch dem Naturschutz dienen, verdienen besondere Beachtung.

Gerade weil sich die Klima- und Artenkrise nur gemeinsam lösen lassen, verdienen Maßnahmen, die mit bestehenden Naturschutzzielen einhergehen und gleichzeitig eine Klimawirkung erzielen, besondere Beachtung. Sie seien moralisch „niedrig hängende Früchte“ – das heißt, für sie sprechen aus gleich mehreren Perspektiven starke Gründe. Ihr Potenzial sollte erforscht und genutzt werden.

7. Die durch den Einsatz von CDR-Verfahren entstehenden Lasten sollten fair verteilt werden.

Durch den Einsatz von CDR-Verfahren werden zweifelsohne Lasten entstehen, schreiben die Fachleute. Es werden zum einen ökonomische Ressourcen verbraucht (Geld, Energie, Ausgangsmaterialien etc.); zum anderen werde jede CDR-Anwendung im globalen Maßstab vermutlich auch erhebliche negative Nebenwirkungen nach sich ziehen. Auf wen diese Lasten fallen werden, sei eine zentrale Frage der Verteilungsgerechtigkeit im Hinblick auf Maßnahmen zur

9.3 > Giftige Algenblüten infolge einer Überdüngung der Küstengewässer treten mittlerweile vielerorts auf und können zu massiven Fischsterben führen. Gelänge es der Menschheit, diese zusätzlichen Stressfaktoren zu minimieren, würde der Gesundheitszustand des Meeres sich verbessern und damit auch seine natürliche Kohlendioxidaufnahme.



9.4 > Lange Kondensstreifen über der Nordsee verraten, welche Strecke Passagierflugzeuge von und nach Europa geflogen sind. Der internationale Flugverkehr ist eine der am schnellsten wachsenden Treibhausgasquellen und machte im Jahr 2018 etwa 2,5 Prozent der globalen CO₂-Emissionen aus.



Kohlendioxid-Entnahme. Die Ethiker berufen sich an dieser Stelle auf das Verursacherprinzip und schlagen vor, dass Lasten vor allem auf jene Akteure entfallen sollten, die seit Bekanntwerden des Klimawandel-Problems besonders viel zu eben diesem beigetragen haben. Das gelte in erster Linie für wohlhabende Schichten, welche oft, aber nicht notwendigerweise, in wohlhabenden Staaten residieren würden. Abzulehnen sei es, wenn diejenigen Bevölkerungsgruppen zur Kasse gebeten würden, die am meisten von den positiven Klimawirkungen eines CDR-Einsatzes profitieren würden. Denn dies wären in erster Linie arme und besonders verwundbare Bevölkerungsgruppen.

8. Prozedurale Gerechtigkeit ist wichtig – aber schwer umzusetzen.

Die Frage nach einer prozeduralen Gerechtigkeit spielt eine wichtige Rolle in der CDR-Debatte. Dazu gehört der Anspruch, dass CDR-Verfahren nicht nur auf transparente Weise erforscht werden, sondern im Fall des Falles auch fair umgesetzt werden. Die Forderung nach transparenter Kommunikation sei nach Auffassung der Ethiker unumstritten. Sofern keine schwerwiegenden Gründe dagegensprächen, sollten Wirkungsweisen, antizipierte sowie bereits eingetretene Folgen von CDR-Einsätzen öffentlich gemacht werden, damit Betroffene eine wohlinformierte Haltung entwickeln könnten.

Eine zweite viel diskutierte Forderung lautet: Alle von möglichen CDR-Einsätzen betroffenen Interessenträger sollten ein Mitspracherecht in den jeweiligen Entscheidungsprozessen erhalten. Dabei stellen sich jedoch die Fragen: Wer zählt als betroffen und welches Mitspracherecht ist gefordert – ein Vetorecht oder etwas Schwächeres? Plausiblerweise zählen mindestens Menschen, die unter negativen Nebenwirkungen von CDR-Einsätzen leiden werden, und jene Menschen, die von der positiven Klimawirkung profitieren werden, zu den Betroffenen. Die Gruppe der Profitierenden sei unter Umständen jedoch sehr groß und in Raum und Zeit verteilt, argumentieren die Ethiker. Sie in Entscheidungsprozesse mit einzubeziehen, gestalte sich deshalb als sehr schwierig. Sie auszuschließen sei allerdings ebenfalls nicht überzeugend. Es gebe des-

halb Gründe, zumindest Vertreter oder Ombudsleute der von den positiven Klimawirkungen profitierenden Bevölkerungsgruppen an Entscheidungsprozessen teilhaben zu lassen.

9. Die Diskussion zeigt unser moralisches Versagen an.

Die Klimakrise ist nach Auffassung der Ethiker nicht nur das Resultat der Emissionen aus den zurückliegenden 200 Jahren, sondern auch der unzureichenden Klimapolitik in den letzten Jahrzehnten. Es herrsche in der Klimaethik deshalb weitgehende Einigkeit darüber, dass die bisherigen unzulänglichen Reaktionen auf den Klimawandel moralisch zu verurteilen seien. Unsere Situation sei deshalb von einem moralischen Versagen geprägt. Dennoch gäbe es die Möglichkeit, wenigstens ab jetzt moralisch akzeptabel auf den Klimawandel zu reagieren.

Der Impuls, nicht über Reaktionen auf den Klimawandel sprechen zu wollen, die selbst moralisch problematisch sind, sei verständlich, aber der Situation nicht angemessen. Eine zentrale Herausforderung für eine moralische Debatte um den Einsatz von CDR-Verfahren sei deshalb, den Ernst der Situation zu würdigen, ohne in ein fatalistisches „Heute ist alles erlaubt, weil morgen alles zu spät ist“ zu verfallen.

Leitprinzipien für die Steuerung und Regulierung von CDR-Verfahren

Basierend auf dieser philosophischen Argumentationskette und den vielen Erkenntnissen aus den Umwelt- und Gesellschaftswissenschaften haben Forschende vier Leitprinzipien zur Steuerung und Regulierung von land- und meeresbasierten CDR-Verfahren entwickelt. Ihnen zufolge sollte:

- die Reduktion und Vermeidung von Treibhausgasemissionen bei allen Entscheidungen Vorrang haben,
- die Klimaeffektivität und Dauerhaftigkeit der Kohlendioxid-Entnahme stets sichergestellt sein,
- auf die Umweltintegrität entsprechender Maßnahmen geachtet und
- mögliche Zielkonflikte gesteuert werden.

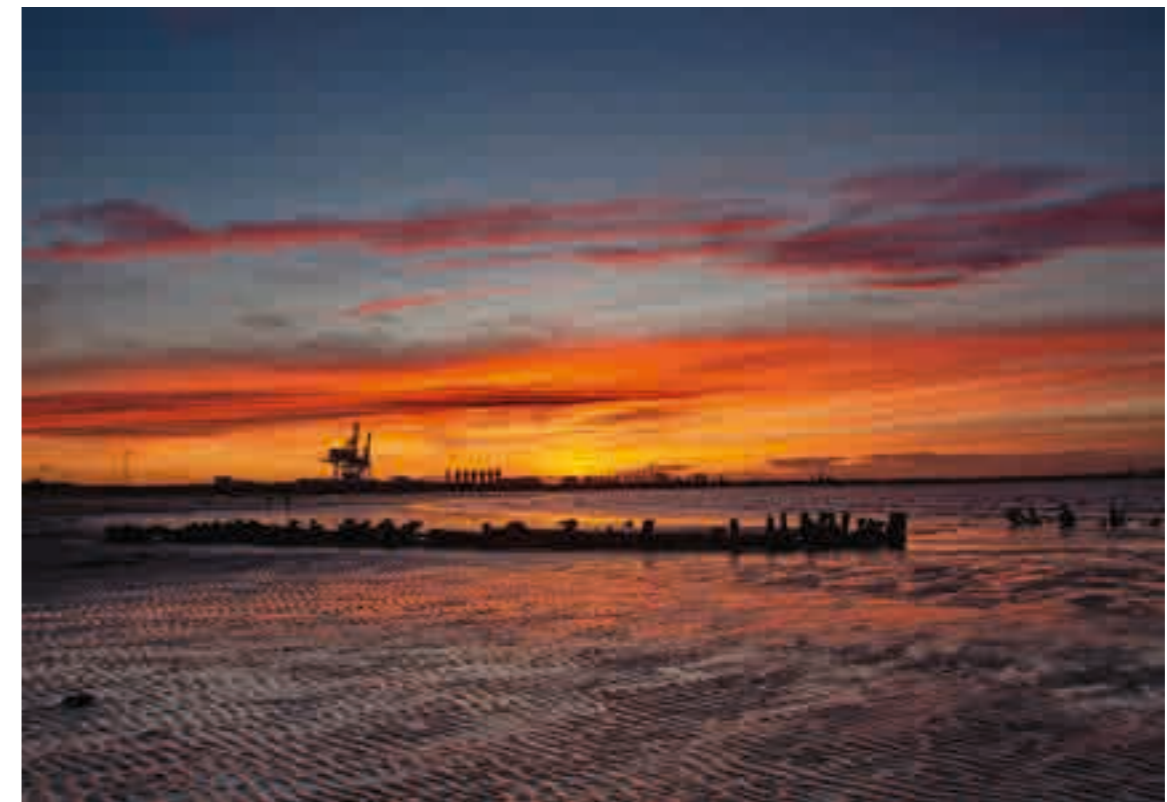
Vorrang der Emissionsreduktion

Weil durch eine Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre nicht die eigentliche Ursache des Klimawandels (hoher Treibhausgasausstoß) adressiert wird, muss das Ziel der Emissionsvermeidung aus drei Gründen Vorrang bei allen klimapolitischen Entscheidungen haben. Den Ausstoß einer Tonne Kohlendioxid zu verhindern, begrenzt erstens die globale Erwärmung deutlich wirksamer, als dieselbe Menge Kohlendioxid der Atmosphäre zu entnehmen. Grund dafür sind die vielen Wechselwirkungen im Klimasystem der Erde. Zweitens bedeutet eine bloße Entnahme von Kohlendioxid noch lange nicht, dass das Gas fortan nicht mehr in die Atmosphäre entweichen und dort klimawirksam werden kann. Und drittens ist eine technologische Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre oder dem Meer notwendigerweise mit dem Einsatz von Energie und Ressourcen sowie gegebenenfalls einer Beeinträchtigung von Umweltzielen verbunden. Dadurch werden neue Treibhausgasmengen freigesetzt, Möglichkeiten der Emissionsvermeidung eingeschränkt

oder aber (Meeres-)Flächen beansprucht, die anderweitig genutzt werden könnten.

Aus diesem Grund müssen die klimapolitischen Akteure den Vorrang der Emissionsvermeidung und -reduktion auf allen Ebenen sicherstellen. Ein wichtiger Schritt wäre, dass Staaten ihre Kohlendioxid-Entnahmeziele getrennt von ihren Zielen zur Emissionsreduktion aufführen, sodass jederzeit nachvollzogen werden kann, ob auch genügend Anstrengungen in die Emissionsvermeidung geflossen sind.

Klar differenziert werden muss auch auf Unternehmensseite: So sollte es Firmen nicht erlaubt werden, vermeidbare Emissionen beliebig durch einen Einsatz von CDR-Maßnahmen zu kompensieren. Ansonsten würden Emissionsreduktionen allzu leicht durch Kompensationsmaßnahmen verdrängt – eine Strategie, die in der gesellschaftlichen Debatte zu CDR auch als „mitigation deterrence“ (verdrängte Emissionsreduktion) bezeichnet wird. Verhindern ließe sich eine solche Verdrängung unter anderem durch strenge Regeln im Europäischen



9.5 > Die Küstenzonen der Erde gehören zu den am intensivsten genutzten Landschaften unseres Planeten. Maßnahmen für eine verstärkte Kohlendioxidaufnahme des Ozeans würden einen weiteren Eingriff darstellen, der je nach Verfahren andere Nutzungsformen begünstigen, diese einschränken oder sogar ausschließen kann.

Emissionshandel. Ohne eine konsequentere Beachtung des Vorrangs von Maßnahmen zur Emissionsreduktion, so das Expertenfazit, sei zu befürchten, dass die Anstrengungen zur Bekämpfung der Ursachen der Klimakrise abnehmen werden.

Wirksame und dauerhafte Kohlendioxid-Entnahme

Aufgrund der Tatsache, dass Kohlendioxid sehr lange in der Atmosphäre verweilen kann und dabei gleichbleibend klimawirksam ist, muss bei der Anwendung von CDR-Verfahren sichergestellt sein, dass das Kohlendioxid der Atmosphäre möglichst dauerhaft entnommen wird. Ist dies nicht zu gewährleisten, müssen potenzielle Leckagepfade, über die das entnommene Kohlendioxid erneut in die Atmosphäre entweichen kann, in der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden – zum Beispiel, indem bei der Bilanzierung der erzielten Entnahme Abschläge mit einberechnet werden. Kohlendioxid-Speicherstätten müssen nach Auffassung der Experten kontinuierlich überwacht und die Finanzierung dieser Überwachung langfristig sichergestellt werden. Um bewerten zu können, welchen tatsächlichen Beitrag ein Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme leistet, müssen zusätzlich alle indirekt verursachten Treibhausgasemissionen bilanziert werden. Dazu gehören zum Beispiel Emissionen, die beim Transport, bei der Herstellung von Vorprodukten oder aber bei der Erzeugung der eingesetzten Energie entstehen.

CDR-Verfahren umfassend bewerten – aus Klima-, Umwelt- und sozialer Perspektive

Der Einsatz mariner CDR-Verfahren verbraucht Energie, Ressourcen und Flächen. Er beeinträchtigt unter Umständen Küstengebiete und deren Ökosysteme oder gleich den gesamten Ozean, vor allem, wenn die Verfahren im globalen Maßstab angewendet werden sollen. Dazu gesellen sich mögliche negative soziale Auswirkungen, die entstehen können, wenn Menschen mit großer Abhängigkeit von den Leistungen des Meeres diese plötzlich nicht mehr im vollen Umfang in Anspruch nehmen können oder dürfen. Häufig variieren die Auswirkungen einer Technologie auch infolge der regionalen Gegebenheiten.

Aus diesen Gründen dürfen CDR-Verfahren nicht nur im Hinblick auf ihre mögliche positive Klimawirkung bewertet werden. Die Auswirkungen auf Menschen und

Umwelt müssten ebenso umfassend beachtet werden, fordern Fachleute nahezu einstimmig. Allerdings fehlen bislang hinreichende Konzepte, wie dieses Ziel erreicht werden kann. Ein Vorschlag lautet, Mindestkriterien für bestimmte Technologien oder Technologiegruppen zu bestimmen, die wiederum die Klimaaktivität der Maßnahme sicherstellen sowie die möglichen Umweltauswirkungen und den Ressourcenverbrauch minimieren. Experten einer deutschen Forschungsmission entwickeln aktuell einen Bewertungsleitfaden, mit dessen Hilfe Entscheidungsträger eine solche Bewertung von CDR-Verfahren und konkreten -Projekten vornehmen können sollen.

Zielkonflikte erfolgreich lösen oder vermeiden

Mindestkriterien werden als Steuerungsinstrument allein jedoch nicht ausreichen, um jene Zielkonflikte zu lösen oder zu vermeiden, die infolge des Einsatzes eingriffs- und ressourcenintensiver CDR-Verfahren entstehen. Dazu sei die Problemlage aus Klima- und Biodiversitätskrise bei gleichzeitig anhaltender Übernutzung unserer natürlichen Ressourcen viel zu komplex, so die Fachleute. Die Maßgabe laute daher, die verbleibenden Flächen und Ressourcen zu schonen oder in jedem Fall bestmöglich zu nutzen. Sollte bei der Steuerung und Regulierung von CDR-Maßnahmen dennoch auf Mindestkriterien zurückgegriffen werden, müssten diese regelmäßig geprüft und nachgeschärft werden, um dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu entsprechen. Die Experten mahnen zudem an, einen Ausstieg aus wenig nachhaltigen Methoden als Option von Anfang an mitzudenken und konsequent umzusetzen, sollte sich ein Verfahren als nachteilig erweisen.

Zielführend sei es, einen Wettbewerb um die nachhaltigsten Lösungen auszurufen und in der kriteriengeleiteten Auswahl oder Förderung der jeweiligen Verfahren fest zu verankern. Dabei sollten nicht nur die klimaspezifischen Vor- und Nachteile aller natürlichen und technischen CDR-Optionen berücksichtigt werden, sondern auch positive Auswirkungen auf die Artenvielfalt und die Ökosysteme einbezogen werden. Eine solche Herangehensweise sollte zur Folge haben, dass vor allem Maßnahmen zur Stärkung natürlicher Kohlenstoffsinken gewählt werden, mit denen dann auch Zusatznutzen für die Ökosysteme generiert werden.

Gebraucht werde eine klare Strategie zum Umgang mit Restemissionen, denn der Einsatz von CDR-Verfahren im erforderlichen Maßstab lässt sich nicht nebenbei organisieren. Er erfordere Zeit, gezielte Anreize, internationale Zusammenarbeit und klare Regeln für alle Akteure. Eine konsequente Umsetzung der skizzierten Leitprinzipien könne dazu beitragen, dass Kohlendioxid-Entnahmen aus der Atmosphäre einen zusätzlichen Beitrag zur Bekämpfung der Klimakrise leisten, ohne die bestehenden Umweltkrisen zu verschärfen. Vermeidbare Emissionsreduktionen aufzuschieben sei unter diesen Voraussetzungen nämlich ebenso ausgeschlossen wie eine weitere Schwächung der Ökosysteme an Land und im Meer infolge eines CDR-Einsatzes.

Bestehende Regulierungen mariner CDR-Verfahren

Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre sind spätestens seit der Verabschiedung des Pariser Klimaabkommens im Jahr 2015 ein Thema in verschiedenen internationalen Gremien und Verhandlungen, wobei das Pariser Klimaabkommen selbst keine Aussage zur Kohlendioxid-Entnahme und deren möglicher Regulierung trifft. Im Mittelpunkt des Abkommens stehen die Minderung des Treibhausgasausstoßes und das Ziel der globalen Treibhausgasneutralität in der zweiten Hälfte des aktuellen Jahrhunderts. Der Text des Abkommens lässt dabei offen, wie das angestrebte „Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken“ hergestellt werden soll. Es unterscheidet auch nicht ausdrücklich zwischen natürlichen Senken (Landvegetation und Ozean) und technischen Senken. Experten zufolge leitet sich deshalb auch keine rechtliche Verpflichtung aus dem Pariser Abkommen ab, technische Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme durchzuführen.

Sollte das Pariser Klimaabkommen künftig als globaler Regulierungsrahmen für Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme angewendet werden – was durchaus denkbar wäre –, müssten die Vertragsparteien eine entsprechende Ergänzung zum bisherigen Abkommen oder dessen Weiterentwicklung durch Entscheidungen des jährlich stattfindenden Treffens der Vertragsparteien beschließen.

Konkret verhandelt wird bislang nur der sogenannte Artikel-6.4-Mechanismus. Er soll regulieren, unter welchen Bedingungen Staaten, Unternehmen und Einzelpersonen Zertifikate für Emissionsreduktionen und Kohlendioxid-Entnahmen erhalten und mit diesen handeln können – innerhalb eines Staates als auch über dessen Grenzen hinweg.

Dass unter dem Pariser Klimaabkommen ein globaler Regulierungsrahmen für Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme entwickelt wird, gilt zum jetzigen Zeitpunkt (Herbst 2023) als ziemlich unwahrscheinlich, insbesondere, weil sich die einzelnen land- und meeresbasierten CDR-Technologien grundlegend voneinander unterscheiden. Ein gemeinsames Rahmenregelwerk zu entwickeln, das allen CDR-Verfahren gerecht würde, wäre eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Bedacht werden muss außerdem, dass nicht alle Staaten meeresbasierte Verfahren durchführen können. Binnenländer wie die Schweiz oder Österreich beispielsweise besitzen keine eigenen Küstengewässer, in denen sie abgeschiedenes Kohlendioxid unterseeisch einlagern oder aber Küstenökosysteme massiv erweitern könnten. Sollten Binnenländer demzufolge von möglichen Verhandlungen für ein globales Rahmenregelwerk zu marinen CDR-Verfahren ausgeschlossen werden?

Das Umweltvölkerrecht kennt bislang ebenfalls keine CDR-spezifischen verbindlichen Normen, welche die Erforschung und den Einsatz dieser Technologien umfassend und übergreifend regeln. Experten bezweifeln, dass sich die Staatengemeinschaft jemals auf ein internationales und allgemeingültiges Rechtsregime zum Climate Engineering einigen wird, welches dann auch den Einsatz mariner CDR-Verfahren regeln würde. Dagegen sprechen aktuell zwei Gründe: Erstens sind die Regelungen des Umweltvölkerrechts bereits sehr fragmentiert. Aktivitäten, bei denen es im Kern darum geht, Substanzen in das Meer einzutragen, werden über das Protokoll zum Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (das sogenannte Londoner Protokoll) reguliert. Für andere Verfahren wie zum Beispiel die Herstellung künstlicher Wolken oder Strahlungsmanagement in der Stratosphäre greifen wiederum das Wiener Abkommen zum Schutz der Ozonschicht und das dazugehörige Montrealer Protokoll oder aber das Genfer Übereinkommen über weiträumige

Climate Engineering
Unter dem Begriff „Climate Engineering“ werden verschiedene Aktivitäten des Menschen verstanden, die das Ziel haben, der Erderwärmung entgegenzuwirken. Dazu zählen in der Regel Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme sowie Maßnahmen des Strahlungsmanagements. Zum Teil wird synonym zu „Climate Engineering“ auch von „Geoengineering“ gesprochen.

grenzüberschreitende Luftverunreinigung. Zweitens sind in den zurückliegenden Jahren die meisten Bemühungen, diese Fragmentierung durch Ausarbeitung neuer übergreifender Verträge zu reduzieren, überwiegend gescheitert. Eine positive Ausnahme stellt das im Juni 2023 verabschiedete neue globale Abkommen über den Schutz und die nachhaltige Nutzung der marinen Biodiversität in Gebieten jenseits staatlicher Hoheitsgewalt (Biodiversity Beyond National Jurisdiction, BBNJ) dar.

Rechtsverbindliche Grundsätze und Prinzipien des Umweltvölkerrechts

Gänzlich unreguliert ist das Themenfeld „marine CDR-Verfahren“ derzeit allerdings auch nicht, denn es gelten allgemeine und überwiegend auch völkergewohnheitsrechtlich anerkannte Grundsätze und Prinzipien für den Umgang mit der Umwelt, die einen Einsatz mariner CDR-Verfahren steuern – sowohl für Forschungszwecke als auch für einen großflächigen Einsatz zum Ausgleich von Restemissionen. Dazu gehören:

- das Prinzip der Vorbeugung (Präventionsgrundsatz),
- die Informations- und Konsultationspflicht,
- die Pflicht, eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen, bevor eine geplante Maßnahme initiiert wird,
- das Vorsorgeprinzip,
- das Kooperationsprinzip sowie
- das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung.

Das Prinzip der Vorbeugung (Präventionsgrundsatz)

Der Präventionsgrundsatz basiert auf dem Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbelastungen und verpflichtet Staaten, im Vorfeld einer geplanten Aktivität alle möglichen und zumutbaren Maßnahmen zur Vermeidung wahrscheinlicher grenzüberschreitender Umweltschäden zu treffen – und dies mit größtmöglicher Sorgfalt. Dies impliziert, dass technische Standards wie „die besten verfügbaren Technologien“ und „die beste Umweltpraxis“ eingehalten werden müssen.

Die Informations- und Konsultationspflicht

Um die Einhaltung des Präventionsgrundsatzes zu gewährleisten, bedarf es jeweils wechselseitiger Information

und Kommunikation. Staaten, die eine Aktivität planen, die das Risiko erheblicher grenzüberschreitender Umweltbelastungen birgt, sind deshalb verpflichtet, potenzielle Opferstaaten frühzeitig über dieses Vorhaben zu informieren. Anschließend müssen sie in Konsultationen eintreten.

Die Pflicht, eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen, bevor eine geplante Maßnahme initiiert wird

Bei einer Umweltverträglichkeitsprüfung handelt es sich um ein rechtlich geordnetes, mehrphasiges Verfahren zur frühzeitigen Ermittlung, Beschreibung und Bewertung aller unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Projektes auf bestimmte Umweltfaktoren, und zwar einschließlich der ökologischen Wechselwirkungen. Für Projekte, deren Umweltauswirkungen grenzüberschreitender Natur sind, muss auch die Umweltverträglichkeitsprüfung im grenzübergreifenden Kontext durchgeführt werden. Sie ist somit ein wichtiger Bestandteil des Präventionsgrundsatzes. Das allgemeine Völkerrecht schreibt jedoch nicht vor, welche genauen Anforderungen im Einzelfall an eine Umweltverträglichkeitsprüfung zu stellen sind. Diese können sich allenfalls aus speziellem Völkervertragsrecht, dem europäischen Unionsrecht und/oder dem nationalen Recht der jeweiligen Staaten ergeben. Die auf globaler Ebene bestehenden Lücken werden künftig, sein Inkrafttreten unterstellt, von den Vorgaben des Abkommens über den Schutz und die nachhaltige Nutzung der marinen Biodiversität in Gebieten jenseits staatlicher Hoheitsgewalt (BBNJ) geschlossen werden. Es definiert Mindeststandards für Umweltverträglichkeitsprüfungen, die künftig von allen Vertragsparteien einzuhalten sind.

Das Vorsorgeprinzip

Das Vorsorgeprinzip besagt, dass die Umwelt am effektivsten geschützt wird, wenn denkbare Belastungen im Voraus vermieden werden. Damit dient es der Risikoabwägung und greift früher als der Präventionsgrundsatz – nämlich bereits dann, wenn eine Umweltgefährdung möglich ist, weil wissenschaftliche Unsicherheit über ihren Eintritt besteht. Das Vorsorgeprinzip wird 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? Einige 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. In den USA hingegen werden Risiken schneller akzeptiert. Im Gegenzug wissen alle Beteiligten, dass sie – sollte etwas schiefgehen – Schadensersatz in gravierender Höhe zahlen müssen.

Trotz dieser Unterschiede betrachten viele Völkerrechtsexperten das Vorsorgeprinzip als ein wichtiges Werkzeug des Risikomanagements. Gerade vor dem Hintergrund des Klimawandels wird unter anderem vorgeschlagen, es als Abwägungsmechanismus zu operationalisieren, mit dessen Hilfe Zielkonflikte zwischen verschiedenen Schutzgütern des Umweltvölkerrechts bewältigt werden können – so zum Beispiel Zielkonflikte zwischen Biodiversitätsschutz auf der einen Seite und der Bekämpfung des Klimawandels auf der anderen Seite. Diese Sichtweise jedoch hat sich aber noch nicht allgemein durchgesetzt.

Das Kooperationsprinzip

Ihm zufolge ist Umweltschutz Aufgabe aller gesellschaftlichen Kräfte, das heißt, alle staatlichen und gesellschaftlichen Akteure in umweltrelevanten Willensbildungs- und Entscheidungsprozessen müssen zusammenarbeiten.

Das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung

Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung wurde im Jahr 1992 auf der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung im brasilianischen Rio de Janeiro als internationales Leitbild anerkannt und prägt seitdem das Umweltrecht auf nationaler, überregionaler und internationaler Ebene. Nachhaltige beziehungsweise umweltverträgliche Entwicklung ist grundsätzlich auf den Menschen ausgerichtet. Sie zielt darauf ab, die sozioökonomischen Bedürfnisse aller Menschen zu befriedigen sowie menschengerechte Lebensbedingungen für die gesamte Weltbevölkerung zu gewährleisten. Ein Erreichen dieser Ziele darf allerdings nicht auf Kosten künftiger Generationen gehen.

Zentraler Bestandteil ist zudem der Ansatz, dass alle ökologischen, ökonomischen und sozialen Ziele wegen ihrer engen wechselseitigen Verknüpfung nur durch eine



ganzheitliche Herangehensweise dauerhaft verwirklicht werden können. Damit sind die wirtschaftliche Entwicklung und die Armutsbekämpfung zentrale Themen der internationalen Bemühungen zum Schutz der Umwelt geworden.

Meeresbasierte CDR-Verfahren individuell bewerten und regulieren

Aus diesen sechs Grundsätzen des Umweltvölkerrechts und den Leitlinien des UN-Seerechtsübereinkommens (UNCLOS) leitet sich Experten zufolge ein sehr detaillierter Regulierungsbedarf für meeresbasierte Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme ab. Wie ein konkreter Regulierungsmechanismus jedoch ausgestaltet werden muss, muss für jedes CDR-Verfahren individuell geprüft und geregelt werden. Es gilt daher, methodenspezifische Antworten auf viele Fragen zu finden. Zu den wichtigsten zählen: Wo kann das Verfahren möglichst risikoarm durchgeführt werden? Wie müsste eine vorherige Risikobewertung aussehen? Ließe sich ein einmal begonnenes Verfahren auch wieder einstellen? Gibt es bereits Best-Practice-Beispiele, von denen sich Regulierungsansätze ableiten ließen? Und auf welche Weise können erwartbare Schäden minimiert werden?

Da die Antworten je nach CDR-Methode sehr unterschiedlich ausfallen werden, empfehlen Rechtswissenschaftler, marine CDR-Methoden separat zu regulieren,

9.6 > Ein Papagei und eine Blüte zieren eine von mehreren Sonderbriefmarken, welche die brasilianische Post im Jahr 1992 aus Anlass der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro (Rio-Konferenz) herausgegeben hat.

indem sie in ihren jeweils spezifischen Regulierungskontext integriert werden. Machbar wäre diese Verfahrensweise, wie das Beispiel des Londoner Protokolls belegt. Dieses internationale Abkommen, ursprünglich nur auf die Abfallentsorgung und -verbrennung im Meer bezogen, ist im Grunde auf alle Aktivitäten anwendbar, die mit dem Einbringen von Substanzen in die Meeresumwelt zu tun haben. Dies umfasst unter anderem auch Technologien zur Alkalinitätserhöhung des Ozeans, Ansätze für künstlichen Auftrieb, Methoden zur Erweiterung kohlenstoffreicher Küstenökosysteme sowie Konzepte zur Kohlendioxidspeicherung im tiefen Meeresuntergrund.

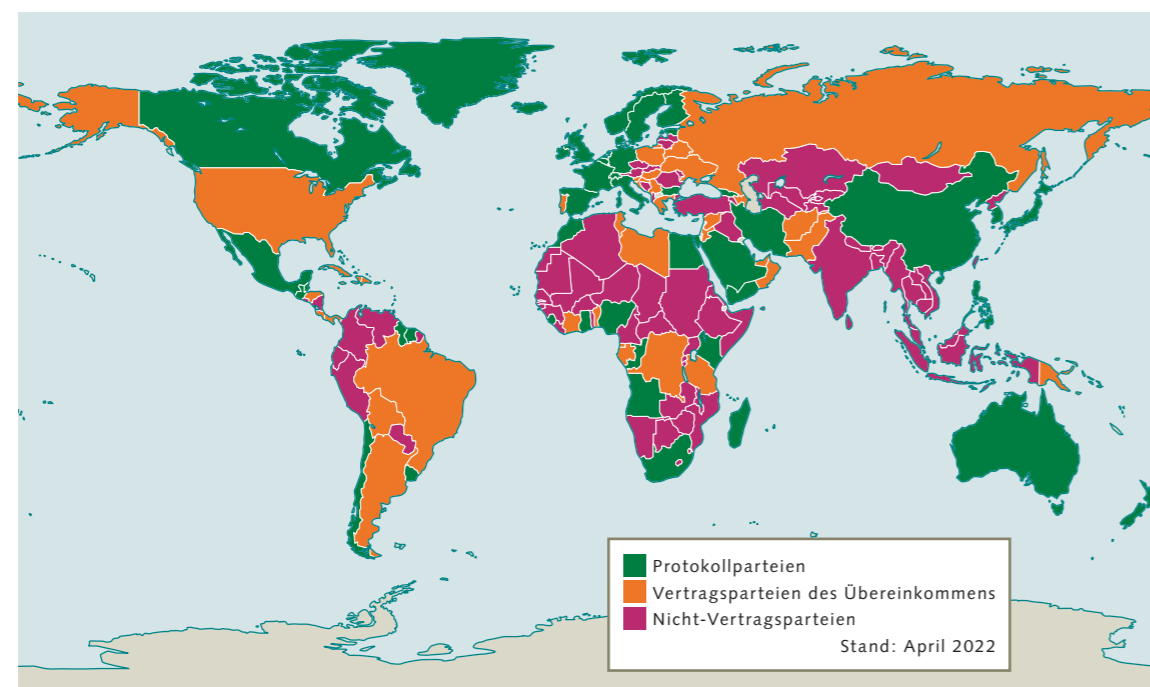
Nach dem Vorbild des Londoner Protokolls

Das UN-Seerechtsübereinkommen verlangt von seinen Unterzeichnerstaaten, dass sie weltweit geltende Gesetze, Regularien und Standards verabschieden, mit denen die Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Stoffen und Substanzen verhindert, reduziert und kontrolliert werden können. Dieser Aufforderung ist die Staatengemeinschaft im Jahr 1972 nachgekommen, indem sie das

Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Konvention) verabschiedete. Im Jahr 1996 wurde dieses Übereinkommen überarbeitet und durch das Londoner Protokoll aktualisiert – zumindest für all jene 53 Vertragsstaaten, die das Protokoll bislang ratifiziert haben, sodass es im Jahr 2006 in Kraft treten konnte. Die Vorgaben des Londoner Protokolls folgen einer klaren Logik: Grundsätzlich ist jedes Einbringen von Stoffen und Substanzen verboten. Ausnahmen von dieser Regel sind jedoch möglich, dann nämlich, wenn überzeugende Gründe dafür sprechen.

Das Londoner Protokoll besitzt eigene wissenschaftliche Arbeitsgruppen, deren Mitglieder internationale Entwicklungen der Meeres- und Umweltpolitik beobachten und den Vertragsstaaten empfehlen, inwiefern das Protokoll ergänzt werden müsste, um einen wissenschaftlich informierten Regulierungsrahmen zu gewährleisten. Auf diese Weise wurden im Jahr 2006 Rechtsgrundsätze und Verfahrensvorgaben zur Kohlendioxidspeicherung im tiefen Meeresuntergrund hinzugefügt. Drei Jahre später folgten Vorgaben, unter welchen Voraussetzungen Staa-

Übersicht der Vertragsparteien des Londoner Übereinkommens/Protokolls



9.7 > Die Londoner Konvention und das ergänzende Londoner Protokoll sind bislang nicht von allen Staaten ratifiziert worden. Welche Nationen bis April 2022 dem Übereinkommen beigetreten sind und welche nicht, wird hier ersichtlich.

ten ohne eigene unterseeische Kohlendioxidspeicher das abgeschiedene Treibhausgas zur unterseeischen Speicherung in andere Staaten exportieren dürfen. Letztere Vorgaben sind mangels hinreichender Anzahl von Ratifikationen bislang zwar noch nicht in Kraft getreten; die Vertragsparteien haben sich jedoch auf eine vorläufige Anwendbarkeit verständigt. Dazu müssen die Vertragsparteien eine entsprechende Erklärung bei der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (International Maritime Organization, IMO), die als Sekretariat des Londoner Protokolls fungiert, hinterlegen.

Zentral für eine künftige Regulierung mariner CDR-Verfahren durch das Londoner Protokoll sind jedoch Rechtsentwicklungen, zu denen es im Zeitraum von 2008 bis 2013 gekommen ist. Sie bezogen sich zunächst nur auf Projekte zur Ozean- oder Meeresdüngung. Damals bestand die ernsthafte Sorge, Unternehmen könnten dieses Verfahren aus kommerziellen Interessen großflächig einsetzen, ohne dass ausreichend Kenntnisse zu den möglichen Wirkungsweisen und Umweltrisiken vorlägen. Im Jahr 2013 wurde dann eine formelle Ergänzung des Londoner Protokolls beschlossen, die potenziell – ihr Inkrafttreten vorausgesetzt – auf alle Methoden des marinen Geo-engineerings anwendbar ist. Sie setzt sich insbesondere aus folgenden wichtigen Änderungen zusammen:

Erstens wurden Maßnahmen zum marinen Geoengineering in den Regelungskatalog des Protokolls aufgenommen. Ein neuer Artikel definiert nun „marines Geoengineering“ als „absichtliche Eingriffe in die Meeresumwelt zur Beeinflussung natürlicher Prozesse, auch um dem anthropogenen Klimawandel entgegenzuwirken, die potenziell schädliche Auswirkungen haben können, insbesondere wenn diese Auswirkungen weit verbreitet, lang anhaltend oder schwerwiegend sein können“. Der Begriff „marines Geoengineering“ ist zwar aus heutiger Sicht veraltet; er bezieht sich aber dennoch im Kern auf marine CDR-Verfahren.

Zweitens beschlossen die Vertragsstaaten, zunächst nur ein Genehmigungsverfahren für Forschungsvorhaben zu installieren. Kommerzielle Einsätze meeresbasierter CDR-Verfahren mit dem Ziel, fossile Treibhausgasemissionen zu kompensieren, sind zum aktuellen Zeitpunkt (Herbst 2023) immer noch verboten. Und selbst die grundsätzliche Bereitschaft, Forschungsvorhaben zu prüfen, ist

stark begrenzt. Sie gilt nämlich nur für jene meeresbasierten CDR-Verfahren, die in einem neuen Anhang zum Protokoll gelistet sind, dem sogenannten Anhang Nr. 4, der bislang allerdings nur die Meeresdüngung aufführt.

Für Forschungsvorhaben zur Meeresdüngung haben sich die Vertragsparteien des Londoner Protokolls bereits im Jahr 2010 auf einen klaren Begutachtungsprozess verständigt, der wiederum 2013 mit der Ergänzung des Londoner Protokolls zu einem formalen Vertragsbestandteil geworden ist. Der Begutachtungsprozess muss von den Vertragsparteien jeweils in das nach nationalem Recht durchzuführende Genehmigungsverfahren integriert werden und erfordert:

1. eine Bewertung des beantragten Vorhabens, um festzustellen, ob eine vorgeschlagene Aktivität unter die Definition der im Anhang 4 gelisteten Methoden fällt und tatsächlich als Forschungsprojekt für eine Begutachtung in Frage kommt;
2. eine detaillierte Umweltverträglichkeitsprüfung des geplanten Forschungsprojektes;
3. eine Entscheidung, ob das betreffende Experiment durchgeführt werden kann oder nicht, und
4. eine anschließende Überwachung des Projektes. Deren Ergebnisse sollen als Grundlage für künftige Entscheidungen und zur Verbesserung künftiger Begutachtungen dienen.

Dieser Begutachtungsprozess stützt sich stark auf Elemente der Risikobeschreibung und des Risikomanagements, indem das Londoner Protokoll gewissermaßen sagt: Meeresforschende dürfen Experimente zur Meeresdüngung durchführen, wenn sie das Schadenspotenzial klar einschätzen können und entsprechend Vorsorge betreiben, um Schäden zu verhindern. In jedem Fall aber brauchen sie eine staatliche Genehmigung für ihre Forschungsvorhaben. Experten zufolge spiegelt der Begutachtungsprozess somit eine Umsetzung des Vorsorgeprinzips wider und stellt indirekt eine Verbindung zwischen den Bereichen des internationalen Seerechts und des internationalen Umweltrechts her. Als Leitsatz gilt dabei: „Wenn die Risiken und/oder Unsicherheiten so hoch sind, dass sie im Hinblick auf den Schutz der Meeresumwelt unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips als unan-

nehmbar angesehen werden, sollte eine Entscheidung getroffen werden, den Vorschlag zu überarbeiten oder abzulehnen.“

Welche Risiken beziehungsweise Unsicherheiten dabei als inakzeptabel gelten können, wird durch die Vorgaben im Londoner Protokoll allerdings nicht geklärt. Dieser Umstand sowie der ausdrückliche Verweis auf den Vorsorgeansatz zeigen nach Meinung von Völkerrechtlern, dass der Begutachtungsprozess durch den Rückgriff auf die Anforderungen des internationalen Umweltrechts geprägt sein könnte sowie durch gesellschaftspolitische Diskurse, die über rein rechtliche Aspekte hinausgehen.

Wichtig zu wissen ist zudem, dass geplante Forschungsvorhaben nicht durch die internationalen Experten des Londoner Protokolls selbst begutachtet werden. Diese Aufgabe und die finale Entscheidung über eine Genehmigung übernimmt die für die Umsetzung des Londoner Protokolls zuständige Behörde jener Vertragspartei, unter deren Hoheitsgewalt das Experiment durchgeführt werden würde. Im Falle eines Vorhabens deutscher Meeresforscher wäre dies beispielsweise das deutsche Umweltbundesamt. Die zuständige Behörde auf nationaler Ebene wiederum muss die Anforderungen des Londoner Protokolls beachten. Zu diesen Anforderungen gehört zum Beispiel, dass nur solche Forschungsprojekte genehmigt werden dürfen, die alle Vorgaben des Londoner Protokolls erfüllen. Experten sprechen daher von einer „Entscheidung unter Genehmigungsvorbehalt“. Die Vorgaben des Londoner Protokolls gelten nach Artikel 210 Absatz 6 des UN-Seerechtsübereinkommens für alle UNCLOS-Vertragsstaaten – und nicht nur jene, die dem Protokoll beigetreten sind.

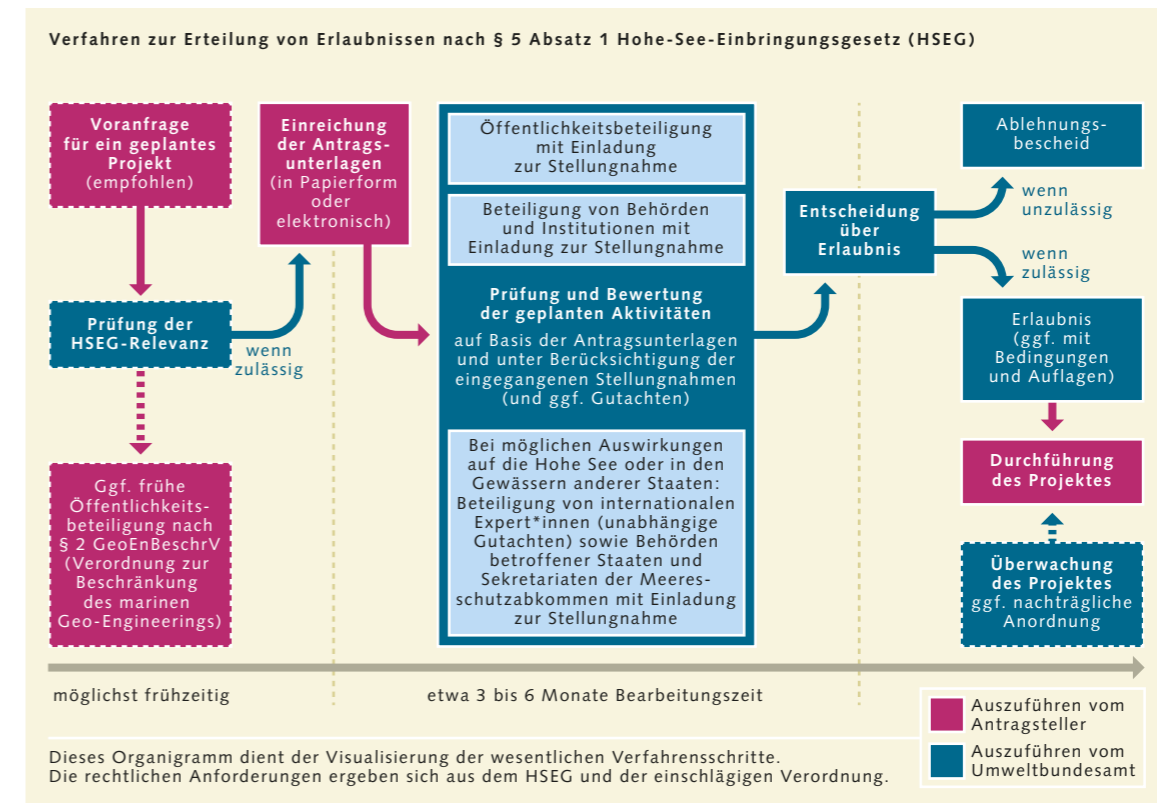
Um es noch einmal zu wiederholen: Bislang gilt der Marine-Geoengineering-Regulierungsmechanismus des Londoner Protokolls nur für Forschungsvorhaben zur Meeresdüngung. Er ließe sich nach Meinung von Experten jedoch vergleichsweise unkompliziert auf weitere meeresbasierte CDR-Verfahren erweitern – zum einen, weil sich die Regelungskomplexe zur Meeresdüngung bereits bewährt haben; zum anderen lassen sich Regelungen zu so spezifischen Fragestellungen schneller konkretisieren als übergreifende Verträge, sodass sich alle Verantwortlichen schnell auf konkrete Festlegungen einigen können.

Vorüberlegungen zu einer Erweiterung der Anhang-4-Liste laufen bereits. So haben Experten der GESAMP-Arbeitsgruppe für meeresbasierte Verfahren zur Minderung des Klimawandels (GESAMP Working Group 41 on Ocean Interventions for Climate Change Mitigation) den wissenschaftlichen Gremien des Londoner Protokolls die Aufnahme weiterer Verfahren vorgeschlagen und Vorgaben für methodenspezifische Risikobewertungen erarbeitet. Vier dieser Vorschläge haben die Vertragsstaaten des Londoner Protokolls im Oktober 2022 priorisiert. Allerdings dienen nur zwei der Kohlendioxid-Entnahme. Die zwei restlichen Verfahren zielen auf eine Veränderung der Strahlungsbilanz der Meeresoberfläche ab. Zu den Vorschlägen zählen:

- das Einbringen alkalinitätserhöhender Substanzen (Ziel: Kohlendioxidaufnahme des Meeres verstärken),
- die Zucht von Großalgen verbunden mit Maßnahmen zum künstlichen Auftrieb (Ziel: Kohlendioxidaufnahme des Meeres verstärken),
- das Versprühen winziger Meerwassertropfen über der Meeresoberfläche, im Englischen Marine Cloud Brightening genannt (Ziel: das Rückstrahlvermögen der Meeresoberfläche erhöhen),
- das Erzeugen winziger Wasserblasen im Oberflächenwasser oder das Einbringen reflektierender Partikel oder Materialien (Ziel: das Rückstrahlvermögen der Meeresoberfläche erhöhen).

Sollten diese Methoden eines Tages aufgenommen werden, würden entsprechende Forschungsvorhaben auf dieselbe Art und Weise begutachtet wie wissenschaftliche Vorhaben zur Meeresdüngung.

Um unter dem Schirm des Londoner Protokolls jedoch auch kommerzielle beziehungsweise großskalige CDR-Einsätze regulieren zu können, müsste das Vertragswerk entsprechend erweitert werden. Ob sich die Vertragsstaaten dazu entschließen werden, bleibt abzuwarten. Bislang ist noch nicht einmal die Protokoll-Ergänzung aus dem Jahr 2013 in Kraft getreten. Dazu müsste sie von mindestens zwei Dritteln der Vertragsstaaten des Londoner Protokolls ratifiziert werden. Inoffiziell aber agieren die meisten Staaten, als würden die neuen Vorschriften bereits gelten.



9.8 > In Deutschland fungiert das Umweltbundesamt als Genehmigungs- und Überwachungsbehörde für wissenschaftliche Projekte, die dem marinen Geoengineering zugeschrieben werden und Stoffe in das Meer einbringen wollen. Jedes dieser Projekte muss das hier skizzierte Antrags- und Genehmigungsverfahren durchlaufen.

Welche Akteure sind jetzt gefragt?

Ganz unabhängig davon, ob marine CDR-Verfahren eines Tages im großen Maßstab eingesetzt werden sollen oder nicht, sollte die Staatengemeinschaft alles daran setzen, zeitnah einen gemeinsamen Regulierungsrahmen zu installieren. Der Weltozean mit seinen internationalen Gewässern als „gemeinsames Erbe der Menschheit“ geht nämlich alle an und lässt sich – wie das Klima auch – nur gemeinsam wirkungsvoll schützen und nachhaltig nutzen. Wichtige Schritte für den Aufbau eines gemeinsamen Regulierungsrahmens wären ein Beitritt möglichst vieler Staaten zum Londoner Protokoll sowie eine Ratifizierung des Abkommens und aller bereits beschlossenen Ergänzungen zum marinen Geoengineering. Anschließend müssten die jeweiligen Vorgaben in nationales Recht umgesetzt werden. Verantwortlich dafür sind die nationalen Regierungen und Parlamente.

Einigen Experten zufolge werden auch marktwirtschaftliche Anreize benötigt. Hinter solchen Aussagen

steckt häufig die Forderung nach einem Markt für den Handel mit Entnahmegutschriften oder -zertifikaten. Akteure sollen Zertifikate für ihre Kohlendioxid-Entnahme erhalten und diese an Emittenten mit schwer vermeidbaren Emissionen verkaufen können. Würde ein solcher Markt ins Leben gerufen oder aber Entnahmezertifikate in die bestehenden Emissionshandelssysteme integriert werden, könnte dies ein Ansporn für Staaten und Unternehmen sein, verstärkt in die Erforschung und Anwendung von CDR-Verfahren zu investieren, argumentieren die Befürworter.

Das deutsche Umweltbundesamt und andere Fachleute wiederum kritisieren Vorschläge, wonach Emittenten eigene Emissionen, ob schwer vermeidbar oder nicht, durch den Ankauf von CDR-Zertifikaten kompensieren könnten. Solche Mechanismen könnten Unternehmen davon abhalten, vermeidbare Emissionen zu reduzieren – vor allem, wenn die dazu notwendigen Maßnahmen kostspielig seien. Stattdessen sollten Maßnahmen zur Kohlendioxid-Entnahme losgelöst vom Emissionshandel bilanziert

werden und Entnahmezertifikate nicht für die Erfüllung von Emissionsreduktionsverpflichtungen verwendet werden dürfen. Akteure, die freiwillig Kohlendioxid-Entnahme betreiben oder aber in diese investieren, könnten beispielsweise durch staatliche Subventionen unterstützt werden. Diese Gelder dürften aber nur ausgezahlt werden, wenn die erfolgte CO₂-Entnahme ordnungsgemäß zertifiziert wurde.

Ungeachtet dessen gilt: Wer Emissionszertifikate für eine bestimmte Kohlendioxid-Entnahme ausstellen möchte, benötigt ein einheitliches Verfahren, mit dem die tatsächlichen Kohlendioxidflüsse in einem Entnahmeprojekt gemessen, dokumentiert und verifiziert werden können. Gelänge es, ein solches einheitliches System weltweit zu installieren, könnten Rechtsunsicherheiten reduziert, Missbrauch verhindert und angemessene Umweltstandards für CDR-Verfahren eingeführt werden, schreiben Fachleute.

Mit hohen Erwartungen sieht sich auch die Wissenschaft konfrontiert. Sie soll das Grundlagenwissen liefern, auf dessen Basis die im Londoner Protokoll vorgeschriebene Umweltverträglichkeitsprüfung sachgemäß durchgeführt werden kann. Zudem ist es auch ihre Aufgabe, Konzepte und Technologien für ein verlässliches Beobachtungs-, Dokumentations- und Verifizierungssystem zu entwickeln, auf dessen Basis dann Emissionszertifikate ausgegeben werden können. Alle Ergebnisse müssen obendrein zeitnah und transparent kommuniziert werden – an Entscheidungstragende ebenso wie an die breite Öffentlichkeit.

Eine längst überfällige öffentliche Debatte

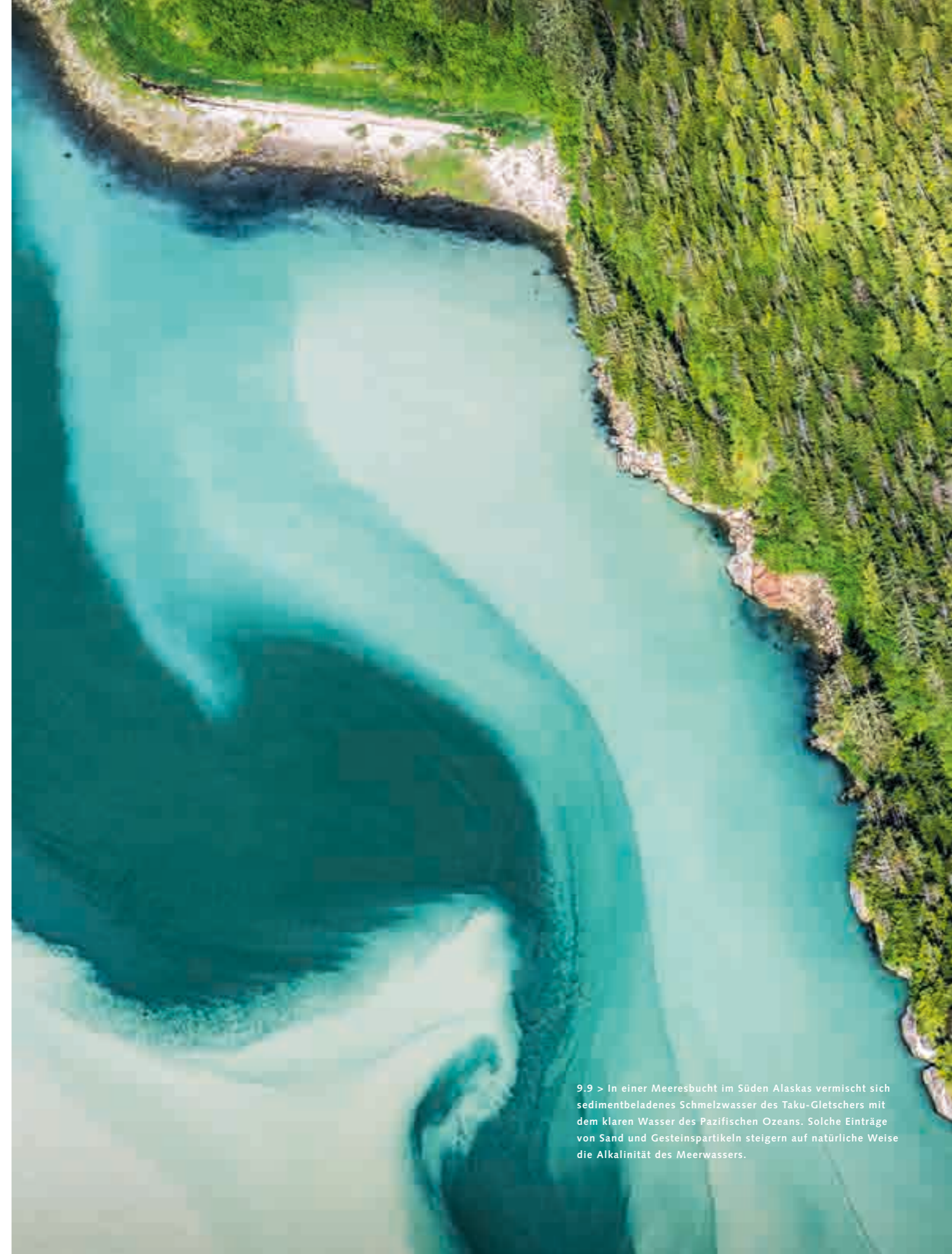
Gebraucht wird allerdings auch eine viel stärkere öffentliche Debatte darüber, ob der Mensch zu Klimaschutzzwecken in das System Meer eingreifen sollte, und wenn ja, welche Risiken und Schäden wir dafür bereit sind in Kauf zu nehmen oder wie wir Betroffene dafür entschädigen wollen. Diese so wichtige gesellschaftliche Auseinandersetzung findet bislang nicht statt. Es ist daher unklar, wie Menschen auf verschiedene CDR-Verfahren oder aber konkrete Einsatzpläne reagieren würden.

Forschende beobachten, dass sich Menschen bei ihrer Meinungsbildung häufig von emotionalen Einstellungen gegenüber Eingriffen in die Natur leiten lassen anstelle

von rationalen Abwägungen. Oft ist die Meinungsbildung auch durch enge Bindungen an soziale Normen geprägt. Wie sich Menschen zu CDR positionieren, hängt unter anderem davon ab, ob sie ein Verfahren als „natürlich“ oder „unnatürlich“ empfinden. Wenn zum Beispiel die Abscheidung von Kohlendioxid aus der Umgebungsluft mit anschließender Speicherung als „Entnahme durch künstliche Bäume“ beschrieben wird, erfährt die Methode deutlich größere Unterstützung, als wenn von einem chemischen Prozess in einer technischen Anlage die Rede ist. Im Hinblick auf meeresbasierte CDR-Verfahren werden erfahrungsgemäß Methoden zur Wiederherstellung und Erweiterung von Mangrovenwäldern, Seegraswiesen und Salzmarschen oder aber eine intensive Großalgenzucht als „natürlich“ wahrgenommen, während die Alkalinisierung des Ozeans als eher unnatürlich und risikoreich betrachtet wird, obwohl auch diesem Verfahren natürliche Prozesse zugrunde liegen.

Wie gut die breite Bevölkerung über einzelne CDR-Methoden informiert ist und welche Meinung sie aufgrund dessen vertritt, wird für den weiteren Umgang mit Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre jedoch entscheidend sein. Abzusehen ist heute schon, dass die politisch-gesellschaftliche Debatte zu marinen CDR-Verfahren keine einfache wird: Zum einen, weil es zu Fragen nach möglichen Risiken nicht immer klare, eindeutige Antworten und damit Gewissheit geben wird – auch dann nicht, wenn diese Methoden eines Tages in großen Feldversuchen getestet werden sollten. Zum anderen muss uns angesichts der zunehmenden Erderwärmung und der damit verbundenen Schäden längst klar sein, dass wir wirksame Klimaschutzmaßnahmen viel zu lange hinausgezögert haben und unter den aktuellen Bedingungen nicht mehr alle Umweltgüter erhalten werden können. Unser übergeordnetes Ziel kann nur lauten, die Treibhausgasemissionen schnellstmöglich zu reduzieren und uns bestmöglich an das neue Klima anzupassen, um dessen Risiken für uns und die Natur zu minimieren.

Damit dies gelingt, werden wir in neue Abwägungsprozesse eintreten müssen, die uns vor völlig neue Herausforderungen stellen. Ein Beispiel: Sollte unsere Gesellschaft den Einsatz meeresbasierter CDR-Verfahren für notwendig erachten, werden wir wahrscheinlich in Kauf nehmen müssen, ein gewisses Restrisiko einzugehen.



9.9 > In einer Meeresbucht im Süden Alaskas vermischt sich sedimentbeladenes Schmelzwasser des Taku-Gletschers mit dem klaren Wasser des Pazifischen Ozeans. Solche Einträge von Sand und Gesteinspartikeln steigern auf natürliche Weise die Alkalinität des Meerwassers.

Emissionshandel EU-ETS: Europas wirksamstes Klimaschutz-Instrument

Die Europäische Union ist weltweit der drittgrößte Emittent von Kohlendioxid und verfolgt zugleich ein ehrgeiziges Klimaziel. Bis zum Jahr 2030 will die EU ihre Treibhausgasemissionen erheblich senken und bis 2050 Netto-Null-Emissionen erreichen. Ein zentrales Instrument auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität ist der im Jahr 2005 ins Leben gerufene Europäische Emissionshandel (EU Emissions Trading System, EU-ETS). Diesem gehören neben den 27 EU-Mitgliedsstaaten auch Norwegen, Island und Liechtenstein sowie Kraftwerke in Nordirland an. Seit dem 1. Januar 2020 ist der EU-ETS außerdem mit dem Emissionshandelssystem der Schweiz verknüpft.

Der EU-ETS beruht auf dem Verursacherprinzip und verpflichtete bislang die Betreiber von rund 9000 europäischen Kraftwerken und energieintensiven Industrieanlagen sowie Akteure des innereuropäischen Luftverkehrs (seit 2012), für jede Tonne Treibhausgas, die sie ausstoßen, eine Emissionsberechtigung abzugeben. Eine Berechtigung erlaubt den Ausstoß einer Tonne Kohlendioxid-Äquivalent.

Abgerechnet wird in Kalenderjahren. Bis Ende März eines Jahres ermitteln die Betreiber die Treibhausgasemissionen ihrer Anlagen im zurückliegenden Jahr. Diese Daten werden zunächst von national akkreditierten Prüfstellen geprüft und im Anschluss an die zuständige nationale Vollzugsbehörde, in Deutschland ist das die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt), weitergeleitet sowie in das EU-Emissionshandelsregister eingetragen. Dort muss der Anlagenbetreiber dann bis spätestens Ende April desselben Jahres Emissionsberechtigungen im Umfang der gemeldeten Emissionen abgeben.

Die Emissionsberechtigungen können die Unternehmen im Rahmen von Primärmarkt-Auktionen an der Europäischen Energiebörse (European Energy Exchange, EEX) in Leipzig erwerben. Versteigert werden die Emissionsberechtigungen dort nahezu täglich von einzelnen Mitgliedsstaaten sowie von der Europäischen Kommission. Europaweit ist die Versteigerung seit Anfang der dritten Handelsperiode (2013 bis 2020) die Grundzuteilungsregel im EU-ETS. Die emissionsintensiven Industriebranchen und die Wärmeproduzenten erhalten übergangsweise weiterhin eine kostenlose Zuteilung anhand von sogenannten Benchmarks, die sich am Emissionsausstoß der effizientesten Anlagen für ein Produkt orientieren. Die kostenlose Zuteilung soll das Risiko einer Verlagerung von Emissionen ins Ausland (sogenanntes Carbon Leakage) verringern. Geplant ist aber auch, sie in den kommenden Jahren schrittweise abzuschaffen.

Die Emissionsberechtigungen können von den Marktteilnehmern auch auf dem Sekundärmarkt, zum Beispiel an der Börse oder in bilateralen

Geschäften, gehandelt werden. Daher stammt die Bezeichnung „Emissionshandel“. Genau genommen werden also nicht Emissionen, sondern Berechtigungen gehandelt, um die entsprechende Menge an Treibhausgasen ausstoßen zu dürfen. Durch den Handel bildet sich ein Preis für den Ausstoß von Treibhausgasen, der die beteiligten Unternehmen motivieren soll, ihre Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

Um den Ausstoß von Treibhausgasen zunehmend zu verteuern, wird die Gesamtmenge der zur Verfügung stehenden Emissionsberechtigungen von Jahr zu Jahr gesenkt. Die Höhe der Verknappung wird politisch festgelegt. Deutschland hat an dieser europaweiten Auktionsmenge einen Anteil von etwa 22 Prozent. Im Jahr 2021 versteigerte die Bundesrepublik Deutschland rund 101 Millionen Emissionsberechtigungen zu einem durchschnittlichen Preis von 52,59 Euro. Im Jahr darauf waren es noch rund 85 Millionen, die zu einem Durchschnittspreis von 80,32 Euro auktioniert wurden. In der ersten Jahreshälfte 2023 versteigerte Deutschland rund 45 Millionen Emissionsberechtigungen zu einem Durchschnittspreis von 87,11 Euro pro Berechtigung.

Der finanzielle Druck durch den EU-ETS zeigt mittlerweile auch die erhoffte Wirkung: Bis zum Jahr 2021 sanken die Emissionen der unter dem Schirm des EU-ETS agierenden Unternehmen um 38 Prozent im Vergleich zu 2005.

Ab 2027 werden auch die Emissionen des Gebäude- und Verkehrssektors gedeckelt

Die im EU-ETS geführten Anlagen verursachten bis zum Jahr 2023 rund 40 Prozent der Treibhausgasemissionen in der EU. Um den Anteil der durch den Handel kontrollierten Emissionen zu erhöhen, beschlossen das Europäische Parlament und die Regierungen der Mitgliedsstaaten im Frühling 2023, den verpflichtenden Emissionshandel auf kleine Industriebetriebe und den Schiffsverkehr (schrittweise ab 2024) auszudehnen. Im Jahr 2027 soll außerdem ein zweites Emissionshandelssystem (EU-ETS 2) eingeführt werden. Der EU-ETS 2 soll die verbrennungsbedingten Kohlendioxidemissionen in den Bereichen Gebäude und Straßenverkehr erfassen. Er wird eigene Mengenbegrenzungen und vermutlich auch andere Preisniveaus haben und unabhängig vom bestehenden EU-ETS existieren. Auch die Teilnehmer des EU-ETS 2 werden Emissionsberechtigungen erwerben und untereinander handeln können. Anders als im bestehenden EU-ETS, an dem Unternehmen, die Emissionen selbst verursachen, teilnehmen (sogenannter Downstream-Emissionshandel), erfolgt hier die Teilnahme über

Unternehmen, die die Brennstoffe in Verkehr bringen, wie zum Beispiel Gaslieferanten oder Unternehmen der Mineralölindustrie (sogenannter Upstream-Emissionshandel).

Durch die beiden Emissionshandelssysteme werden künftig 85 Prozent aller EU-Treibhausgasemissionen gedeckelt. Beschlossen wurde außerdem, die Zahl der insgesamt zur Verfügung stehenden Emissionsberechtigungen bis zum Jahr 2030 um 62 Prozent im Vergleich zu 2005 zu reduzieren.

Ideen für eine Aufnahme von Kohlendioxid-Entnahme-Gutschriften in den EU-ETS

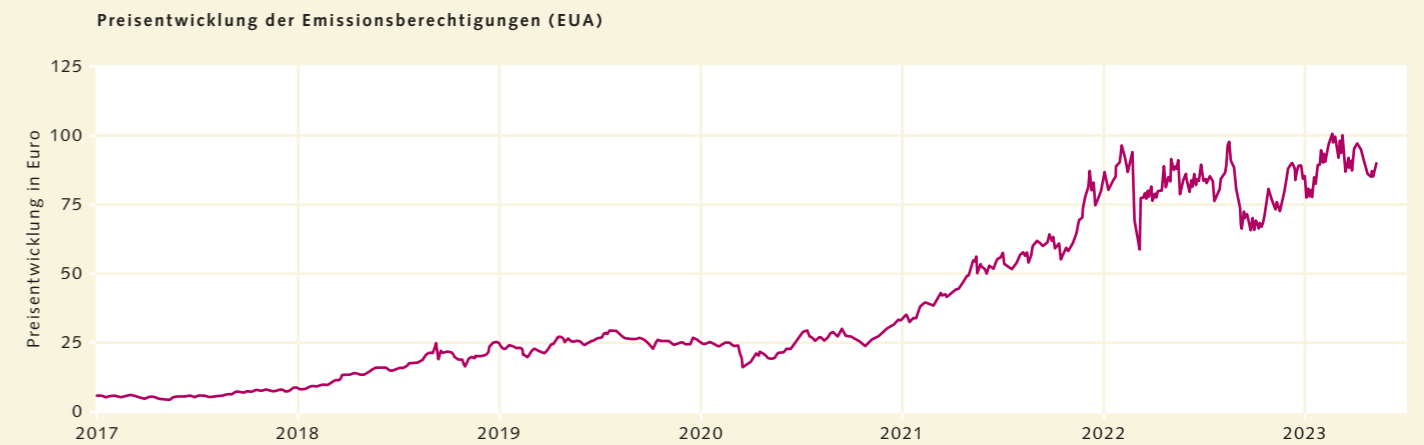
Angesichts dieser Verknappung von Emissionsberechtigungen fragen sich Unternehmen und Fachleute, ob und wie entnommene Kohlendioxidmengen im EU-ETS-System genutzt werden könnten, um Treibhausgasemissionen auszugleichen und langfristig einen zu schnellen Anstieg des Preises für Emissionsberechtigungen zu verhindern. Zu hohe Emissionspreise, so lautet die Vermutung, könnten Europas Wirtschaft benachteiligen und die öffentliche Akzeptanz des Emissionshandels als klimapolitisches Instrument reduzieren.

Bislang werden durch CDR-Verfahren erzielte Kohlendioxid-Entnahmen nicht im EU-ETS berücksichtigt. Experten überlegen nun, wie sich Kohlendioxid-Entnahmen in den Emissionshandel integrieren ließen. Ein Vorschlag lautet, eine zentrale Kohlenstoff-Agentur zu gründen. Diese

könnte zeitnah beginnen, Kohlendioxid-Entnahme-Gutschriften für Europa zu erwerben und diese anzusparen. Ein entsprechendes Zertifizierungsverfahren wird aktuell auf EU-Ebene entwickelt. Dieses Entnahme-Guthaben könnte die Agentur dann in den EU-ETS entlassen, wenn die Preise für Emissionsberechtigungen über eine bestimmte Marke steigen.

Als verlässliche Methoden für die Generierung dieser Entnahme-Gutschriften werden bisher allerdings nur die direkte Entnahme von Kohlendioxid aus der Umgebungsluft (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) sowie die Bioenergiegewinnung (BECCS) diskutiert – beides mit anschließender Kohlendioxid-speicherung im tiefen Untergrund. Dieser Fokus hat zwei Gründe: Zum einen sind DACCS und BECCS technisch ausgereift und einsatzbereit. Zum anderen ließe sich mit beiden Verfahren am ehesten Kohlendioxid in jenen Mengen kontrolliert entnehmen und dauerhaft speichern, wie sie gebraucht würden, um spürbar Einfluss auf den Preis im EU-ETS zu nehmen. Dafür müssten beide Methoden jedoch viel großflächiger eingesetzt werden, als dies bislang der Fall ist.

Der Vorschlag, BECCS in einem größeren Umfang einzusetzen, ruft jedoch auch Kritiker auf den Plan. Das deutsche Umweltbundesamt beispielsweise spricht sich in seiner Stellungnahme zum Entwurf eines „EU-Zertifizierungsrahmens für Kohlenstoffentnahme“ klar dagegen aus, durch BECCS generierte CO₂-Entnahmen zu zertifizieren. Der Grund sei die begrenzte Verfügbarkeit nachhaltig erzeugter Biomasse.



9.10 > Im Europäischen Emissionshandel lag der Preis für eine Emissionsberechtigung lange Zeit weit unter den Erwartungen. In den letzten Jahren aber müssen die beteiligten Unternehmen deutlich mehr zahlen, wodurch der Anreiz steigt, in Maßnahmen zur Emissionsreduktion zu investieren.

Zehn wichtige Begriffe aus der CDR-Debatte	
Wer in der Debatte um Emissionsreduktionen und Kohlendioxid-Entnahme mitsprechen möchte, sollte wissen, welche Konzepte hinter folgenden zehn Fachbegriffen stecken.	
Begriff	Kurzerklärung
Kohlendioxidneutralität oder CO₂-Netto-Null	Rechnerische Null der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen. Restemissionen von Kohlendioxid werden durch eine Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre ausgeglichen.
Treibhausgasneutralität oder Treibhausgas-Netto-Null (umgangssprachlich auch Klimaneutralität genannt)	Rechnerische Null aller vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen. Restemissionen aller relevanten Treibhausgase werden durch eine aus Klimaperspektive gleichwertige Entnahme von Kohlendioxid ausgeglichen.
Fossile Kohlendioxidquellen	Das Verbrennen fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas sowie industrielle Prozesse, in denen kohlenstoffhaltige Ausgangsstoffe (etwa Kalk) verwendet werden und Kohlendioxid im Zuge der Verarbeitung dieser Stoffe freigesetzt wird (z.B. Zementherstellung).
Biogene Kohlendioxidquellen (auch Landnutzungsemissionen genannt)	Mikroorganismen, Pflanzen und Tiere, die Kohlendioxid auf natürliche Weise ausstoßen, etwa wenn sie Biomasse zersetzen und Kohlenstoff veratmen. Diese natürlichen Prozesse gehören seit jeher zum Kohlenstoffkreislauf der Erde. Viele von ihnen werden jedoch durch menschliche Aktivitäten zusätzlich initiiert oder aber verstärkt – durch Landnutzungsänderungen wie eine intensive Bodennutzung in der Landwirtschaft, durch das Trockenlegen von Mooren oder aber durch die Übernutzung und Zerstörung kohlenstoffspeichernder Wälder und Küstenökosysteme wie Mangroven und Seegraswiesen.
Kohlendioxid-Entnahme oder Carbon Dioxide Removal (CDR)	Der Weltklimarat definiert CDR als menschliche Aktivitäten, in deren Folge Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnommen und dauerhaft in Produkten, im geologischen Untergrund, im Ozean oder aber in den Böden und der Vegetation an Land gespeichert wird. CDR-Experten benennen zudem drei Grundprinzipien, die CDR-Maßnahmen erfüllen müssen: 1. Das entnommene Kohlendioxid muss aus der Atmosphäre stammen. 2. Die anschließende Speicherung des entnommenen Kohlendioxids muss dauerhaft sein, sodass es nicht zeitnah wieder in die Atmosphäre gelangt. 3. Die Kohlendioxid-Entnahme muss durch menschliche Aktivitäten und zusätzlich zu den natürlichen Kohlendioxid-Aufnahmeprozessen der Erde erfolgen.
Netto-(Kohlendioxid-) Entnahme	Differenz aus der Menge des entnommenen Kohlendioxids und aller neuen Treibhausgasemissionen (umgerechnet in Kohlendioxid-Äquivalenten), die im Zuge der Entnahme entstanden sind.
Negative (Treibhausgas-) Emissionen	Negative (Treibhausgas-)Emissionen werden erreicht, wenn die Menschheit der Atmosphäre in der Summe mehr Treibhausgase (insbesondere CO ₂) entnimmt, als sie durch eigene Aktivitäten freisetzt.
Konventionelle CDR-Verfahren (in Deutschland natürlicher Klimaschutz, auf EU-Ebene Carbon Farming genannt)	Alle seit Jahrhunderten angewandten Methoden der nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft, infolgeder die Böden und Vegetation an Land mehr Kohlenstoff speichern. Dazu gehören unter anderem das (Wieder-)Aufforsten von Wäldern, die Wiederherstellung zerstörter Ökosysteme, eine nachhaltige Waldbewirtschaftung sowie bodenschonende Formen des Ackerbaus. Viele dieser Methoden werden bereits im großen Maßstab angewandt und in nationalen Klimaschutzplänen gelistet. Ihr globaler Anteil an aktuell stattfindenden Entnahmemaßnahmen liegt bei über 99 Prozent.

neue CDR-Verfahren	Methoden, bei denen abgetrenntes Kohlendioxid in Gesteinsschichten, im Ozean oder in Produkten gespeichert wird. Diese Verfahren werden bislang nur im kleinen Maßstab angewendet und sind zum Teil auch noch nicht erprobt. Dazu gehören unter anderem Methoden zur Energiegewinnung aus Biomasse mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (BECCS), Verfahren zur direkten Entnahme von Kohlendioxid aus der Luft und die anschließende Speicherung (DACCS), Herstellung und Einsatz von Pflanzenkohle (engl. biochar) sowie die Alkalinitätssteigerung des Ozeans. Aktuell haben sie einen Anteil von 0,1 Prozent an der weltweit entnommenen Gesamtmenge Kohlendioxid.
Kohlenstoffmanagement / Carbon Management	Unter Carbon Management werden in der Regel die drei Arten von Prozessketten zusammengefasst: <ul style="list-style-type: none"> • Kohlendioxid-Abscheidung, Transport und Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS), • Kohlendioxid -Abscheidung, Transport und anschließende Nutzung (Carbon Capture and Utilisation, CCU) und • Kohlendioxid -Entnahme aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR).

Sollten neue wissenschaftliche Erkenntnisse dann jedoch zeigen, dass es zu ungeahnten Fehlentwicklungen kommen kann, müssen die zuständigen Behörden sofort intervenieren. Auch aus diesem Grund sind eine enge wissenschaftliche Kontrolle und Überwachung einzelner CDR-Projekte so zentral.

Eine informierte und transparente gesellschaftliche Debatte verlangt außerdem Klarheit darüber, welche Begriffe und Bezeichnungen wofür benutzt werden. Die Vielzahl an Fachbegriffen, die mitunter sehr unterschiedlich definiert und verwendet werden, erschwert es Außenstehenden derzeit enorm, den wissenschaftlichen und politischen Diskussionen zu folgen. Gleichzeitig behindert die fehlende begriffliche Klarheit schnelle Fortschritte bei der Entwicklung effizienter Maßnahmen, Vorschriften, Förderrichtlinien und Regularien. Beispielgebend ist die Diskussion, wann von Restemissionen gesprochen wird und wann von schwer vermeidbaren Emissionen.

Fachleute einer deutschen Forschungsmission beispielsweise definieren „Restemissionen“ als eine Größe, die lediglich beschreibt, welche vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen im und nach dem Netto-Null-Jahr tatsächlich noch in die Atmosphäre gelangen. Davon unterscheiden sie die „schwer vermeidbaren Emissionen“. Denn welche Emissionen als „schwer vermeidbar“ eingestuft werden, sei von Akteursgruppe zu Akteursgruppe unterschiedlich und hänge von der individuellen Motivlage ab. Auch seien die Begründungen für die Einstufungen oftmals verschieden. Andere Beteiligte wiederum verwenden die Begriffe „Restemissionen“ und „schwer vermeidbare Emissionen“ noch synonym.

Eine Frage der menschlichen Existenz

Den politischen, technischen und gesellschaftlichen Debatten und Entwicklungen hinsichtlich land- oder meeresbasierter Kohlendioxid-Entnahmeverfahren zu folgen, ist und bleibt demzufolge eine Herausforderung. Davon sollte sich allerdings niemand abschrecken lassen, denn letztendlich geht es um nicht weniger als unsere Existenz. Wenn wir noch größere klimabedingte Verluste und Schäden für Mensch und Natur verhindern wollen, muss es uns gelingen, die globale Erwärmung auf unter zwei Grad Celsius, bestenfalls auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Dieses Ziel werden wir nur erreichen, wenn wir ab dem Jahr 2050 weniger Kohlendioxid ausstoßen, als wir der Atmosphäre mithilfe verschiedener Verfahren entnehmen. Daran gibt es nahezu keine wissenschaftlichen Zweifel mehr.

Meeresbasierte Entnahmeverfahren könnten uns helfen, Restemissionen auszugleichen. Allerdings ist heute schon absehbar, dass wir mit keiner Methode allein in der Lage sein werden, der Atmosphäre so große Mengen Kohlendioxid auf ökologische und sozialverträgliche Weise zu entnehmen, dass wir die Erwärmung auf weit unter zwei Grad Celsius begrenzen können. Wir werden viele verschiedene land- und meeresbasierte CDR-Methoden einsetzen müssen – eine jede dort, wo sich ihr Einsatz, einschließlich aller positiven und negativen Nebenwirkungen, bestmöglich mit dem Ziel der nachhaltigen Entwicklung vereinbaren lässt. Methoden, die auf eine Wiederherstellung und Erweiterung kohlenstoffreicher Küstenökosysteme setzen, ließen sich sogar relativ zeitnah umsetzen.

9.11 > Mit einer 2500 Quadratmeter großen Postkarte, zusammengesetzt aus 125 000 Einzelpostkarten, beschriftet von Kindern und Jugendlichen aus mehr als 35 Ländern, demonstrierten Klimaschützer im November 2018 am Aletsch-Gletscher in der Schweiz für wirksamen Klimaschutz und eine Einhaltung des 1,5-Grad-Zieles.



Technologische Verfahren wie die Alkalinitätserhöhung hingegen sind bislang wenig getestet. Hier werden noch einige Jahre bis Jahrzehnte vergehen, bis die meisten Verfahren technisch so weit sind, dass sie kontrolliert im großen Stil eingesetzt werden können.

Für alle bekannten oder aber in Entwicklung befindlichen CDR-Verfahren gilt: Ihre Durchführbarkeit und ihr jeweiliges Kohlendioxid-Entnahmepotenzial hängen von den kontextspezifischen Bedingungen vor Ort ab. Dazu gehören die Klima- und Umwelteigenschaften des Standortes, die Verfügbarkeit von Infrastrukturen und Ressourcen sowie die dringend benötigte öffentliche Unterstützung. Gebraucht werden außerdem klare Einsatzregelungen sowie politische Anreize, um Schäden für Umwelt und Menschen zu verhindern, das theoretische Entnahmepotenzial bestmöglich auszuschöpfen und mögliche Zusatznutzen zu generieren.

Vielversprechende CDR-Ansätze müssen in nationale und internationale Strategien zum Umgang mit Restemissionen aufgenommen und die zahlreichen erforderlichen Transport- und Infrastrukturen geschaffen werden. Ein

Schritt, der parallel erfolgen muss zu einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien sowie zu einem breiteren Einsatz energieeffizienzsteigernder und ressourcenschonender Technologien und Verhaltensweisen. Nach Expertenmeinung bieten CO₂-Entnahmeverfahren nur in Kombination mit maximal möglichen Treibhausgasreduktionen und einer verbesserten Energie- und Ressourcennutzung die Chance, unser Ziel der globalen Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 zu erreichen. Wobei jederzeit gilt: Je kleiner die Menge der Restemissionen ist, desto weniger Kohlendioxid-Entnahme muss betrieben werden, um diese auszugleichen.

Die gute Nachricht ist: Die Staatengemeinschaft verfügt bereits über einen Mechanismus, mit dem sich zunächst Forschungsvorhaben, später aber auch groß angelegte Einsätze zu marinen CDR-Verfahren steuern und regulieren lassen. Risiko- und folgenlos aber werden solche Einsätze nicht sein. Daher gilt es, bei jeder Entscheidung sorgsam abzuwägen – eine enorm schwierige Aufgabe. Aber die Zeit der leichten Antworten ist aufgrund unseres Nichtstuns in Sachen Klimaschutz längst vorbei.

CONCLUSIO

Regulierung möglicher CDR-Einsätze: Gebraucht werden klare Strategien und Vorschriften

Die immer drastischeren Auswirkungen des Klimawandels verpflichten uns, alles Menschenmögliche zu tun, um die globale Erwärmung auf ein Minimum zu begrenzen. Dazu gehört auch der Einsatz vielversprechender meeresbasierter CDR-Verfahren. Sie allein aber bieten keine Lösung der Klimakrise, sondern können nur Teil eines übergreifenden Plans zum Umgang mit Restemissionen sein. Oberste Priorität hat jedoch die drastische Reduktion und Vermeidung menschengemachter Treibhausgasemissionen. Durch sie lässt sich der Klimawandel nämlich schneller, wirksamer, günstiger und risikoärmer eindämmen als mit jedem Kohlendioxid-Entnahmeverfahren.

Sollten meeresbasierte CDR-Verfahren angewendet werden, beträfe der Einsatz einen Ozean, der bereits auf vielfache Weise vom Menschen genutzt und ausgebeutet wird. Um das Meer zu schützen und eine gerechte Lastenverteilung zu garantieren, braucht es deshalb durchdachte nationale und internationale CDR-Strategien mit klaren Zielstellungen und Regeln für alle Akteure. Fachleute haben erste Leitprinzipien für eine Steuerung und Regulierung land- und meeresbasierter CDR-Verfahren entwickelt. Ihnen zufolge muss zusätzlich zum Vorrang der Emissionsvermeidung bereits vor einem Einsatz sichergestellt werden, dass zum einen die Kohlendioxid-Entnahme dauerhaft erfolgen wird und die Maßnahmen nicht mehr neue Treibhausgasemissionen verursachen, als Kohlendioxid der Atmosphäre entnommen werden kann. Zum anderen müssen die Verfahren im Vorfeld umfassend aus Klima-, Umwelt- und sozialer Perspektive bewertet werden und mögliche Zielkonflikte vermieden oder gelöst werden, und das auf umwelt- und sozialverträgliche Weise.

Experten zufolge deutet momentan wenig darauf hin, dass sich die Staatengemeinschaft auf ein

gemeinsames übergreifendes Regelwerk für alle CDR-Verfahren einigen wird. Dafür unterscheiden sich die vielen land- und meeresbasierten Verfahren zu stark voneinander. Aussichtsreicher sind Vorschläge, marine CDR-Methoden separat zu regulieren, indem sie in ihren jeweiligen Regulierungskontext integriert werden. Wie das gelingen könnte, zeigt sich am Beispiel des Londoner Protokolls. Dessen Regelwerk ist in den zurückliegenden Jahren um „marines Geoengineering“ erweitert worden. Zudem wurden Vorgaben zur Ozeandüngung und zur Kohlendioxid-speicherung im tiefen Meeresuntergrund aufgenommen. Auf dieselbe Weise ließen sich Vorschriften für weitere CDR-Verfahren integrieren, bei denen Stoffe oder Technik in das Meer eingebracht werden müssten.

Dringend benötigt werden auch einheitliche Verfahren, mit denen die tatsächlichen Kohlendioxidflüsse in Entnahmeprojekten gemessen, dokumentiert und verifiziert werden können. Ein solches Monitoring könnte Rechtsunsicherheiten reduzieren, Missbrauch verhindern und böte die Chance, Zertifikate auf dauerhaft entnommene CO₂-Mengen auszugeben. Diese wiederum könnten Unternehmen motivieren, in meeresbasierte CDR-Projekte zu investieren, wenn zertifizierte CO₂-Entnahmen subventioniert würden oder andere Vorteile brächten.

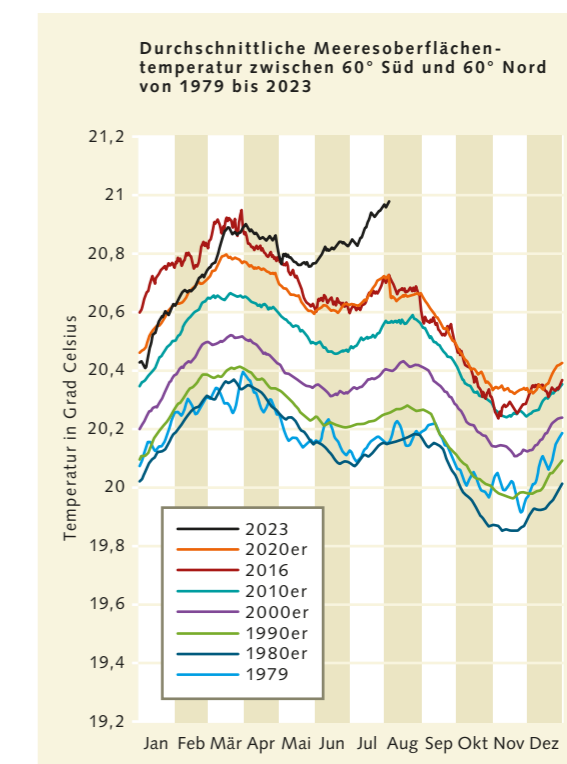
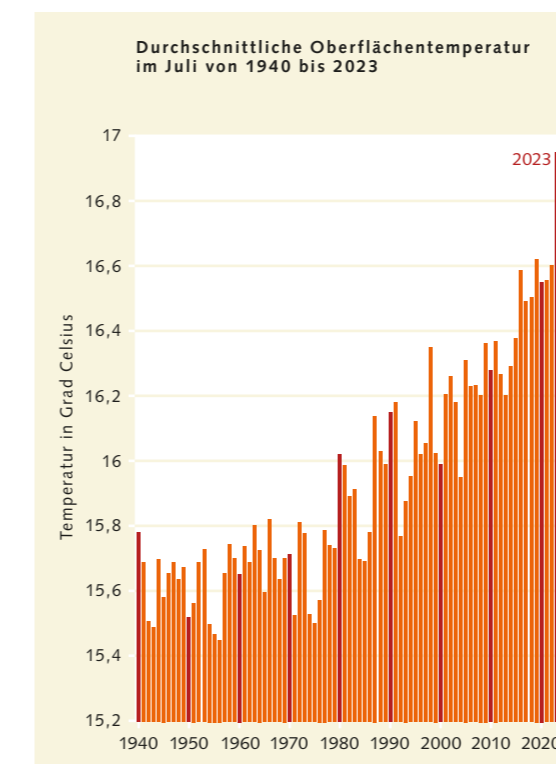
Zeitgleich braucht unsere Gesellschaft allerdings auch eine breite öffentliche Debatte über den möglichen Einsatz von CDR-Verfahren. Diese findet bislang nur in Wissenschaft, Wirtschaft und in einigen wenigen politischen Gremien statt. Ein starkes Engagement der Öffentlichkeit ist jedoch aus vielen Gründen unabdingbar für erfolgreiche Klimaschutzmaßnahmen. Das gilt insbesondere für jene Bevölkerungsgruppen, in deren Heimat CDR-Maßnahmen zum Einsatz kämen. Im Kampf gegen den Klimawandel geht es mittlerweile um unsere menschliche Existenz. Um diese Herausforderung zu meistern, braucht es jede und jeden.

8

Klimaretter Ozean? Wie das Meer (noch) mehr Kohlendioxid aufnehmen soll

Der Sommer 2023 auf der Nordhalbkugel lieferte jene Schreckensbilder und -nachrichten, vor denen Klimaforschende schon seit Jahrzehnten warnen. Mit Tageshöchsttemperaturen von mehr als 50 Grad Celsius glichen Teile Chinas sowie der Süden der Vereinigten Staaten einem gigantischen Brutkasten, in dem Menschen und

Tiere nur noch in gekühlter Umgebung überleben können. In Japan, China, Südkorea und im Nordwesten der USA regnete es derweil so stark, dass Bäche und Flüsse schwere Überschwemmungen verursachten und Menschen in den Tod rissen. Im Mittelmeerraum hingegen kämpften Feuerwehren und Freiwillige vielerorts bei



> Der Juli 2023 war der bislang heißeste Monat seit Beginn der Temperaturmessungen (Stand: Herbst 2023). Erstmals überschritt die globale Oberflächentemperatur die 17-Grad-Marke; die globale Meeresoberflächentemperatur außerhalb der Polarregionen stieg auf einen neuen Rekordwert von 20,96 Grad Celsius.

GESAMT-CONCLUSIO

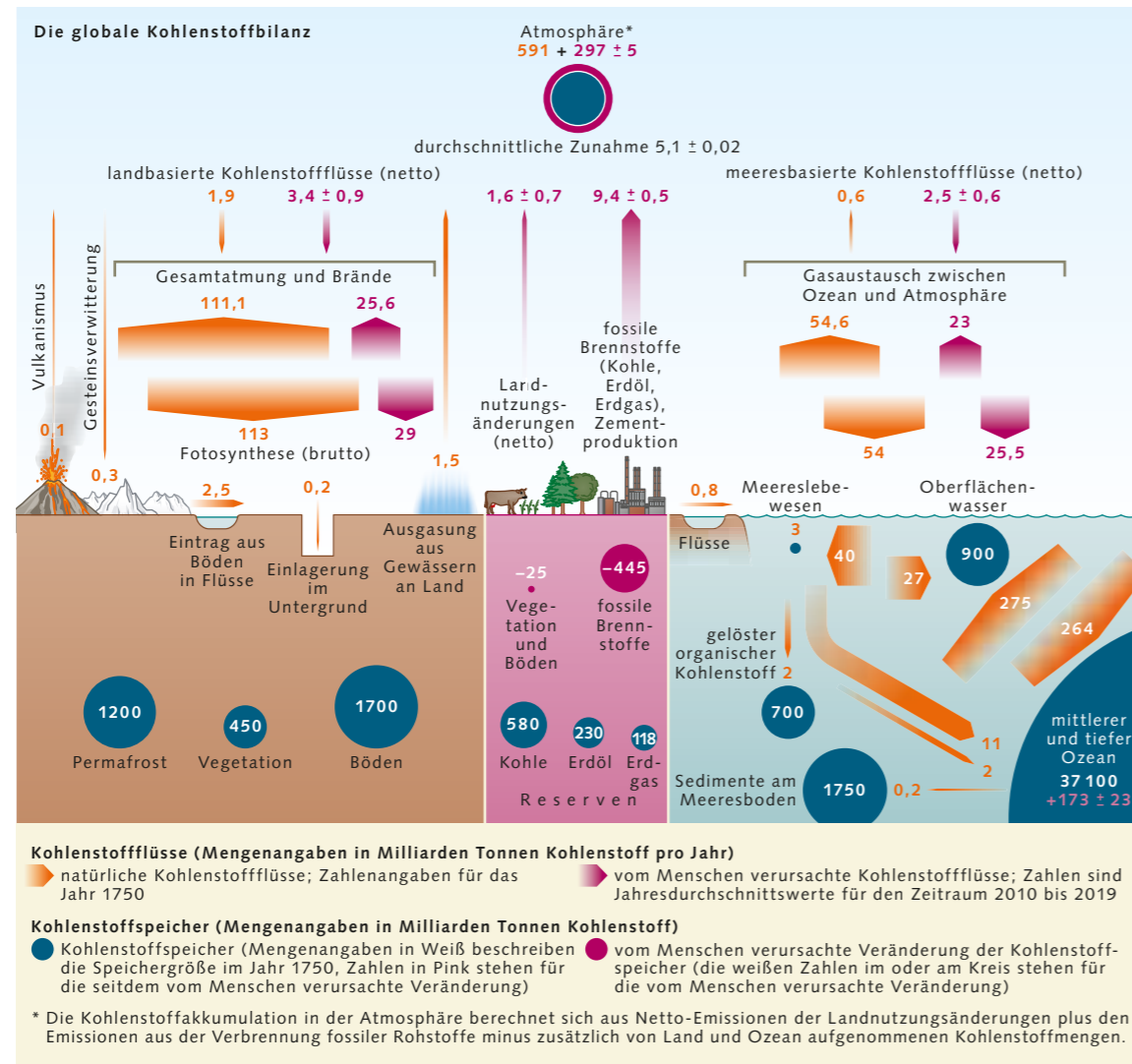
lebensgefährlicher Sommerhitze gegen immer wieder aufflammende Waldbrände. Abertausende Anwohner und Urlauber ergriffen die Flucht.

Extremwetterereignisse am Fließband, die nicht nur vereinzelt auftreten, sondern parallel in vielen Regionen der nördlichen Hemisphäre: Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) sprach angesichts dieser eklatanten Häufung bereits Mitte Juli von einem Sommer der Extreme. Die allerdings noch viel bedeutsamere Aussage der Wetterexperten steckte jedoch in einem kurzen Nebensatz der WMO-Meldung. In diesem Nebensatz nämlich hieß es: Extremwetter im beobachteten Ausmaß

werde in einer vom Klimawandel geprägten Welt der neue Normalzustand.

Der Klimawandel ist im Alltag eines jeden Menschen angekommen und längst bittere Realität. Mindestens die Hälfte der Weltbevölkerung leidet inzwischen unmittelbar unter den Folgen der globalen Erwärmung, darunter vor allem Bevölkerungsgruppen mit wenig Geld, fehlenden technischen Möglichkeiten und fehlender politischer Unterstützung, um die notwendigen Schutzvorkehrungen zu treffen. Zugleich versagen die ohnehin schon geschundenen Ökosysteme mehr und mehr ihren Dienst. Klima und Natur – so viel ist klar – machen

> Die globale Kohlenstoffbilanz in Zahlen: In Pink werden die vom Menschen verursachten Kohlenstoffflüsse dargestellt. Sie sind der Grund, warum sich Kohlendioxid in der Atmosphäre anreichert und die Temperaturen auf der Erde steigen.

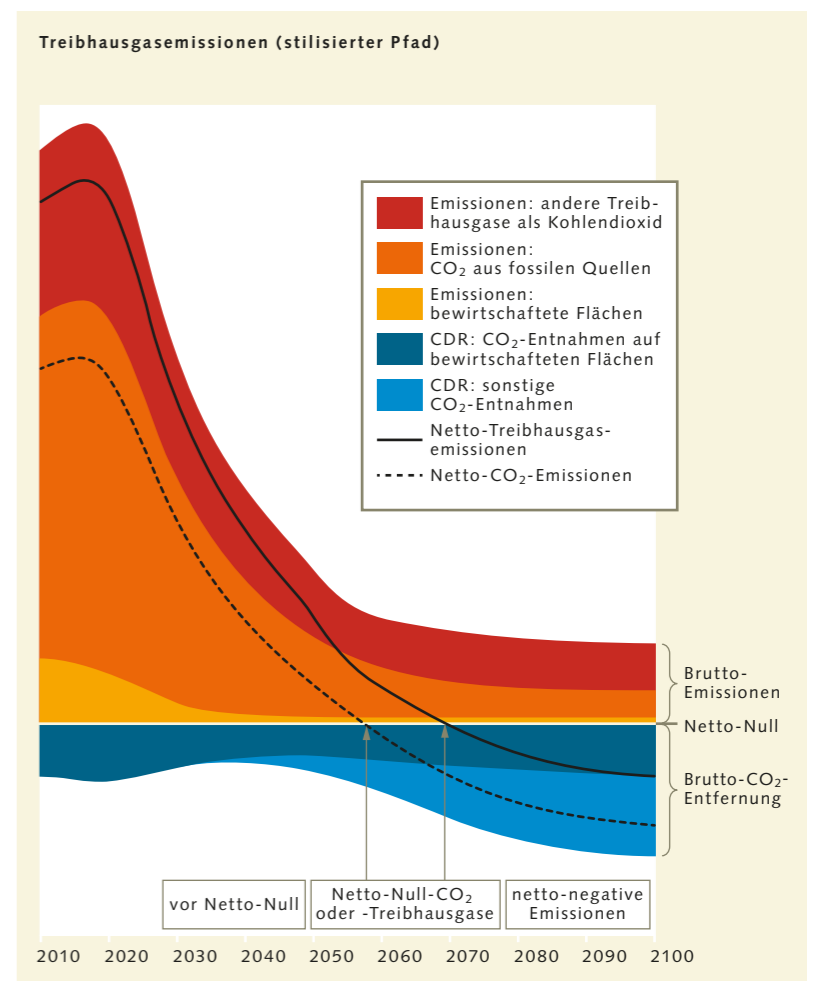


keine Kompromisse. Für uns Menschen geht es im Kampf gegen den Klimawandel daher um unsere eigene Existenz. Die Veränderungen des Klimas entpuppen sich nämlich als lebensgefährliche Gefahrenmultiplikatoren. Und deren Zerstörungspotenzial, so viel muss jedem bewusst sein, steigt mit jedem weiteren Zehntelgrad Erwärmung.

Der einzige Ausweg: Eine treibhausgasneutrale Zukunft

Der einzige Ausweg aus dieser selbst verschuldeten Klimakrise ist ein Stopp aller menschengemachten Treibhausgasemissionen. Dazu zählt insbesondere der Ausstoß der klimawirksamen Gase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Sie entweichen in die Atmosphäre, wann immer wir Menschen fossile Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle fördern und zur Energiegewinnung verbrennen; wenn wir intensiven Ackerbau und Viehhaltung betreiben, unseren Müll auf Müllkippen entsorgen, Wälder brandroden, Moore trockenlegen oder aber bei Industrieprozessen wie der Zementherstellung. Soll die globale Erwärmung bis zum Jahr 2100 auf bestenfalls 1,5 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit begrenzt werden, müssen die Kohlendioxidemissionen bis zum Jahr 2050 auf eine rechnerische Null reduziert werden. Gleichzeitig muss auch der Ausstoß aller restlichen Treibhausgase drastisch minimiert werden – möglichst ebenfalls auf eine rechnerische Null. In diesem Fall wäre das globale Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050 erreicht.

Vorschläge, wie wir einen Großteil unserer Emissionen vermeiden können, gibt es zuhauf. Allerdings werden diese nicht konsequent und im erforderlichen Größenmaßstab umgesetzt. Gleichzeitig stimmen Fachleute mittlerweile darin überein, dass es der Menschheit selbst bei größter Anstrengung nicht gelingen wird, alle Treibhausgasemissionen rechtzeitig auf ökologische und sozialverträgliche Weise zu vermeiden. Bei einigen unserer Aktivitäten werden auch nach Ablauf des Jahres 2050 weiterhin beachtliche Restmengen von Kohlendioxid, Methan, Lachgas und anderen Treibhausgasen freigesetzt. Diese Restemissionen werden wir ausgleichen müssen. Das heißt, wir werden eine aus Klimaperspektive gleichwertige Menge Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnehmen und



diese für Jahrzehnte bis Jahrtausende sicher einlagern müssen. Experten gehen von Hunderten Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus, die bis zum Ende dieses Jahrhunderts der Atmosphäre gezielt entzogen werden müssen, wenn die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius begrenzt werden soll. Eine Herausforderung, die so groß ist, dass sie sich kaum in Worte fassen lässt.

Wichtig dabei: Als Kohlendioxid-Entnahmeverfahren (Carbon Dioxide Removal, CDR) dürfen nur jene Verfahren bezeichnet werden, bei denen das entnommene Kohlendioxid aus der Atmosphäre stammt, seine anschließende Speicherung dauerhaft erfolgt und die Entnahme ein Resultat menschlichen Handels ist und zusätzlich zu den natürlichen Kohlendioxid-Entnahmeprozessen erfolgt ist.

> Eine aktive Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre wird benötigt, um kurzfristig die Netto-Emissionen des Menschen zu reduzieren, mittelfristig die Ziele der Kohlendioxid- und Treibhausgasneutralität zu erreichen sowie um langfristig die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre durch sogenannte negative Emissionen zu senken.

GESAMT-CONCLUSIO

Weltozean: Ein Meister der Kohlendioxidaufnahme

Das Klimasystem der Erde nutzt physikalische, chemische und biologische Prozesse, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entfernen und an Land, im Meer oder im geologischen Untergrund einzulagern. Der Weltozean bedient sich dieser Prozesse in so umfassendem Maß, dass er im Laufe der Erdgeschichte schon große Veränderungen der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration abgedeckt hat. Allerdings dauern solche Ausgleichsprozesse Jahrtausende. Aufgrund seiner natürlichen Kohlendioxid-Aufnahmefähigkeit ist der Ozean ein Hauptakteur im globalen Kohlenstoffkreislauf. Er enthält etwa 40 000 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, wobei der größte Teil im Meerwasser gelöst ist. Damit stellt der Ozean den zweitgrößten Kohlenstoffspeicher unseres Planeten dar.

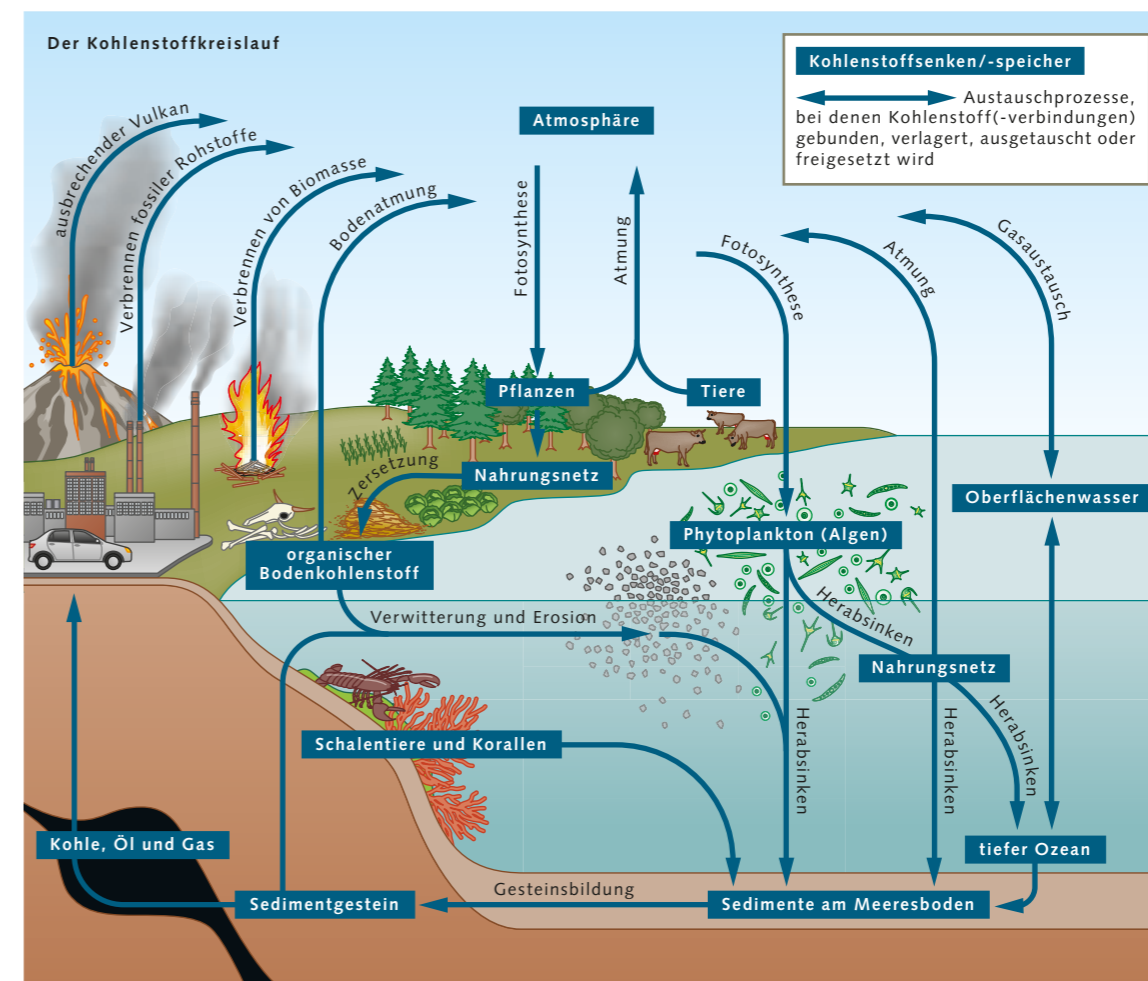
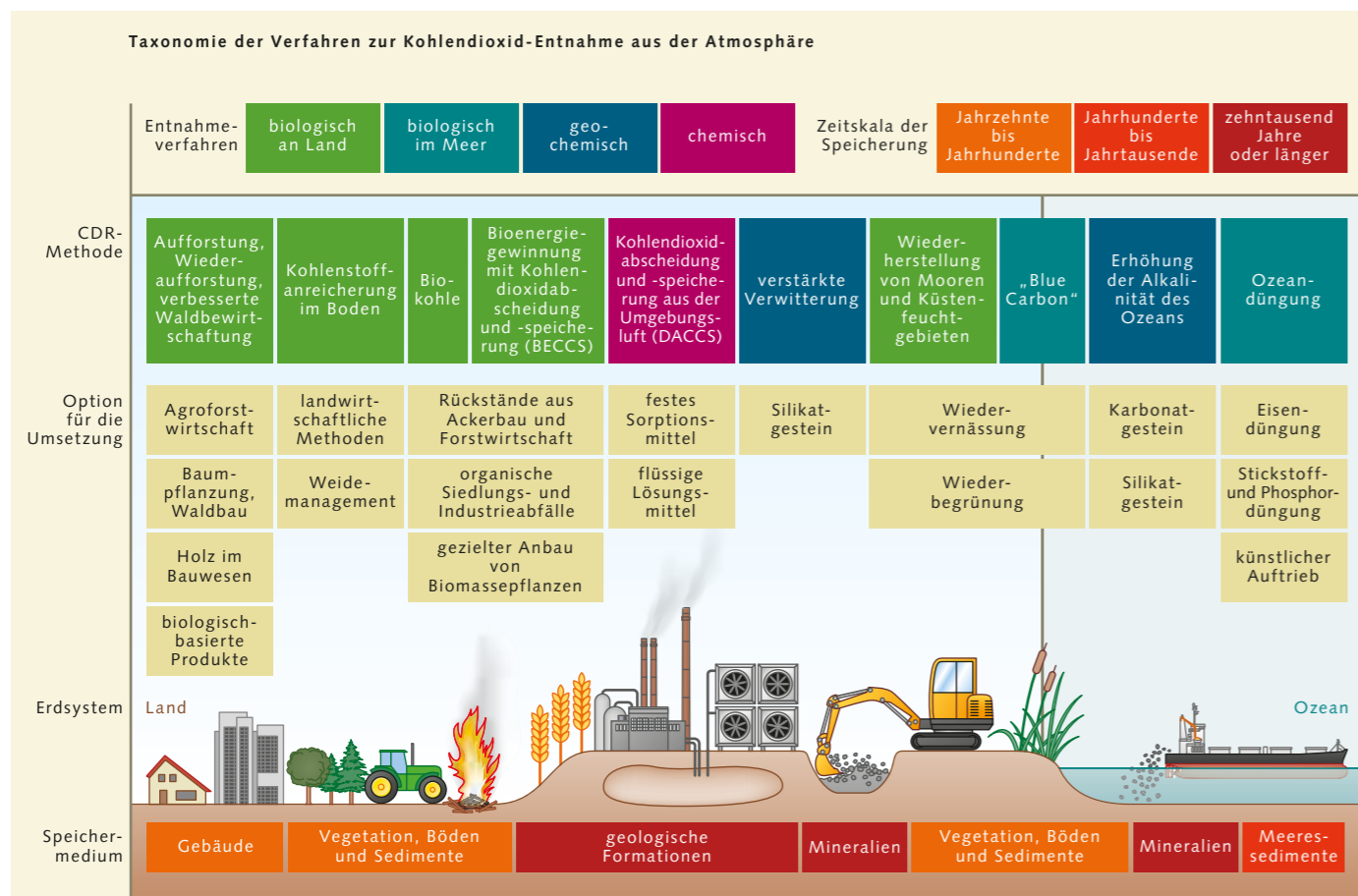
Ozean und Atmosphäre stehen in einem steten Kohlenstoffaustausch. In jedem Jahr wandern mehr als 150

Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Form des Treibhausgases Kohlendioxid zwischen Ozean und Atmosphäre hin und her. Weil die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre aufgrund der menschengemachten Emissionen steigt, absorbiert auch der Ozean mehr CO₂. So hat der Weltozean in den zurückliegenden Jahrzehnten etwa 25 Prozent der vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre aufgenommen und die Erderwärmung auf diese Weise maßgeblich gebremst. Gleichzeitig aber sind seine Wassermassen infolge der Kohlendioxidaufnahme großflächig versauert.

Das ungenutzte Potenzial der Böden und Landvegetation

Die natürliche Kohlendioxidaufnahme des Ozeans zielt zu verstärken, wird erst seit knapp zehn Jahren intensiver diskutiert. Zuvor richteten sich alle Hoffnungen auf die

> Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre könnten sowohl an Land als auch im Meer eingesetzt werden. Dieses Schaubild zeigt die verschiedenen Ansätze, sortiert nach Art der Entnahme und nach anschließendem Speichermedium.



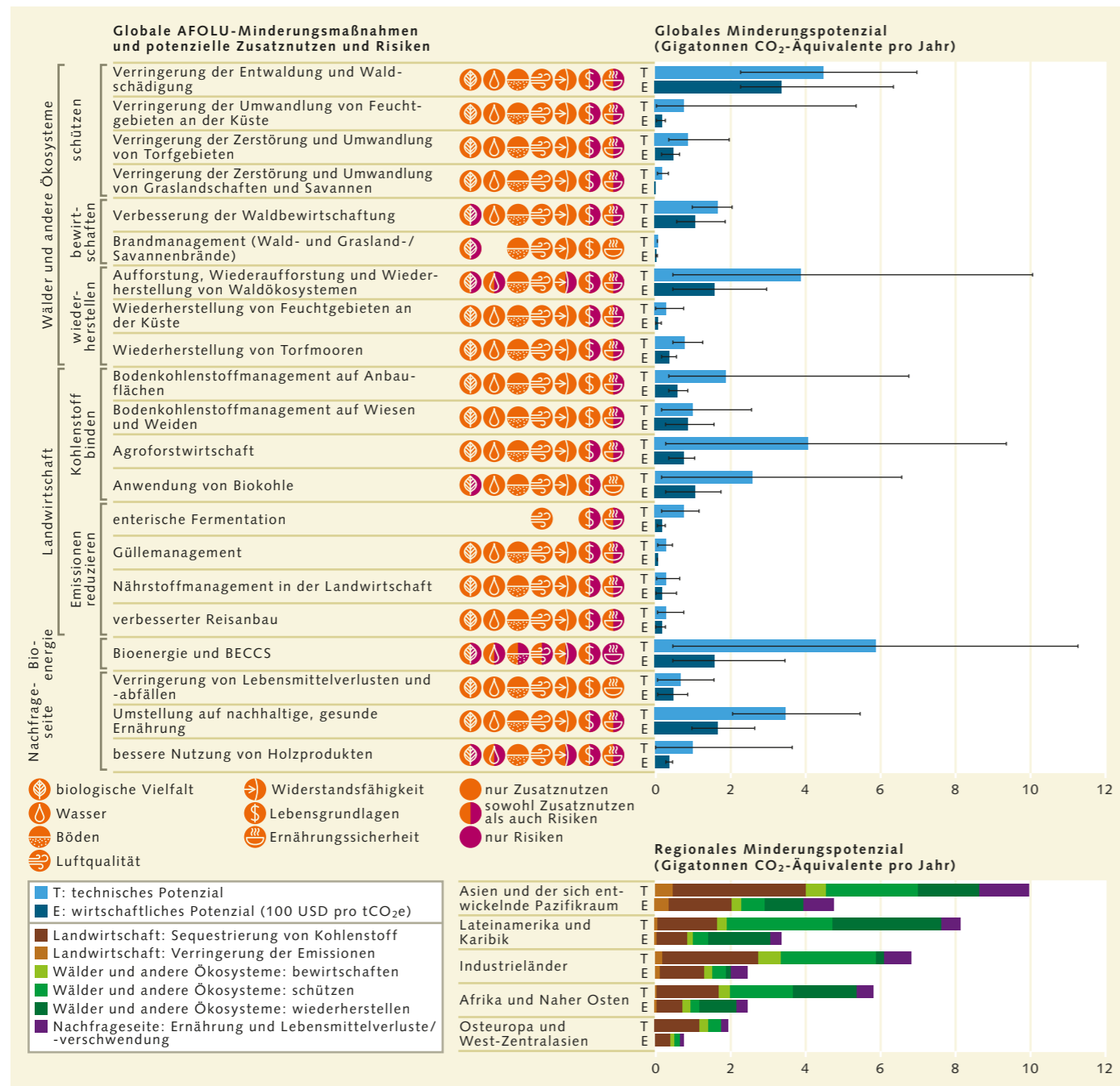
> Der natürliche Kohlenstoffkreislauf der Erde: Blau hinterlegt sind Kohlenstoffsinken oder -speicher, in denen Kohlenstoff oder eine seiner vielen Verbindungen eingelagert wird. Die Pfeile stellen Austauschprozesse dar, bei denen Kohlenstoff oder eine seiner vielen Verbindungen gebunden, verlagert, ausgetauscht oder freigesetzt wird.

Kohlendioxid-Aufnahmekapazität der Böden und Vegetation an Land. Beide stellen im Vergleich zum Ozean einen kleinen Kohlenstoffspeicher dar. Ihre Kohlenstoffflüsse spielen dennoch eine Schlüsselrolle in der aktuellen Klimakrise. Zum einen trägt die Menschheit seit je durch Landnutzungsänderungen zu einem Abbau der natürlichen Kohlenstofflagerstätten an Land bei. Das geschieht, wo immer Wälder (brand-)gerodet, Feuchtgebiete trockengelegt, natürliche Graslandschaften in Ackerland umgewandelt und Böden durch intensive Landwirtschaft ausgelaugt werden. Bei jeder dieser Tätigkeiten wird organische Substanz zersetzt oder verbrannt, sodass Treibhausgase entstehen und freigesetzt werden. Zum anderen stellen die Landvegetation und Böden der Welt noch immer eine sogenannte Kohlenstoffsänke dar. Das heißt,

sie nehmen in der Summe noch immer mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und speichern den enthaltenen Kohlenstoff, als sie durch gegenläufige Prozesse wieder freisetzen.

Auf Grundlage dieses Wissens wurden Lösungen entwickelt, mit denen ein weiterer Treibhausgasausstoß durch Landnutzungsänderungen weitgehend verhindert, die Kohlenstoffspeicher der Böden und Landvegetation vergrößert und mögliche Restemissionen des Menschen kompensiert werden können. Nicht alle diese Maßnahmen sind risikolos, und mancherorts ist der Wettbewerb um benötigte Landflächen und Wassermengen groß. Richtig umgesetzt aber ließen sich mit den bekannten Landnutzungsverfahren etwa 20 bis 30 Prozent jener Emissionsersparungen und Kohlendioxid-Entnahmen erreichen,

GESAMT-CONCLUSIO



> Eine nachhaltige Landnutzung sowie der fachgerechte Einsatz landbasierter Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme brächte Vorteile für Klima, Mensch und Natur. Diese Übersicht zeigt, in welchem Umfang Treibhausgasemissionen mithilfe 21 ausgewählter landbasierter Verfahren verhindert oder kompensiert werden könnten und wie groß der jeweilige Anteil wäre, der sich zu einem Preis von 100 US-Dollar pro Tonne Kohlendioxid-Äquivalente umsetzen ließe. Die runden Icons signalisieren, mit welchen Vorteilen und Risiken bei einem Einsatz des jeweiligen Verfahrens zu rechnen ist. Augenfällig ist, dass das Minderungspotenzial in Asien und dem sich entwickelnden Pazifikraum am größten ist.

die bis zum Jahr 2050 benötigt werden, um die globale Erwärmung langfristig auf unter zwei Grad Celsius zu begrenzen. Bislang aber werden die entsprechenden Maßnahmen in einem viel zu kleinen Rahmen umgesetzt.

Forschen unter enormem Zeit- und Erwartungsdruck

Angesichts der viel zu geringen Fortschritte bei der Emissionsvermeidung und Kohlendioxid-Entnahme an Land suchen Wissenschaft, Politik und Wirtschaft nun nach meeresbasierten Lösungen – und zwar unter stetig wachsendem Zeit- und Erwartungsdruck. Da viele an der Erforschung beteiligte Akteure kommerzielle Interessen verfolgen, wurden Verhaltensregeln für die wissenschaftliche Arbeit erstellt. Sie sollen Transparenz garantieren und Fehlentwicklungen verhindern. Neu ist zudem, dass große Forschungsprojekte zu marinen CDR-Verfahren von Anfang an interdisziplinär ausgerichtet sind. Sie untersuchen sowohl zentrale naturwissenschaftliche Aspekte als auch relevante wirtschaftliche, rechtliche, soziale und politische Fragestellungen und Prozesse und wie sich diese gegenseitig beeinflussen. Eines steht nämlich heute schon fest: Soll der Ozean einen entscheidenden Anteil am Ausgleich der Restemissionen leisten, werden CDR-Maßnahmen im kleinen Maßstab nicht ausreichen. Stattdessen wird eine neue Kohlendioxid-Entnahme-Industrie entstehen müssen, die das Landschaftsbild in den betroffenen Meeres- und Küstenregionen entsprechend verändern wird. Zugleich werden wir Menschen massiv in die natürlichen Prozesse des Ozeans eingreifen müssen, über große Regionen hinweg und für einen langen Zeitraum.

Drei Kategorien meeresbasierter CDR-Verfahren

Die Kohlendioxidaufnahme des Ozeans ließe sich durch verschiedene CDR-Verfahren verstärken. Biologische Verfahren nutzen die Fotosynthese, bei der Algen und Meeres- oder Küstenpflanzen das Kohlendioxid zerlegen, den enthaltenen Kohlenstoff in organische Verbindungen umwandeln und in Form von Biomasse speichern. Chemische Verfahren beeinflussen eine Gleichgewichtsreaktion, die beginnt, wenn sich Kohlendioxid im Meerwasser löst. In ihrem Zuge wird der enthaltene Kohlenstoff chemisch gebunden, sodass er bestenfalls für viele Jahr-

tausende im Ozean verweilen kann. Bei geochemischen Verfahren hingegen wird verflüssigtes oder aber in Wasser gelöstes Kohlendioxid in Gesteinsformationen tief unter dem Meeresboden verpresst. Als Entnahmeverfahren gilt diese Form der Kohlendioxidspeicherung allerdings nur, wenn das eingelagerte CO₂ der Atmosphäre entzogen wurde. Das ist bislang kaum der Fall. In aktuellen CO₂-Speicherprojekten unter dem Meer wird Kohlendioxid eingelagert, welches nahezu ausschließlich aus fossilen Quellen stammt. Es wurde entweder bei der Erdgasförderung abgeschieden oder aber bei Industrie- und Verbrennungsprozessen wie der Zementherstellung, der Stahlproduktion oder bei der Müllverbrennung. Durch eine Speicherung dieses Kohlendioxids wird also nur seine Freisetzung verhindert. Ein Ausgleich von Restemissionen ist nicht möglich.

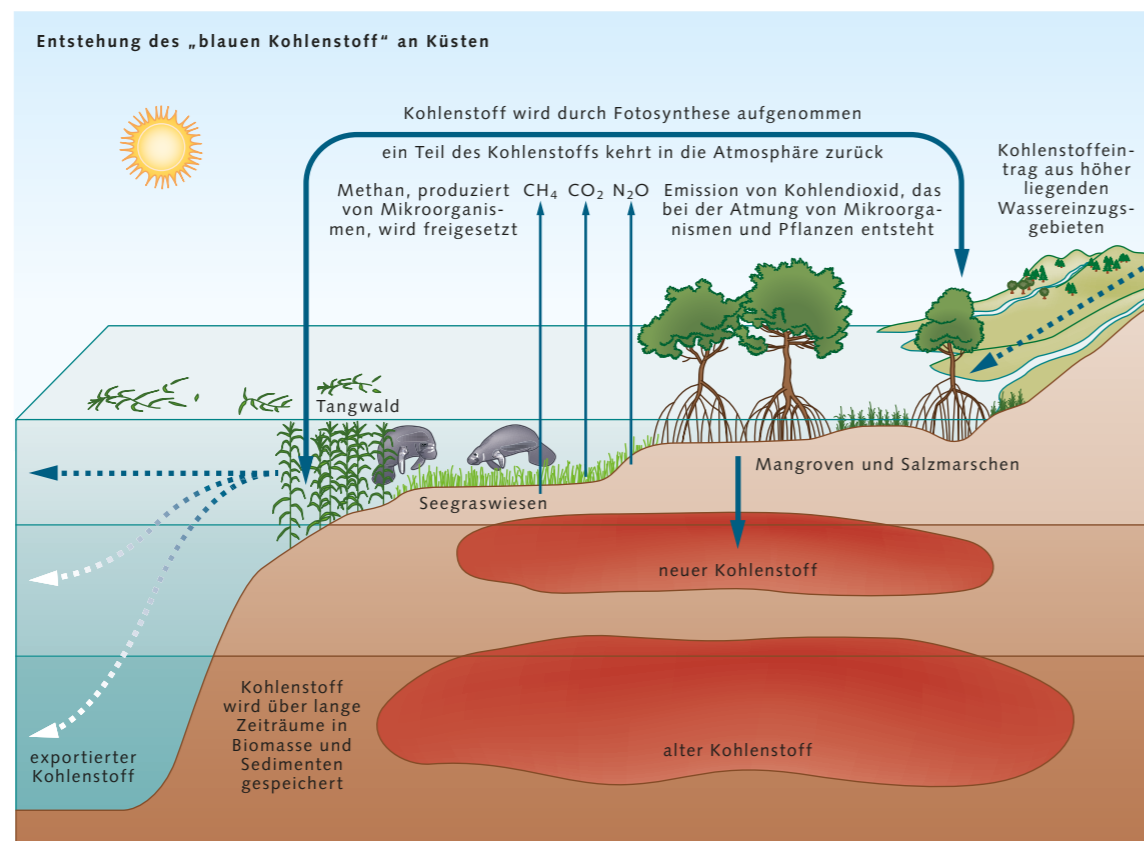
Küstenökosysteme: Marine Kohlenstoffsenken mit unverzichtbaren Zusatzleistungen

Die Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder unserer Welt tragen maßgeblich zur Kohlendioxidaufnahme und -speicherung des Ozeans bei. Viele der Küstenökosysteme speichern deutlich mehr Kohlenstoff im Untergrund als Wälder an Land. Sicher wegschließen können die Meereswälder und -wiesen den Kohlenstoff allerdings nur, solange sie gedeihen. Wo wir Menschen Küstenökosysteme schützen, verhindern wir demzufolge den Zerfall ihrer Kohlenstofflager und damit die Freisetzung großer Mengen Treibhausgase. Gleichzeitig besteht die Hoffnung, durch das Anpflanzen neuer Meereswiesen und -wälder oder durch das Wiederherstellen geschädigter Naturräume die natürliche CO₂-Aufnahme so zu verstärken, dass sich Restemissionen ausgleichen lassen.

Wie groß das CO₂-Entnahmepotenzial der Küstenökosysteme ist, wird kontrovers diskutiert. Ungeklärt ist zum Beispiel, wie viel Kohlenstoff einzelne Meereswiesen und -wälder speichern. Vieles deutet darauf hin, dass die Kohlenstoffeinlagerung von lokalen Umweltfaktoren abhängt und sich von Ort zu Ort stark unterscheidet. Neuanpflanzungen, die darauf abzielen, der Atmosphäre zusätzliches Kohlendioxid zu entziehen, machen daher nur dort Sinn, wo optimale Wachstums- und Einlagerungsbedingungen gegeben sind.

GESAMT-CONCLUSIO

> Wie viel Kohlenstoff Küstenökosysteme langfristig im Untergrund einlagern, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen der Materialeintrag von Land oder aus anderen Meeresregionen sowie die Menge an Biomasse, die von Tieren gefressen oder von Mikroorganismen zersetzt wird.

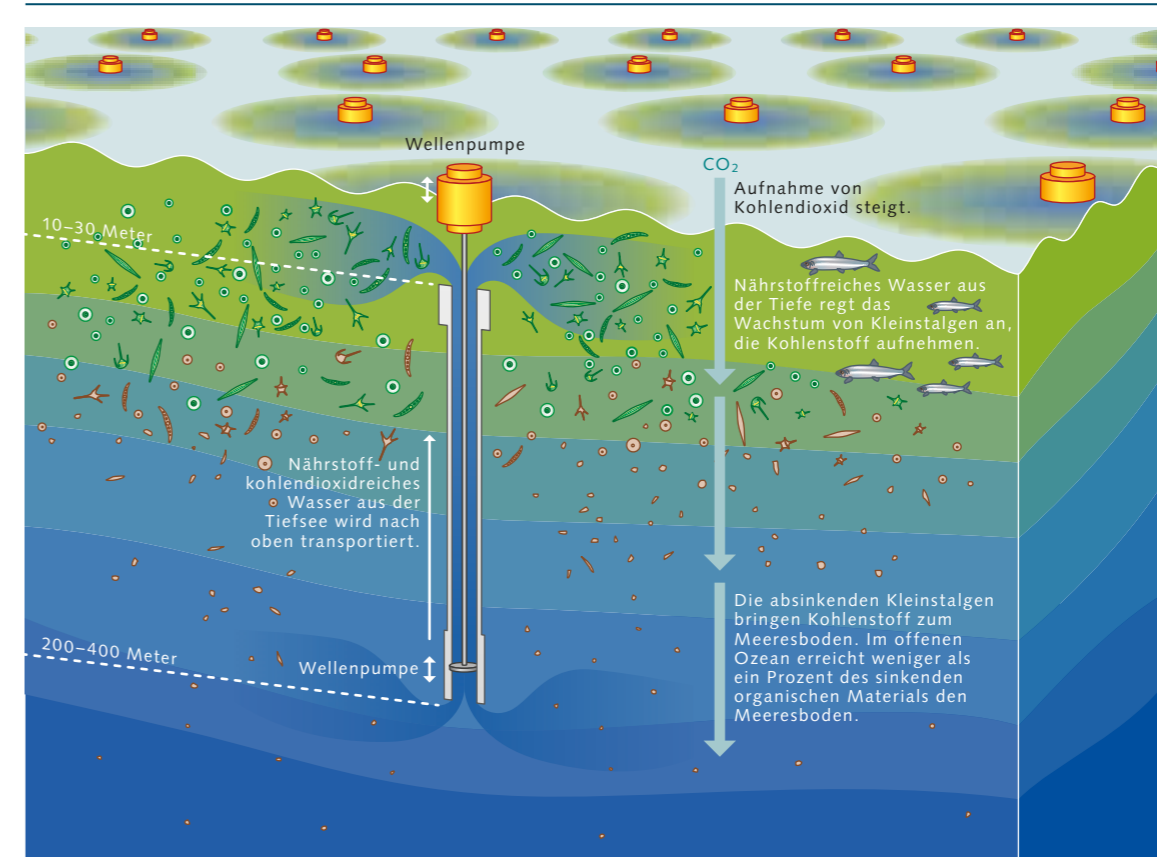


Trotzdem muss auch anderenorts und aus anderen Gründen in den Schutz und die Wiederherstellung zerstörter Küstenökosysteme investiert werden. Viele ihrer Zusatzleistungen sind für uns Menschen überlebenswichtig. Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven und Tangwälder produzieren Sauerstoff, reinigen das Wasser, bieten Lebensraum und Nahrung für Tiere und Pflanzen, schützen die Küsten vor Erosion und versorgen Abermillionen Menschen mit Essen, Holz und Verdienstmöglichkeiten unterschiedlicher Art. Wo Küstenökosysteme wiederhergestellt oder aber erweitert werden, könnte die Gesellschaft somit doppelt profitieren – von der zusätzlichen Kohlendioxid-Entnahme und den wieder verfügbaren Ökosystemleistungen. Ob geplante Restaurations- und Erweiterungsprojekte allerdings von Erfolg gekrönt sein werden, hängt auch davon ab, wie die lokale Bevölkerung in alle Entscheidungsprozesse eingebunden wird. Ohne ihre Unterstützung sind jegliche Vorhaben zum Scheitern verurteilt.

Künstlicher Auftrieb: Nur bedingt nützlich

Als „künstlicher Auftrieb“ werden Verfahren bezeichnet, die darauf abzielen, nährstoffreiches Tiefenwasser an die Meeresoberfläche zu transportieren, um dort das Wachstum mikroskopisch kleiner Algen und somit die biologische Kohlenstoffpumpe des Ozeans zu verstärken. Dieses Konzept geht jedoch nur dann auf, wenn durch die zusätzliche Biomasseproduktion mehr Kohlendioxid gebunden und in die Tiefe verlagert wird, als durch das Emporpumpen des zumeist kohlendioxidreichen Tiefenwassers an die Meeresoberfläche in die Atmosphäre entweicht. Eine Anforderung, die vermutlich nur unter ganz bestimmten Bedingungen erfüllt werden kann. Das CO₂-Entnahmepotenzial dieser Verfahren ist daher eher als gering einzuschätzen.

Hinzu kommt, dass weiterhin ungeklärt ist, mithilfe welcher technischer Mittel künstlicher Auftrieb in einem klimarelevanten Maßstab erzeugt werden kann, welche Risiken die Verfahren für die Meeresumwelt mit sich brin-



> Künstlicher Auftrieb lässt sich durch unterschiedliche Verfahren erzeugen. Eine Idee ist, schlauchähnliche Wellenpumpen im Meer auszusetzen. Sie besitzen am oberen Ende einen Schwimmkörper, der im Rhythmus der Wellen auf- und absteigt. Seine Bewegung wird auf einen Wasserheber im Aufstiegschlauch übertragen, der das Tiefenwasser dann an die Meeresoberfläche hievt.

gen sowie welche regulatorischen Rahmenbedingungen für einen großflächigen Einsatz in Zukunft benötigt werden würden. Der Betrieb Tausender Pumpen würde andere Formen der Meeresnutzung vermutlich stark einschränken.

Sinnvoll und wirtschaftlich lohnenswert erscheint ein Einsatz von künstlichem Auftrieb bislang nur als Hilfsmittel in der Großalgenzucht. Die geernteten Algen werden aktuell jedoch vor allem als Nahrungs- oder Futtermittel sowie als Zusatzstoff bei der Herstellung verschiedener Produkte verwendet. Verfahren zur gezielten Kohlendioxid-Entnahme durch eine verstärkte Großalgenzucht befinden sich derzeit noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase.

Alkalinitätserhöhung: Theoretisch verstanden, im Feld kaum getestet

Lösungsprodukte aus der natürlichen Verwitterung von Gestein erhöhen das Säurebindungsvermögen (Alkalini-

tät) des Ozeans. Sie versetzen ihn auf diese Weise in die Lage, im Wasser gelöstes Kohlendioxid chemisch zu binden und anschließend neues CO₂ aus der Atmosphäre aufzunehmen. Dieser natürliche Prozess der Klimaregulation wiederum könnte gezielt beschleunigt werden, indem man große Mengen an Kalk- und Silikatgestein abbauen und in Form von Gesteinsmehl oder aber alkalischen Lösungen in das Meer eintragen würde. Entsprechende Verfahren zur Alkalinitätserhöhung brächten zudem den Vorteil mit sich, dass die Versauerung der behandelten Wassermassen zurückgehen und sich die Lebensbedingungen für viele Meereslebewesen verbessern würden.

Die chemischen Prozesse einer gezielten Alkalinitätserhöhung sind mittlerweile gut verstanden. Ihre technische Machbarkeit kann jedoch nur schwer eingeschätzt werden, weil das meiste Wissen aus Computersimulationen und kleinen Laborexperimenten stammt. Großflächige Feldexperimente fehlen. Wissenschaftler testen

GESAMT-CONCLUSIO

derzeit im Labor verschiedene natürlich vorkommende und künstlich hergestellte Minerale auf ihre Eignung und Verwitterungseigenschaften. Parallel dazu laufen Untersuchungen zu möglichen Umweltfolgen und -risiken, über die man bisher ebenfalls nur wenig weiß. Fachleute arbeiten außerdem an elektrochemischen Verfahren zur Alkalinitätserhöhung. Diese erfordern zwar einen hohen Maß an Energie, die natürlich aus erneuerbaren Energiequellen stammen sollte, kämen im Gegenzug jedoch ohne Gesteinsmaterial aus.

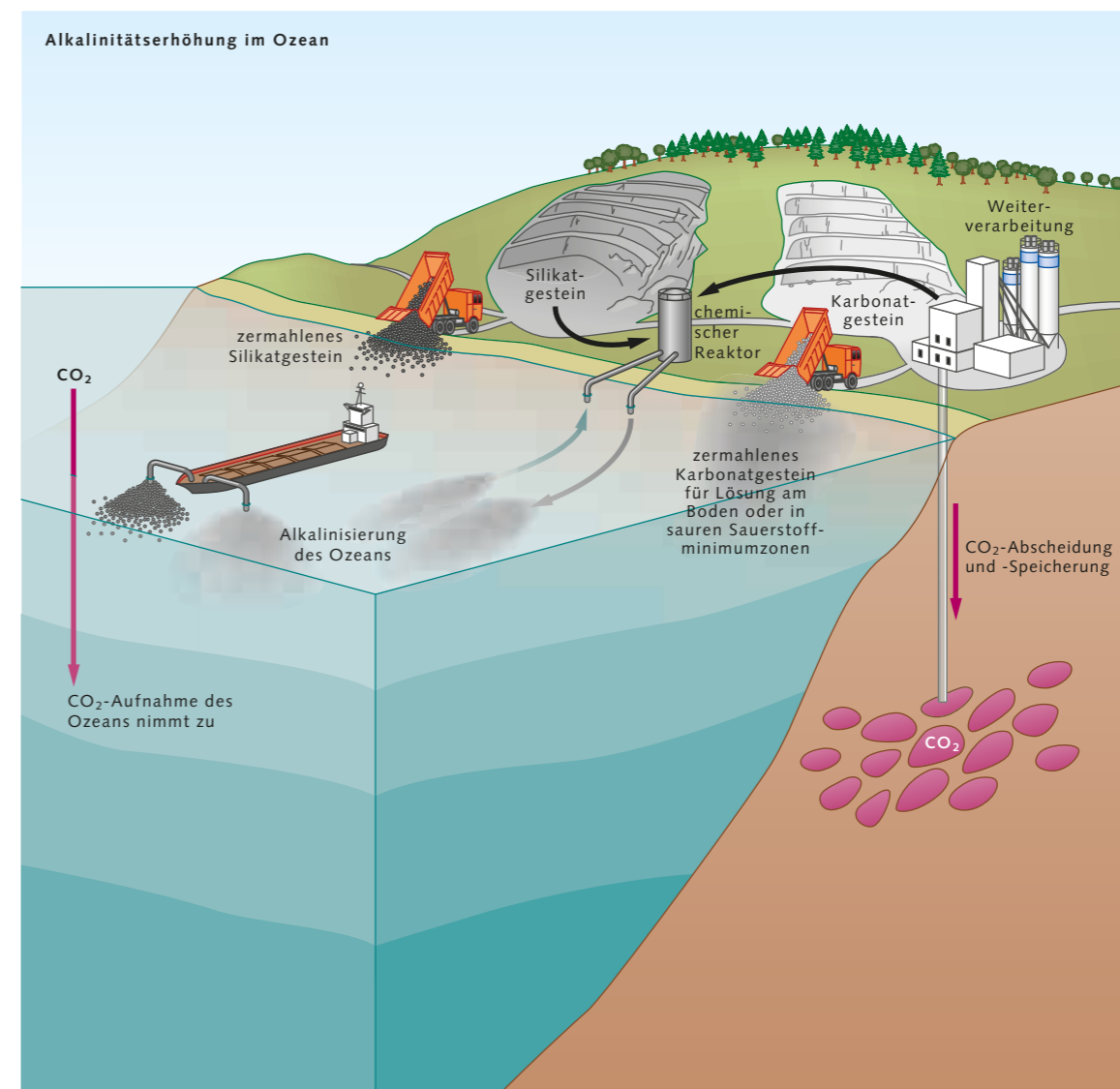
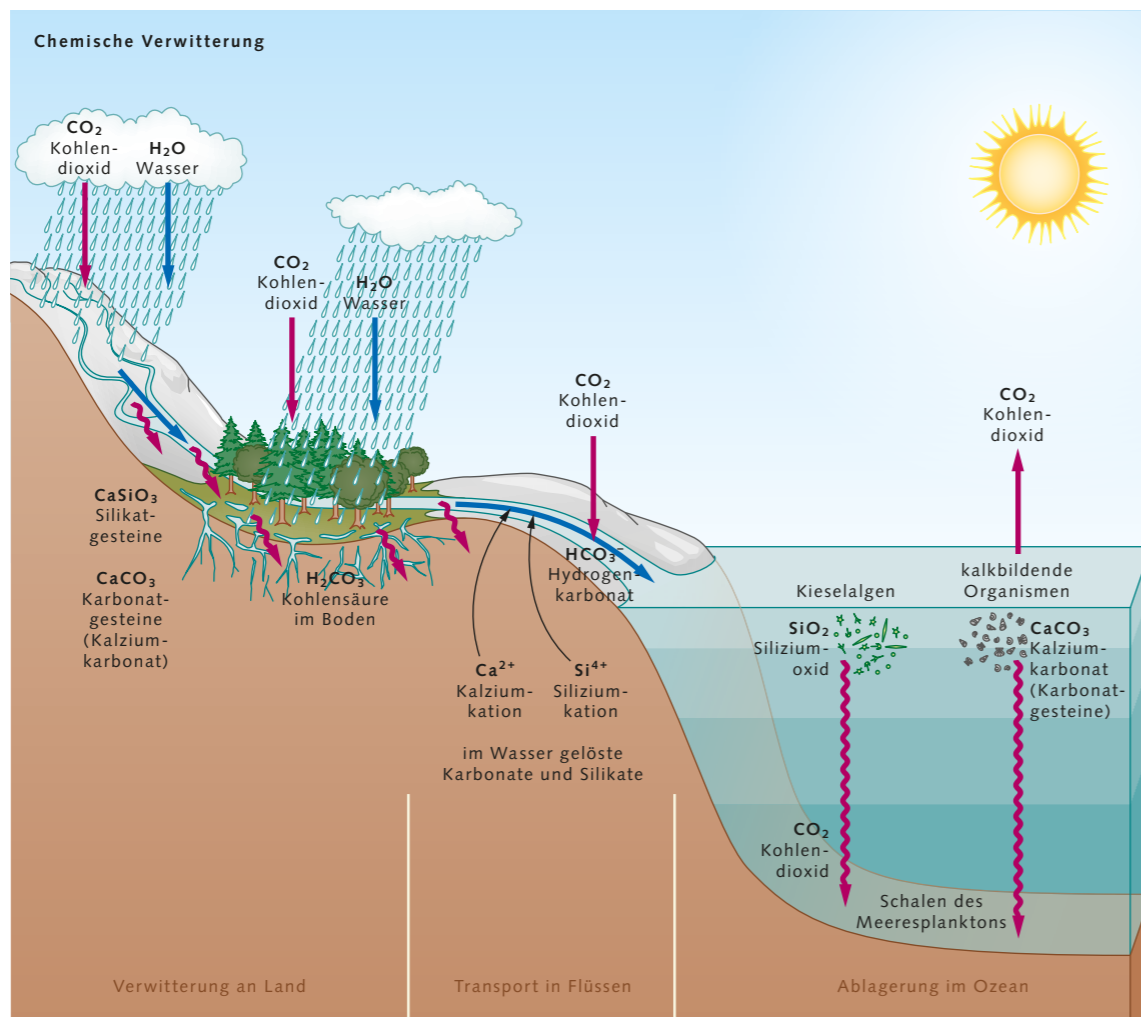
Würden bislang bekannte chemische Verfahren zur Alkalinitätserhöhung weltweit eingesetzt, könnten der Atmosphäre pro Jahr schätzungsweise 100 Millionen bis mehr als eine Milliarde Tonnen Kohlendioxid zusätzlich

entnommen werden. Demgegenüber stehen allerdings neue Treibhausgasemissionen, die im Zuge des Abbaus, Transportes und der Verarbeitung der Gesteine entstehen würden.

**Kohlendioxidspeicherung unter dem Meer:
Ein umstrittenes Verfahren im Aufwind**

Technologien zur Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) sind unerlässlich, wenn das Ziel der globalen Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 erreicht werden soll. Zum einen verhindern sie die Freisetzung von Kohlendioxid aus fossilen Quellen. Zum anderen können CO₂-Entnahmefethoden wie die viel diskutierte Energie- und Wärmegewinnung in

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



> Für zwei der vielversprechendsten Verfahren zur Alkalinitätserhöhung des Ozeans müssten Kalk- oder Silikatgestein an Land abgebaut und zu Gesteinspulver zermahlen werden. Die dabei entstehenden Kohlendioxidemissionen müssten abgeschieden und gespeichert werden, anderenfalls wären die Methoden kaum klimawirksam.

Biomasse-Heizkraftwerken (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) nur dann zu einem Ausgleich von Restemissionen beitragen, wenn das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxid abgeschieden wird. Anschließend muss es dann zu langlebigen Produkten wie etwa Kohlefasern weiterverarbeitet oder aber sicher eingelagert werden.

Die Zahl der weltweit in Betrieb befindlichen Abscheidungsanlagen steigt, wobei die meisten Kohlendioxid aus fossilen Quellen auffangen. Fraglich ist allerdings, wo das entnommene CO₂ langfristig gespeichert werden soll.

Fachleute gehen davon aus, dass der größte Teil des Gases unterirdisch eingelagert werden muss. Technisch umsetzbar ist dies nur in Gesteinsschichten, die von einer undurchlässigen Deckschicht verschlossen sind. Diese soll verhindern, dass das Kohlendioxid aus der Tiefe aufsteigen kann.

An Land stoßen geologische Kohlendioxid-Speicherprojekte vielerorts auf Widerstand. Fachleute suchen deshalb nach geeigneten Speichergesteinen im tiefen Meeresuntergrund. Infrage kommen sowohl Sandsteinformationen als auch die poröse obere Basaltschicht

GESAMT-CONCLUSIO

der Ozeankruste. Technologien für eine CO₂-Speicherung in Sandsteinformationen werden seit dem Jahr 1996 erfolgreich eingesetzt. In die obere Ozeankruste wird Kohlendioxid bisher nur in Island injiziert, weil das Basaltgestein dort bis über die Meeresoberfläche hinausragt und leicht zu erreichen ist. Über das Speicherpotenzial von Basaltgesteinen im tiefen Meeresuntergrund hingegen ist noch nicht sehr viel bekannt. Es wird aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht.

Ein wichtiger Unterschied ist jedoch bereits erkennbar: In Sandstein verpresstes Kohlendioxid verweilt unter Umständen viele Tausend Jahre lang im Porenwasser des Gesteins, bevor es mineralisiert und damit in fester Form sicher gebunden wird. Im reaktionsfreudigen Basaltgestein hingegen laufen die Mineralisierungsprozesse deutlich schneller ab.

Mechanismen für eine Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund

> Vier Mechanismen tragen dazu bei, dass Kohlendioxid in tief liegenden Gesteinsformationen gespeichert werden kann. Wirklich sicher ist das Gas allerdings erst dann eingelagert, wenn es sich im Porenwasser gelöst hat und anschließend mineralisiert ist.

Struktureller Einschluss

Eine undurchlässige Deckschicht verhindert, dass das Kohlendioxid aus dem Speichergestein nach oben entweicht.

Kapillarer/residualer Einschluss

Ein großer Teil des CO₂ wird im Porenraum zwischen den Sandkörnern eingeschlossen.

CO₂-Lösung

Mit der Zeit löst sich das injizierte CO₂ im salzigen Porenwasser des Speichergesteins. Das CO₂-reiche Wasser wird schwerer und sinkt nach unten.

Mineralisierung

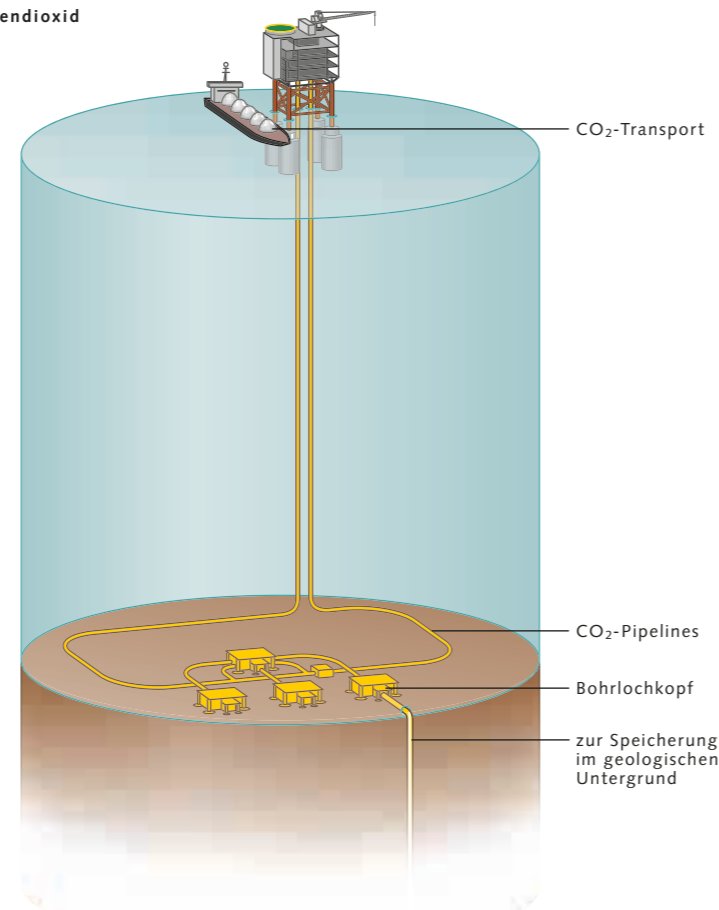
Das im Wasser gelöste Kohlendioxid reagiert mit im Speichergestein enthaltenen Mineralen, wird in gelöstes Bikarbonat umgewandelt und fällt am Ende in Form von Karbonatmineralen aus. In diesen ist das einstige Kohlendioxid fest gebunden.

Das eingelagerte CO₂ muss während und nach der Injektion mit verschiedenen Technologien überwacht werden.

Dennoch ist auch eine Kohlendioxidspeicherung tief unter dem Meer nicht risikolos. Lagerstätten müssen gründlich erkundet, wohlüberlegt ausgewählt und am Ende über lange Zeit hinweg überwacht werden, mit möglichst umweltschonenden Technologien (Stichwort: Lärmbelästigung). Zudem kann die Kohlendioxid-Verpressung in einem bestimmten Gebiet andere Formen der Meeresnutzung in der betroffenen Region einschränken. Entsprechende Speicherprojekte müssen daher sektorenübergreifend abgestimmt werden.

Leitprinzipien für eine Regulierung und Steuerung möglicher CDR

Die immer drastischeren Auswirkungen des Klimawandels verpflichten uns, alles Menschenmögliche zu tun, um die globale Erwärmung auf ein Minimum zu begrenzen. Oberste Priorität hat dabei die Emissionsvermeidung.



Langfristig wird vermutlich aber auch der Einsatz vielversprechender meeresbasierter CDR-Verfahren dazugehören. Sie allein bieten jedoch keinen Ausweg aus der Klimakrise, sondern können nur Teil eines übergreifenden Plans zum Umgang mit Restemissionen sein.

Sollten meeresbasierte CDR-Verfahren angewendet werden, beträfe der Einsatz einen Ozean, der bereits auf vielfache Weise vom Menschen genutzt und ausgebeutet wird. Um das Meer zu schützen und eine gerechte Lastenverteilung zu garantieren, braucht es deshalb gut durchdachte nationale und internationale CDR-Strategien mit klaren Zielstellungen und Regeln für alle Akteure. Fachleute haben erste Leitprinzipien für eine Steuerung und Regulierung land- und meeresbasierter CDR-Verfahren entwickelt. Ihnen zufolge muss zusätzlich zum Vorrang der Emissionsvermeidung bereits vor einem Einsatz sichergestellt werden, dass erstens die Kohlendioxid-Entnahme dauerhaft erfolgen wird und die Maßnahmen nicht mehr neue Treibhausgasemissionen verursachen, als Kohlendioxid der Atmosphäre entnommen werden kann. Zweitens müssen die Verfahren im Vorfeld umfassend aus Klima-, Umwelt- und sozialer Perspektive bewertet und mögliche Zielkonflikte vermieden oder aber auf umwelt- und sozialverträgliche Weise gelöst werden.

Abhängig von der jeweiligen CDR-Methode würde zudem eine Vielzahl technischer Anlagen und Infrastrukturen gebraucht – etwa CO₂-Leitungen, -Transportschiffe und -Speicher für eine Verpressung im tiefen Meeresuntergrund, Reaktoren für die beschleunigte Verwitterung von Gestein oder aber Abscheideanlagen für eine direkte Entnahme von Kohlendioxid aus der Umgebungsluft. Der Bau solcher Infrastrukturen kann viele Jahre in Anspruch nehmen. Er müsste jedoch innerhalb kurzer Zeit realisiert werden, wenn durch CDR-Verfahren der Atmosphäre bis zum Jahr 2050 Kohlendioxid in so großen Mengen entnommen werden soll, wie es Klimaszenarien vorsehen, in denen unsere Klimaziele erreicht werden.

Weil im Weltozean alle Meeresregionen durch Strömungen miteinander verbunden sind, bräuchte es einen international einheitlichen Regulierungsrahmen für meeresbasierte CDR-Einsätze. Experten zufolge deutet momentan wenig darauf hin, dass sich die Staatengemein-

schaft auf ein gemeinsames übergreifendes Regelwerk für alle CDR-Verfahren einigen wird. Dafür unterscheiden sich die vielen land- und meeresbasierten Verfahren zu stark voneinander. Aussichtsreicher sind Vorschläge, marine CDR-Methoden separat zu regulieren. Wie das gelingen könnte, zeigt sich am Beispiel des Londoner Protokolls. Dessen Regelwerk ist in den zurückliegenden Jahren um „marines Geoengineering“ erweitert worden. Zudem wurden bereits Vorgaben zur Ozeandüngung und zur Kohlendioxidspeicherung im tiefen Meeresuntergrund in das Protokoll aufgenommen. Auf dieselbe Weise ließen sich Vorschriften für weitere CDR-Verfahren integrieren, bei denen ebenfalls Stoffe oder Technik in das Meer eingebracht werden müssten.

Dringend benötigt werden auch einheitliche Verfahren, mit denen die tatsächlichen Kohlendioxidflüsse in Entnahmeprojekten an Land und im Meer gemessen, dokumentiert und verifiziert werden können. Ein solches Monitoring könnte Rechtsunsicherheiten reduzieren, Missbrauch verhindern und böte die Chance, Zertifikate auf dauerhaft entnommene CO₂-Mengen auszugeben. Wirtschaftliche Vorteile, die mit diesen Zertifikaten verbunden wären, könnten Unternehmen und andere Akteure motivieren, in meeresbasierte CDR-Projekte zu investieren.

Gleichzeitig braucht unsere Gesellschaft allerdings auch eine breite öffentliche Debatte über den möglichen Einsatz mariner CDR-Verfahren. Diese findet bislang nur in der Wissenschaft, in einigen Teilen der Wirtschaft sowie in wenigen politischen Gremien statt. Ein starkes Engagement der Öffentlichkeit ist jedoch aus vielerlei Gründen Grundvoraussetzung für erfolgreichen Klimaschutz. Das gilt im Falle meeresbasierter CDR-Vorhaben insbesondere für die Küstenbevölkerung, vor deren Haustür die Verfahren zum Einsatz kämen oder aber in deren Nachbarschaft ein Teil der benötigten technischen Anlagen errichtet werden würde.

Fest steht heute schon: Risiko- und folgenlos werden solche Einsätze nicht sein. Daher gilt es, bei jeder Entscheidung sorgsam abzuwägen und die Bedürfnisse von Menschen, Klima und Natur gemeinsam zu berücksichtigen – eine enorm schwierige Aufgabe. Die Zeit der leichten Antworten aber ist aufgrund unseres Nichtstuns in Sachen Klimaschutz längst vorbei.

Abkürzungen

ABNJ Areas Beyond National Jurisdiction; Gebiete außerhalb nationaler Hoheitsgewalt

AGGI Annual Greenhouse Gas Index; Treibhausgasindex der US-amerikanischen Ozean- und Atmosphärenbehörde NOAA

AUD Währungskurzzeichen des Australischen Dollars

AWZ Ausschließliche Wirtschaftszone

BBNJ Biodiversity Beyond National Jurisdiction; Biodiversität außerhalb von Gebieten unter nationaler Hoheitsgewalt

BECCS Bioenergy with Carbon Capture and Storage; Bioenergiegewinnung mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -einlagerung

Ca Symbol für Kalzium

CaCO₃ chemische Formel für Kalziumkarbonat (Kalk)

CaSiO₃ chemische Formel für Silikatgestein

CBD Convention on Biological Diversity; Biodiversitätskonvention

CCS Carbon Capture and Storage; Kohlendioxidabscheidung und -speicherung

CCU Carbon Capture and Utilisation; Kohlendioxidabscheidung und -verwertung

CDR Carbon Dioxide Removal; Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre

CH₄ chemische Formel für Methan

CO₂ chemische Formel für Kohlendioxid

DAC Direct Air Capture; Kohlendioxidabscheidung aus der Umgebungsluft

DACCS Direct Air Carbon Capture and Storage; Kohlendioxidabscheidung aus der Umgebungsluft mit anschließender Speicherung im geologischen Untergrund

DACCU Direct Air Carbon Capture and Utilisation; Kohlendioxidabscheidung aus der Umgebungsluft mit anschließender Weiterverwertung

EEX European Energy Exchange; Europäische Energiebörse in Leipzig

EU European Union; Europäische Union

EU-ETS European Union Emissions Trading System; Europäischer Emissionshandel

FCKW Fluorchlorkohlenwasserstoffe

GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection; UN-Expertengruppe zu wissenschaftlichen Fragen des Meeresschutzes

Gt gigatons; Gigatonnen (Milliarden Tonnen)

H⁺ Wasserstoffkation, auch Proton genannt

H₂CO₃ chemische Formel für Kohlensäure

H₂O chemische Formel für Wasser

HCO₃⁻ chemische Formel für ein Hydrogenkarbonation

IAM Integrated Assessment Model; integriertes Assessment-Modell

IEA International Energy Agency; Internationale Energieagentur, Weltenergieagentur

IMO International Maritime Organization; Internationale Seeschiffahrts-Organisation

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change; Weltklimarat

ISA International Seabed Authority; Internationale Meeresbodenbehörde in Kingston, Jamaika

KSpG Kohlendioxid-Speicherungsgesetz

MIT Massachusetts Institute of Technology; technische Hochschule im US-Bundesstaat Massachusetts

N₂O chemische Formel für Distickstoffmonoxid, auch Lachgas genannt

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration; US-amerikanische Ozean- und Atmosphärenbehörde

ppm parts per million; Teile von einer Million, Millionstel

RCP Representative Concentration Pathways; Repräsentative Konzentrationspfade

SDGs Sustainable Development Goals; Ziele für nachhaltige Entwicklung

Si⁴⁺ chemische Formel für Siliziumkation

SiO₂ chemische Formel für Siliziumoxid

SSP Shared Socioeconomic Pathway(s); Gemeinsame Sozioökonomische Entwicklungspfade

UN United Nations; Vereinte Nationen

UNCLOS United Nations Convention on the Law of the Sea; Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen

UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change; Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen

WMO World Meteorological Organization; Weltorganisation für Meteorologie

Quellenverzeichnis

Kapitel 1

Dringlichst gesucht – Wege aus der Klimakrise

Barnosky, A., et al., 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471, pp. 51–57, doi:10.1038/nature09678

Begum, T., 2021. What is mass extinction and are we facing a sixth one? Natural History Museum, <https://www.nhm.ac.uk/discover/what-is-mass-extinction-and-are-we-facing-a-sixth-one.html>

Borunda, A., 2021: Los Angeles confronts its shady divide. National Geographic, <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/los-angeles-confronts-its-shady-divide-feature>

Carbon Brief – clear on climate,ritisches Nachrichtenportal zur Klimaforschung, zu Klimapolitik und Energiethemen, www.carbonbrief.org

Climate Action Tracker, 2022. Warming Projections Global Update, November 2022. <https://climateactiontracker.org/>

FAO, 2020: Global Forest Resource Assessment 2020. Main report. Rome, doi:10.4060/ca9825en, <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/en/>

Foster, P. M., et al., 2023. Indicators of Global Climate Change 2022: Annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and the human influence. *Earth System Science Data*, doi:10.5194/essd-2023-166

Friedlingstein, P., et al., 2022. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, doi:10.5194/essd-14-4811-2022

IEA, 2022. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021 – Global emissions rebound sharply to highest ever level. IEA Publications, www.iea.org

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leit-zell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, in press, doi:10.1017/9781009157896

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, doi:10.1017/9781009157926

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Hrsg.). IPCC, Geneva, Switzerland, in press

Liu, X., et al., 2022. Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. *Earth's Future*, 10, e2021EF002567, doi:10.1029/2021EF002567

Marotzke, J., S. Milinski & C. D. Jones, 2021. How close are we to 1.5 degC or 2 degC of global warming? *Royal Meteorological Society, Weather – April 2022*, Vol. 77, No. 4, doi:10.1002/wea.4174

NOAA, 2023. The NOAA Annual Greenhousegas Index (AGGI). <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>

Ocko, I. B., et al., 2021. Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. *Environmental Research Letters*, Vol. 16, No. 5, doi:10.1088/1748-9326/abf9c8

Paustian K., et al., 2019. Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Frontiers in Climate*, 1:8. doi:10.3389/fclim.2019.00008

Penn, J. L. & C. Deutsch, 2022. Avoiding ocean mass extinction from climate warming. *Science* 28 April 2022, Vol. 376, Issue 6592, pp. 524–526, doi:10.1126/science.abe9039

Piatt, J. F., et al., 2020. Extreme mortality and reproductive failure of common murrets resulting from the northeast Pacific marine heatwave of 2014–2016. *PLoS ONE* 15(1): e0226087, doi:10.1371/journal.pone.0226087

Smith, S. M., et al., 2023. The State of Carbon Dioxide Removal – 1st Edition. <https://www.stateofcdr.org>

Trewin, B., et al., 2021. Headline Indicators for Global Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, doi:10.1175/BAMS-D-19-0196.1

Vecellio, D. J., et al., 2022. Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project). *Journal of Applied Physiology* 2022 132:2, pp. 340–345, doi:10.1152/jappphysiol.00738.2021

Verein Deutscher Zementwerke e.V., <https://www.vdz-online.de/>

Weller, E., et al., 2015. Human contribution to the 2014 record high sea surface temperatures over the western tropical and northeast Pacific Ocean. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(12): pp. 100–104, doi:10.1175/BAMS-D-15-00055.1

Williams, A. P., B. I. Cook & J. E. Smerdon, 2022. Rapid intensification of the emerging southwestern North American megadrought in 2020–2021. *Nature Climate Change*, 12, pp. 232–234 (2022), doi:10.1038/s41558-022-01290-z

World Meteorological Organization, 2022. State of the Global Climate 2021, Genf, Schweiz

World Meteorological Organization, 2023. State of the Global Climate 2022, Genf, Schweiz

World Weather Attribution Initiative, wissenschaftliche Expertengruppe für die Zuschreibung von Wetter- und Klimaextremen, www.worldweatherattribution.org

United Nations Environment Programme & Climate and Clean Air Coalition, 2021. Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Nairobi: United Nations Environment Programme

Kapitel 2

Die Rolle des Ozeans im Kohlenstoffkreislauf der Erde

Armstrong McKay, D., S. E. Cornell, K. Richardson & J. Rockström, 2021. Resolving ecological feedbacks on the ocean carbon sink in Earth system models. *Earth System Dynamics*, 12, pp. 797–818, doi.org:10.5194/esd-12-797-2021

Bopp, L., C. Bowler & L. Guidi, 2019. The Ocean, a Carbon Pump. www.ocean-climate.org

Bruhwyler, L., et al., 2018. Chapter 1: Overview of the global carbon cycle. In: Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report. Cavallaro, N., G. Shrestha, R. Birdsey, M. A. Mayes, R. G. Najjar, S. C. Reed, P. Romero-Lankao, & Z. Zhu (Hrsg.). U. S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 42–70, <https://doi.org/10.7930/SOCCR2.2018.Ch1>

CDRmare, 2023. Der natürliche Kohlenstoffkreislauf der Erde. aktualisierte Version aus Mai 2023, <https://cdrmare.de/factsheets/>

Cole, J. J., 2012. The carbon cycle: With a brief introduction to global biogeochemistry. *Fundamentals of Ecosystem Science*. pp. 109–135

Gruber, N., P. Landschützer & N. S. Lovenduski, 2018. The Variable Southern Ocean Carbon Sink. *Annual Review of Marine Science*, doi:10.1146/annurev-marine-121916-063407

Hauck, J., et al., 2020. Consistency and Challenges in the Ocean Carbon Sink Estimate for the Global Carbon Budget. *Frontiers in Marine Science*. 7:571720. doi:10.3389/fmars.2020.571720

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leit-zell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, in press, doi:10.1017/9781009157896

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844

Johnson, D. W., 2022. Selection on offspring size and contemporary evolution under ocean acidification. *Nature Climate Change* 12, pp. 757–760, doi:10.1038/s41558-022-01425-2

Kwiatkowski, L., et al., 2020. Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. *Biogeosciences*, doi:10.5194/bg-17-3439-2020

Long, M. C. et al., 2021. Strong Southern Ocean carbon uptake evident in airborne observations. *Science* 374, pp. 1275–1280 (2021), doi:10.1126/science.abi4355

Nayak, A. R. & M. S. Twardowski, 2020. “Breaking” news for the ocean’s carbon budget. *Science* 367, pp. 738–739 (2020), doi:10.1126/science.aba7109

Pörtner, H.-O., 2022: Versauerung der Ozeane und Meeresökosysteme. In: Thunberg, G., 2022. Das Klima-Buch von Greta Thunberg, S. Fischer Verlage

Stockholm Resilience Centre, 2021. In a warming world the ocean will struggle as a carbon sink, <https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2021-12-13-in-a-warming-world-the-ocean-will-struggle-as-a-carbon-sink.html>

WBGU, 2006. Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer, Sondergutachten. Berlin

Kapitel 3 Das ungenutzte Klimaschutzpotenzial der Ökosysteme an Land

Carbon Brief – clear on climate,ritisches Nachrichtenportal zur Klimaforschung, zu Klimapolitik und Energiethemen, www.carbonbrief.org

Degener, J. F., 2015. Atmospheric CO₂ fertilization effects on biomass yields of 10 crops in northern Germany. *Frontiers in Environmental Science*, 3:48, doi:10.3389/fenvs.2015.00048

Doelman, J. C. & E. Stehfest, 2022. The risks of overstating the climate benefits of ecosystem restoration. *Nature* 609, E1–E3, doi:10.1038/s41586-022-04881-0

Edenhofer, O., et al., 2021. Wissensstand zu CO₂-Entnahmen. Bedarf & Potenziale, Technologien & Politikinstrumente, weltweit & in Deutschland. Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH, Berlin

Edwards, T. 2022. What is soil organic carbon? Government of Western Australia, Department of Primary Industrie and Regional Development, <https://www.agric.wa.gov.au/measuring-and-assessing-soils/what-soil-organic-carbon>

Erlach, B., et al., 2022: „Was sind negative Emissionen, und warum brauchen wir sie? (Kurz erklärt!)“, Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), doi:10.48669/ESYS_2022-2

FAO, 2022. The State of the World’s Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. Rome, FAO. doi:10.4060/cb9360en

Friedlingstein, P., et al., 2022. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, doi:10.5194/essd-14-4811-2022

Green, J. K. & T. F. Keenan, 2022. The limits of forest carbon sequestration, *Science* 376, pp. 692–693 (2022), doi:10.1126/science.abo6547

Gurevitch, J., 2022. Managing forests for competing goals. *Science*, 376 (6595), doi:10.1126/science.abp8463

IEA, 2022. Direct Air Capture, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926

Lorenz, K. & L. Rattan, 2016. Soil Organic Carbon – An Appropriate Indicator to Monitor Trends of Land and Soil Degradation within the SDG Framework?, *Texte 77/2016*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Pongratz, J., et al., 2021. Land Use Effects on Climate: Current State, Recent Progress, and Emerging Topics. *Current Climate Change Reports* 7, pp. 99–120 (2021), doi:10.1007/s40641-021-00178-y

Poore, J. & T. Nemecek, 2018. Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 1 June 2018, Vol. 360, Issue 6392, pp. 987–992, doi:10.1126/science.aaq0216

Xu, S., et al., 2022. Delayed use of bioenergy crops might threaten climate and food security. *Nature* 609, pp. 299–306 (2022). doi:10.1038/s41586-022-05055-8

Kapitel 4 Marine CDR-Verfahren: Forschung unter Zeit- und Erwartungsdruck

Boettcher, M., et al., 2021. Navigating Potential Hype and Opportunity in Governing Marine Carbon Removal. *Frontiers in Climate*, 3:664456; doi:10.3389/fclim.2021.664456

Castanon, L., 2021. An Ocean of Opportunity. *Oceanus Fall 2021*, Woods Hole Oceanographic Institution, <https://www.whoi.edu/oceanus/feature/an-ocean-of-opportunity/>

Cooley, S. R., et al., 2023. Sociotechnical Considerations About Ocean Carbon Dioxide Removal. *Annual Review of Marine Science* 2023 15:1, pp. 41–66, doi:10.1146/annurev-marine-032122-113850

Keller, D. P., K. Brent, L. T. Bach & W. Rickels, 2021. Editorial: The Role of Ocean-Based Negative Emission Technologies for Climate Mitigation. *Frontiers in Climate Science*, 3:743816. doi:10.3389/fclim.2021.743816

Lebling, K., et al., 2022. Towards Responsible and Informed Ocean-Based Carbon Dioxide Removal: Research and Governance Priorities. Report. Washington, DC: World Resources Institute. doi:10.46830/wriprt.21.00090

Loomis, R., et al., 2022. A Code of Conduct Is Imperative for Ocean Carbon Dioxide Removal Research. *Frontiers in Marine Science*, 9:872800. doi:10.3389/fmars.2022.872800

OceanNETs, EU-Forschungsprojekt, <https://www.oceannets.eu>

Yoon, J.-E., et al., 2018. Reviews and syntheses: Ocean iron fertilization experiments – past, present, and future looking to a future Korean Iron Fertilization Experiment in the Southern Ocean (KIFES) project. *Biogeosciences*, 15, pp. 5847–5889, doi:10.5194/bg-15-5847-2018, 2018

Kapitel 5 Mehr Kohlenstoffeinlagerung in Wiesen und Wäldern des Meeres?

Apple Media, 2021. Apple and partners launch first-ever \$200 million Restore Fund to accelerate natural solutions to climate change. Press release, <https://www.apple.com/newsroom/2021/04/apple-and-partners-launch-first-ever-200-million-restore-fund/>

Bertram, C., et al., 2021. The blue carbon wealth of nations. *Nature Climate Change* 11, pp. 704–709 (2021), doi:10.1038/s41558-021-01089-4

Blaufelder, C., et al., 2023. A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet the climate challenge. McKinsey & Company, <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge>

Carbon Brief – clear on climate,ritisches Nachrichtenportal zur Klimaforschung, zu Klimapolitik und Energiethemen, www.carbonbrief.org

Cai, J., et al., 2021. Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular*. No. 1229. Rome, FAO. doi:10.4060/cb5670en

CDRmare, 2023. Verstärkte Kohlenstoff-Speicherung durch die Ausweitung der Wiesen und Wälder des Meeres. Fact Sheet, Aktualisierte Version Juni 2023, <https://cdrmare.de/factsheets/>

Deutsche Emissionshandelsstelle, <https://www.dehst.de>

FAO, 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Rome, FAO, doi:10.4060/cc0461en

Gallagher, A. J., et al., 2022. Tiger sharks support the characterization of the world’s largest seagrass ecosystem. *Nature Communications* 13, 6328 (2022), doi:10.1038/s41467-022-33926-1

Gallagher, J. B., 2022. Kelp won’t help: why seaweed may not be a silver bullet for carbon storage after all. *The Conversation*, <https://theconversation.com/kelp-wont-help-why-seaweed-may-not-be-a-silver-bullet-for-carbon-storage-after-all-178018>

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lössche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844

Kiwelu, L., E. de Wit & E. Gasparotto, 2022. Draft Core Carbon Principles for the Voluntary Carbon Market released, Norton Rose Fulbright, <https://www.nortonrosefulbright.com/>

Krause-Jensen, D., et al., 2018. Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the Blue Carbon room. *Biological Letters*, 14: 20180236, doi:10.1098/rsbl.2018.0236

Leal, M. & M. Spalding, 2022. The State of the World's Mangroves 2022. Global Mangrove Alliance, www.mangrovealliance.org

Lebling, K., et al., 2022. Towards Responsible and Informed Ocean-Based Carbon Dioxide Removal: Research and Governance Priorities. Report. Washington, DC: World Resources Institute. doi:10.46830/wriprt.21.00090

Macreadie, P. I., et al., 2021. Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment* 2, pp. 826–839 (2021), doi:10.1038/s43017-021-00224-1

Macreadie, P. I., et al., 2022. Operationalizing marketable blue carbon. *One Earth*, Vol. 5, Issue 5, pp. 485–492, doi:10.1016/j.oneear.2022.04.005

Murray, N. J., et al., 2022. High-resolution mapping of losses and gains of Earth's tidal wetlands. *Science*, 13 May 2022, 376(6594), pp. 744–749. doi:10.1126/science.abm9583

Needelman, B. A., et al., 2018. The Science and Policy of the Verified Carbon Standard Methodology for Tidal Wetland and Seagrass Restoration. *Estuaries and Coasts* 41, pp. 2159–2171 (2018), doi:10.1007/s12237-018-0429-0

Saderne, V., et al., 2019. Role of carbonate burial in Blue Carbon budgets. *Nature Communications* 10, 1106 (2019), doi:10.1038/s41467-019-08842-6

The Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, <https://www.iif.com/tsvcm>

Unsworth, R. K. F., et al., 2022. The planetary role of seagrass conservation. *Science* 377, pp. 609–613 (2022), doi:10.1126/science.abq6923

Wang, F., et al., 2020. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. *National Science Review*, doi:10.1093/nsr/nwaa296

Williamson, P. & J.-P. Gattuso, 2022. Carbon Removal Using Coastal Blue Carbon Ecosystems Is Uncertain and Unreliable, With Questionable Climatic Cost-Effectiveness. *Frontiers in Climate* 4:853666, doi:10.3389/fclim.2022.853666

Worthington, T. & M. Spalding, 2018. Mangrove Restoration Potential: A Global Map Highlighting A Critical Opportunity. Cambridge, MA: Apollo – University of Cambridge Repository, doi:10.17863/CAM.39153

Wu, J., et al., 2022. Carbon Dioxide Removal via Macroalgae Open-ocean Mariculture and Sinking: An Earth System Modeling Study. *Earth System Dynamics*, doi:10.5194/esd-2021-104

Kapitel 6 Künstlicher Auftrieb: Die Idee von der Begrünung des Ozeans

Bristow, L., et al., 2017. Nutrients that limit growth in the ocean. *Current Biology*, Vol. 27, Issue 11, pp. R474–R478, doi:10.1016/j.cub.2017.03.030

CDRmare, 2023. Künstlicher Auftrieb: Mehr Power für die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres. Fact Sheet, Aktualisierte Version Juni 2023, <https://cdrmare.de/factsheets/>

CDRmare, 2023. Alle Hoffnung auf die grüne Wolke. *Science Stories*, <https://cdrmare.de/science-stories/>

Fan, W., et al., 2019. Nutrient Removal from Chinese Coastal Waters by Large-Scale Seaweed Aquaculture Using Artificial Upwelling. *Water* 11 (9):1754; doi:10.3390/w11091754

Goldenberg, S. U., et al., 2022. Nutrient composition (Si:N) as driver of plankton communities during artificial upwelling. *Frontiers in Marine Science* 9:1015188, doi:10.3389/fmars.2022.1015188

Kowek, D. A., 2022. Expected Limits on the Potential for Carbon Dioxide Removal From Artificial Upwelling. *Frontiers in Marine Science* 9:841894, doi:10.3389/fmars.2022.841894

Lebling, K., et al., 2022. Towards Responsible and Informed Ocean-Based Carbon Dioxide Removal: Research and Governance Priorities. Report. Washington, DC: World Resources Institute. doi:10.46830/wriprt.21.00090

Nötig, E. & K. Metfies, 2017. Das Phytoplankton im Überblick. In: Hempel, G., K. Bischof & W. Hagen. *Faszination Meeresforschung – Ein ökologisches Lesebuch*. 2. Auflage, Springer-Verlag, doi:10.1007/978-3-662-49714-2

Tagliabue, A., et al., 2017. The integral role of iron in ocean biogeochemistry. *Nature* 543, pp. 51–59 (2017), doi:10.1038/nature21058

Kapitel 7 Gezielte Eingriffe in die Meereschemie

Albright, R., et al., 2016. Reversal of ocean acidification enhances net coral reef calcification. *Nature* 531, pp. 362–365 (2016), doi:10.1038/nature17155

Callagon La Plante, E., et al., 2021. Saline Water-Based Mineralization Pathway for Gigatonne-Scale CO₂ Management. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9, 3, pp. 1073–1089, doi:10.1021/acssuschemeng.0c08561

CDRmare, 2023. Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans. Fact Sheet, Aktualisierte Version Juni 2023, <https://cdrmare.de/factsheets/>

CDRmare, 2023. Experimente zur Alkalinitätssteigerung: Wie reagiert das Leben im Meer. *Science Stories*, <https://cdrmare.de/science-stories/>

Clam Garden Network, <https://www.clamgarden.com>

Hartmann, J., et al., 2023. Stability of alkalinity in ocean alkalinity enhancement (OAE) approaches – consequences for durability of CO₂ storage. *Biogeosciences*, doi:10.5194/bg-20-781-2023

Kim, S., et al., 2023. Asymmetric chloride-mediated electrochemical process for CO₂ removal from oceanwater. *Energy & Environmental Science*, Issue 5 2023, pp. 2030–2044, doi:10.1039/D2EE03804H

Lebling, K., et al., 2022. Towards Responsible and Informed Ocean-Based Carbon Dioxide Removal: Research and Governance Priorities. Report. Washington, DC: World Resources Institute. doi:10.46830/wriprt.21.00090

Lenton, A., et al., 2018. Assessing carbon dioxide removal through global and regional ocean alkalization under high and low emission pathways. *Earth System Dynamics*, Vol. 9, Issue 2, pp. 339–357, doi:10.5194/esd-9-339-2018

Lozán, J. L., et al., 2023. Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung – Climate Engineering in der Diskussion. Hamburg. <https://www.warnsignal-klima.de>

Renforth, P., et al., 2022. Using ikaite and other hydrated carbonate minerals to increase ocean alkalinity for carbon dioxide removal and environmental remediation. *Joule*, Vol. 6, Issue 12, pp. 2674–2679, doi:10.1016/j.joule.2022.11.001

Schmidt, J., 2022. Clamshells Face the Acid Test. *Hakai Magazine*, <https://hakaimagazine.com/news/clamshells-face-the-acid-test/>

Voosen, P., 2022. Ocean geoengineering scheme aces its first field test. *Science*, doi:10.1126/science.adg3427

Kapitel 8 Kohlendioxid verpressen tief unter dem Meer

CDRmare, 2023. Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund der deutschen Nordsee. Fact Sheet, Aktualisierte Version Juni 2023, <https://cdrmare.de/factsheets/>

CDRmare, 2023. Ein Tiefsee-Experiment zur Kohlendioxid-Speicherung in ozeanischer Kruste. Fact Sheet, Aktualisierte Version Juni 2023, <https://cdrmare.de/factsheets/>

CDRmare, 2023. Kohlendioxid-Speicherung in der Tiefsee: Ein Forschungsduo trotz dem Druck, *Science Stories*, <https://cdrmare.de/science-stories/>

Deutsche Energie-Agentur, 2022. Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien. <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/vergleich-der-big-5-klima-neutralitaetsszenarien/>

Deutscher Bundestag, 2018. Unterrichtung durch die Bundesregierung: Evaluierungsbericht der Bundesregierung über die Anwendung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes sowie die Erfahrungen zur CCS-Technologie, Drucksache 19/6891

Deutscher Bundestag, 2022. Unterrichtung durch die Bundesregierung: Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz, Drucksache 20/5145

Europäische Kommission, 2023. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on establishing a framework of measures for strengthening Europe's net-zero technology products manufacturing ecosystem (Net Zero Industry Act). Brüssel, 16 March 2023 COM(2023) 161 final 2023/0081 (COD)

Europäisches Parlament & EU-Rat, 2009. Richtlinie 2009/31/EG über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006, Amtsblatt der Europäischen Union, 5.6.2009

Global CCS Institute, 2022. Global Status of CCS 2022. <https://status22.globalccsinstitute.com/>

IEA, 2021. CCUS around the world, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world>

IEA, 2023. Carbon Capture, Utilisation and Storage. IEA, Paris, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>

IEA, 2023. CO₂ Transport and Storage. IEA, Paris, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/co2-transport-and-storage>

Kelemen, P., et al., 2019. An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations. *Frontiers in Climate*, 15 November 2019, doi:10.3389/fclim.2019.00009

Lozán, J. L., et al., 2023. Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung – Climate Engineering in der Diskussion. Hamburg. <https://www.warnsignal-klima.de>

Proelß, A. & L. Westmark, 2022: Seevölkerrechtliche Anforderungen der unterseeischen Speicherung von CO₂. *Klima und Recht*, 8/2022, S. 234–240

Proelß, A. & L. Westmark, 2023. Unterseeische Speicherung und Export von CO₂ in Deutschland: Rechtliche Hürden und Reformbedarfe – Teil I. *Klima und Recht*, 5/2023, S. 145–150

Ringrose, P. S., et al., 2013. The In Salah CO₂ storage project: lessons learned and knowledge transfer, *Energy Procedia*, Vol. 37, 2013, pp. 6226–6236, doi:10.1016/j.egypro.2013.06.551

Robertson, B. & M. Mousavian, 2022. The Carbon Capture Crux – Lessons Learned. Institute for Energy Economics and Financial Affairs, <https://ieefa.org>

Kapitel 9 Leitprinzipien und Regeln für einen Einsatz mariner CDR-Verfahren

Boettcher, M., et al., 2021. Navigating Potential Hype and Opportunity in Governing Marine Carbon Removal. *Frontiers in Climate*, 3:664456, doi:10.3389/fclim.2021.664456

CDRmare, 2023. Ein Bewertungsleitfaden für marine Kohlendioxid-Entnahme-Methoden. Fact Sheet, Aktualisierte Version Juni 2023, <https://cdrmare.de/factsheets/>

Czerski, H., 2023. Why we need to respect Earth's last great wilderness. *The Guardian*, 4 June 2023

Deutsche Emissionshandelsstelle, <https://www.dehst.de>

Erbguth, W. & S. Schlacke, 2012. *Umweltrecht*, 4. Auflage, Nomos Verlag, Baden-Baden

Europäische Kommission, 2022. Bericht der Europäischen Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über das Funktionieren des CO₂-Marktes im Jahr 2021 der EU gemäß Artikel 10 Absatz 5 und Artikel 21 Absatz 2 der Richtlinie 2003/87/EG (geändert durch Richtlinie 2009/29/EG und Richtlinie (EU) 2018/410). Brüssel, 14.12.2022, COM(2022) 516 final

Europäische Kommission, 2023. Carbon Removal Certification. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles/carbon-removal-certification_en

Europäisches Parlament, 2023. Reform des Emissionshandels-systems der EU. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20170213STO62208/reform-des-emissions-handelssystems-der-eu>

Lewandowski, D. & N. Pauly, 2023. Auktionierung (EU-ETS) Deutsche Versteigerungen von Emissionsberechtigungen. Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt, Berlin – Zweites Quartal 2023

Lozán, J. L., et al., 2023. Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung – Climate Engineering in der Diskussion. Hamburg

International Maritime Organization, 2023. Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter. London, <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/London-Convention-Protocol.aspx>

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926

Meyer-Ohlendorf, N. & D. Spasova, 2022. Carbon Dioxide Removals in EU Member States. Ecologic Institute, Berlin

Meyer-Ohlendorf, N., et al., 2023. Interim Report Certification of Carbon Dioxide Removals Evaluation of the Commission Proposal, Umweltbundesamt, Climate Change 13/2023

Proelß, A., 2020. Völkerrecht. Fünfter Abschnitt. Raum und Umwelt im Völkerrecht. De Gruyter, doi:10.1515/9783110633269-005

Proelß, A. & R. Steenkamp, 2021. Report on attribution of private conduct to States in relation to oceanbased NETS under the international law of the sea. OceanNets Deliverable, D2.7, Ocean NETs, Kiel, Germany, 25 pp. doi:10.3289/oceannets_d2.7

Proelß, A. & R. Steenkamp, 2022. Report on the Future Regulation of Ocean-based NETs. OceanNets Deliverable, D2.8, OceanNETs, Kiel, Germany, 22 pp. doi:10.3289/oceannets_d2.8

Rickels, W., et al., 2022. Procure, Bank, Release: Carbon Removal Certificate Reserves to Manage Carbon Prices on the Path to Net-Zero. *Energy Research & Social Science*, Vol. 94, 2022, 102858, doi:10.1016/j.erss.2022.102858

Schneuit, F., M. Boettcher & O. Geden, 2022. CO₂-Entnahme als integraler Baustein des Europäischen „Green Deal“. SWP-Aktuell, Nr. 37, Juni 2022, Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin

Schneuit, F., M. Boettcher & O. Geden, 2023. „Carbon Management“: Chancen und Risiken für ambitionierte Klimapolitik. SWP-Aktuell, Nr. 30, Mai 2023, Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin

Smith, S. M., et al., 2023. The State of Carbon Dioxide Removal – 1st Edition. <https://www.stateofcdr.org>

Umweltbundesamt, 2022. Genehmigung von Forschungsprojekten zu marinem Geo-Engineering. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/meere/genuehmigung-von-forschungsprojekten-zu-marinem-geo>

UNFCCC, 2023. Information note: Summary of the views submitted by Parties and observers on activities involving removals, Version 01.0. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb005-aa-a10v1.pdf>

Watson, J. E. M., et al., 2018. Protect the last of the wild. *Nature* 563, pp. 27–30 (2018). doi:10.1038/d41586-018-07183-6

Gesamt-Conclusio

Carbon Brief – clear on climate,ritisches Nachrichtenportal zur Klimaforschung, zu Klimapolitik und Energiethemen, www.carbonbrief.org

Copernicus Climate Change Service, 2023. July 2023, the warmest month in Earth's recent history. *Monthly Climate Bulletin*, Copernicus Climate Change Service/ECMWF, <https://climate.copernicus.eu/july-2023-warmest-month-earths-recent-history>

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926

World Weather Attribution Initiative, 2023. Extreme heat in North America, Europe and China in July 2023 made much more likely by climate change. 25 July 2023, <https://www.worldweatherattribution.org/extreme-heat-in-north-america-europe-and-china-in-july-2023-made-much-more-likely-by-climate-change/>

WMO, 2023. July 2023 is set to be the hottest month on record. Press release published 31 July 2023, <https://public.wmo.int/en/media/press-release/july-2023-set-be-hottest-month-record>

WMO, 2023. Exceptional heat and rain, wildfires and floods mark summer of extremes. Press release published 3 August 2023, <https://public.wmo.int/en/media/news/exceptional-heat-and-rain-wildfires-and-floods-mark-summer-of-extremes>

Zachariah, M., et al., 2023. Extreme heat in North America, Europe and China in July 2023 made much more likely by climate change. Grantham Institute for Climate Change, World Weather Attribution Initiative, doi:10.25561/105549

Mitwirkende

Zur Erstellung des „World Ocean Review“ 2024 haben viele Experten mit ihrem Fachwissen beigetragen. Beteiligt waren insbesondere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der dem Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM) angehörigen Einrichtungen.

Dr. Thorben Amann ist Geologe und forscht am Institut für Geologie der Universität Hamburg. Eines seiner wissenschaftlichen Schwerpunktthemen ist die beschleunigte Gesteinsverwitterung. Deren Potenziale, technische Machbarkeit und potenziellen Risiken untersucht er sowohl für Einsätze an Land (Forschungsmission „CDRterra“) als auch für eine Anwendung im Meer (Forschungsmission „CDRmare“), hier insbesondere für verschiedene Verfahren zur Alkalinitäts-erhöhung des Ozeans.

Prof. Dr. Christian Baatz forscht und lehrt zu den Themen Klimaethik, Nachhaltigkeit und globale Gerechtigkeit am Philosophischen Seminar der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Dort leitet der Umweltethiker in der Rolle eines Juniorprofessors auch die vom Bundesforschungsministerium geförderte Nachwuchsgruppe „Finanzierung von Anpassung an den Klimawandel im globalen Süden. Auf der Suche nach gerechtfertigten und praxistauglichen Verteilungsverfahren und -kriterien“. Seine Analysen zu den politischen und ethischen Grundsätzen einer gezielten Kohlendioxid-Entnahme fließen in gleich drei Forschungsprojekte mit ein: zum einen in die Entwicklung eines Bewertungsleitfadens für meeresbasierte CDR-Verfahren im Rahmen der deutschen Forschungsmission „CDRmare“; zum anderen in zwei Projekte zur Ethik von CDR-Verfahren an Land.

Dr. Miranda Böttcher forscht als Politikwissenschaftlerin im Expertencluster Klimapolitik der Stiftung Wissenschaft und Politik in Berlin. Sie beobachtet umwelt- und klimapolitische Prozesse auf nationaler und internationaler Ebene und geht dabei der Frage nach, mithilfe welcher Strategien und Regularien meeresbasierte CDR-Verfahren künftig auf ökologisch und sozialverträgliche Weise eingesetzt werden könnten. Sie gilt als eine der weltweit führenden Expertinnen für die politisch-institutionelle Realisierbarkeit von Kohlendioxid-Entnahmeverfahren, ist Mitglied in der GESAMP-Arbeitsgruppe „Ocean Interventions for Climate Mitigation“, welche unter anderem auch die Akteure des Londoner Protokolls berät, und entwickelt aktuell gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen in der deutschen Forschungsmission „CDRmare“ einen Bewertungsleitfaden für meeresbasierte CDR-Verfahren. Er soll Verantwortlichen in Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft als Instrument dienen, mit dem diese geplante CDR-Projekte auf transparente und für jedermann nachvollziehbare Weise bewerten und im Anschluss faktenbasiert darüber entscheiden können.

Dr. Oliver Geden ist Sozialwissenschaftler und leitet das Expertencluster Klimapolitik der Stiftung Wirtschaft und Politik in Berlin. Seine Forschungsschwerpunkte sind die europäische und internationale Politik zu Energie-, Klima- und Umweltthemen, mit einem aktuellen Fokus auf die politisch-gesellschaftlichen Entwicklungen zum Thema Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmo-

sphäre. Seine Expertise und Arbeitsergebnisse fließen sowohl in die deutsche Forschungsmission zu CDR-Verfahren an Land ein („CDRterra“) als auch in die Forschungsmission zu meeresbasierten CDR-Methoden („CDRmare“). Als Leitautor der Arbeitsgruppe III des Weltklimarates IPCC hat Oliver Geden gemeinsam mit anderen Autoren unter anderem den internationalen Wissensstand zum Thema Kohlendioxid-Entnahmeverfahren für den 6. IPCC-Sachstandsbericht zusammengefasst. Außerdem trug er als Kapitel-Koordinator maßgeblich zum Synthesebericht des 6. Weltklimaberichtes bei. Im Juli 2023 wurde Oliver Geden zum Vize-Vorsitzenden der Arbeitsgruppe III (Minderung des Klimawandels) gewählt und in den IPCC-Vorstand berufen. In dieser Rolle wird er die Berichtserstellung innerhalb des 7. Begutachtungszeitraumes begleiten und unterstützen.

Dr. David P. Keller arbeitet als leitender Wissenschaftler in der Abteilung Marine Biogeochemische Modellierung am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören die Bewertung von Kohlendioxid-Entnahmeverfahren (CDR) für den Klimaschutz sowie das Verständnis von Rückkopplungen zwischen biogeochemischen Kreisläufen und dem Klima. Außerdem untersucht er die Wechselwirkungen zwischen marinen Ökosystemen und biogeochemischen Kreisläufen. Für einen Großteil seiner wissenschaftlichen Studien verwendet David Keller Erdsystemmodelle. Komplexe Forschungsthemen geht er jedoch auch gern in enger Zusammenarbeit mit Forschenden aus vielen anderen Disziplinen an. Aktuell leitet David Keller das von der Europäischen Union finanzierte „Horizon2020“-Projekt „OceanNETs“, in dem meeresbasierte CDR-Ansätze untersucht werden. Gleichzeitig koordiniert er als einer von vier leitenden Wissenschaftlern das internationale Carbon Dioxide Removal Model Intercomparison Project und arbeitet in fünf weiteren Forschungsprojekten zu Kohlendioxid-Entnahmeverfahren in führender Rolle mit. Seine CDR-Expertise floss auch in den 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates mit ein. Als sogenannter beitragender Autor (englisch: contributing author) war David Keller nämlich sowohl am Teilbericht der Arbeitsgruppe I als auch am Bericht der Arbeitsgruppe III beteiligt.

Prof. Dr. Achim Kopf leitet das Fachgebiet Geotechnik am Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) an der Universität Bremen und erforscht als Geologe vor allem die Beschaffenheit und Eigenschaften des Tiefseeuntergrundes. Aktuell leitet er im Rahmen der Forschungsmission „CDRmare“ die Forschungsarbeiten zur Kohlendioxid-speicherung in der oberen Ozeankruste. Das Ziel dieser Untersuchungen ist, eine Tiefseeprobebohrung in die obere Basaltkruste vorzunehmen, um im experimentellen Maßstab Kohlendioxid oder kohlendioxidhaltiges Wasser in das reaktive Gestein einzuleiten. Mithilfe eines engmaschigen Sen-

sorennetzwerks am Meeresboden und in Bohrlöchern soll dann beobachtet werden, wie sich das Kohlendioxid in der Basaltkruste verteilt und wie schnell es mineralisiert.

Dr. Christine Merk ist stellvertretende Direktorin des Forschungszentrums „Global Commons und Klimapolitik“ am Institut für Weltwirtschaft in Kiel. Eine ihrer Hauptforschungsinteressen sind individuelle Abwägungsentscheidungen zwischen der Reduktion von Emissionen, der Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre und dem Strahlungsmanagement. Sie nutzt verhaltensökonomische Experimente und Befragungen zur Untersuchung der Wahrnehmungen und Reaktionen von Laien und Experten. Derzeit ist sie an zwei Forschungsprojekten beteiligt, die sich mit der Akzeptanz meeresbasierter CDR-Verfahren befassen: Sie leitet das Arbeitspaket zur öffentlichen Wahrnehmung mariner CDR-Verfahren im „Horizon2020“-Konsortium „OceanNETs“ und trägt zu einem deutschen Forschungsprojekt über die Wiederansiedlung von Seegraswiesen bei. Parallel dazu arbeitet sie als Expertin in der GESAMP-Arbeitsgruppe „Ocean Interventions for Climate Change Mitigation“ mit und ist im Rahmen der Forschungsmission „CDRmare“ an der Erstellung eines Bewertungsleitfadens für meeresbasierte CDR-Projekte und -Verfahren beteiligt. Außerdem untersucht sie gemeinsam mit Partnern am Norwegischen Forschungszentrum (NORCE) die Akzeptanz von grenzüberschreitendem CO₂-Transport zur Speicherung in Deutschland und Norwegen.

Dr. Sebastian Milinski hat im Promotionsfach Erdsystemwissenschaften an der Universität Hamburg promoviert und arbeitet als Wissenschaftler am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) in Bonn. Als sogenannter Kapitel-Wissenschaftler hat er das Autorenteam der Arbeitsgruppe I des 6. Weltklimaberichtes (Naturwissenschaftliche Grundlagen) unterstützt und geholfen, den aktuellen Wissensstand zu Klimavorhersagen (Berichtskapitel 4) zusammenzutragen und zu bewerten. Dabei ging es insbesondere auch um die Fragen, wann die globale Erwärmung die 1,5-Grad-Marke überschreiten wird und welche Entwicklungspfade den Klimawandel in welchem Ausmaß vorantreiben werden.

Dr. Katja Mintenbeck ist Meeresbiologin und arbeitete bis zum Sommer 2023 als wissenschaftliche Direktorin der Technischen Unterstützungseinheit der Arbeitsgruppe II des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). In dieser Funktion trug sie unter anderem die Verantwortung für den IPCC-Sonderbericht „Ozean und Kryosphäre im Klimawandel“, der im September 2019 veröffentlicht wurde, sowie für den Band II des 6. IPCC-Sachstandsberichts (Klimafolgen, Anpassung und Verwundbarkeit), der im Februar 2022 erschienen ist. Außerdem

unterstützte sie die Arbeiten am Synthesebericht des 6. Begutachtungszeitraums. Vor ihrer Arbeit für den Weltklimarat forschte Katja Mintenbeck als Meeresbiologin in der Sektion Integrative Ökophysiologie am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Im Mittelpunkt ihrer Arbeit standen die Ökologie antarktischer mariner Lebensgemeinschaften sowie die spezielle Frage, wie empfindlich antarktische Fische auf Störungen und Umweltveränderungen reagieren, insbesondere auf die zunehmende Ozeanversauerung.

Prof. Dr. Andreas Oschlies ist Ozeanograf und leitet die Abteilung Biogeochemische Modellierung am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. Seine Forschungsinteressen umfassen die physikalischen, biogeochemischen und ökologischen Prozesse der Kohlenstoffaufnahme durch den Ozean und mögliche Veränderungen derer infolge des Klimawandels. Gemeinsam mit seinem Team entwickelt er biogeochemische Modelle, um beispielsweise Veränderungen des Sauerstoffgehaltes der Meere und ihre ökologischen Auswirkungen zu untersuchen. Bereits seit Anfang der 2000er-Jahre beschäftigt er sich mit der Bewertung und Erforschung von Climate-Engineering-Methoden und hat hierzu von 2013 bis 2020 ein interdisziplinäres Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft geleitet. Seit dem Jahr 2021 leitet Andreas Oschlies als Co-Sprecher die deutsche Forschungsmission „Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung“ („CDRmare“). In dieser erforschen rund 200 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 22 Partnerinstitutionen disziplinenübergreifend verschiedene Methoden der marinen Kohlendioxid-Entnahme, aber auch der -speicherung.

Prof. Dr. Julia Pongratz ist Inhaberin des Lehrstuhls für Physische Geographie und Landnutzungssysteme an der Ludwig-Maximilians-Universität München und leitet als Direktorin das Department für Geographie. Ihre Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf die wechselseitigen Einflüsse von Mensch, Vegetation und Klima. Dabei untersucht die Expertin für Vegetationsmodellierung insbesondere landnutzungsbedingte Veränderungen der Wasser-, Energie- und Kohlenstoffflüsse im Klimasystem der Erde. Sie erforscht zum Beispiel, auf welche Weise der Mensch durch die Wiederaufforstung von Wäldern die Kohlendioxidaufnahme der Landvegetation steigern könnte und welche Folgen großflächige Waldanpflanzungen für das lokale und überregionale Klima hätten. Als Expertin für Landnutzungsänderungen und deren Emissionen schrieb sie auf Einladung der Arbeitsgruppen I und III am 6. Sachstandsbericht des Weltklimarates mit. Außerdem engagiert sie sich für das prestigeträchtige internationale Global Carbon Project und leitet als Sprecherin das BMBF-Forschungsprogramm „CDRterra“. In dieser untersuchen Fachleu-

te aus verschiedenen deutschen Forschungsinstitutionen das Kohlendioxid-Entnahmepotenzial verschiedener landbasierter CDR-Verfahren. Sie suchen beispielsweise Antworten auf die Frage, in welchem Umfang solche Verfahren in Deutschland eingesetzt werden könnten, wenn sie helfen sollen, das Ziel der Treibhausneutralität zu erreichen, ohne dabei andere Nachhaltigkeitsziele zu gefährden.

Prof. Dr. Alexander Proelß ist Rechtswissenschaftler und lehrt an der juristischen Fakultät der Universität Hamburg internationales Seerecht und Umweltrecht, Völkerrecht und Öffentliches Recht. Zu seinen Forschungsschwerpunkten zählen neben Aspekten des allgemeinen Völker- und Europarechts vor allem das internationale See- und Umweltrecht, das Außenverfassungsrecht sowie ausgewählte Bereiche des nationalen Umweltrechts. Alexander Proelß ist an zahlreichen nationalen wie internationalen Forschungsprojekten beteiligt. Aktuell bringt er seine juristische Expertise unter anderem in die deutsche Forschungsmission „CDRmare“ ein. Hier untersucht er gemeinsam mit seinem Team, unter welchen rechtlichen Rahmenbedingungen ein Einsatz meeresbasierter Kohlendioxid-Entnahmeverfahren möglich wäre und wie entsprechende Projekte international und national so reguliert werden könnten, dass sie mit dem Umwelt- und Meeresschutz vereinbar wären.

Prof. Dr. Gregor Rehder ist Meereschemiker, forscht als amtierender Sektionsleiter der Meereschemie am Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und lehrt an der Universität Rostock. Am IOW leitet er auch die Arbeitsgruppe „Biogeochemie umweltrelevanter Gase“. In dieser untersuchen Gregor Rehder und sein Team beispielsweise wichtige Schlüsselprozesse im Meer und Küstenbereich, bei denen Treibhaus- und Spurengase entstehen, die Einfluss auf das Klima und Stoffkreisläufe nehmen. Außerdem entwickeln die Wissenschaftler neue Technologien für eine effiziente Umweltüberwachung. Seit dem Jahr 2021 steht Gregor Rehder der Forschungsmission „CDRmare“ als Co-Sprecher vor und koordiniert gemeinsam mit Prof. Andreas Oschlies die Forschungsarbeiten der sechs beteiligten Konsortien.

Prof. Dr. Wilfried Rickels ist Wirtschaftswissenschaftler und leitet als Direktor das Forschungszentrum „Global Commons und Klimapolitik“ am Institut für Weltwirtschaft in Kiel. Er und sein Team untersuchen, wie die nachhaltige Nutzung des Ozeans insbesondere im Kontext der globalen Nachhaltigkeitsziele gemessen werden kann und welche Rolle und Bedeutung Kohlendioxid-Entnahmeverfahren für den Klimaschutz haben. Für diese Forschungsfragen hat die Entwicklung von Indikatoren und die Anwendung von integrierten Assessment-Modellen eine besondere Bedeutung. Beides treibt Wilfried Rickels in verschiedenen

Forschungsprojekten voran. Seit Januar 2023 hat er zudem eine Stiftungsprofessur zur Erforschung ökonomischer Aspekte der atmosphärischen Kohlendioxid-Entnahme an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel inne.

Prof. Dr. Ulf Riebesell forscht als Meeresbiologe und Experte für biologische Ozeanografie am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. Der Planktonexperte gehörte zu den ersten Wissenschaftlern der Welt, die die Auswirkungen steigender Kohlendioxidkonzentrationen auf marine Organismen untersucht haben. In der Öffentlichkeit ist er vor allem für die großen Mesokosmen-Experimente zur Ozeanversauerung in verschiedenen Meeresgebieten bekannt. Seit dem Jahr 2015 betreibt Ulf Riebesell Forschungsarbeiten zu künstlichem Auftrieb, zunächst mit Förderung des Europäischen Forschungsrates („Ocean artUp“), seit 2021 im Rahmen der deutschen Forschungsmission „CDRmare“ („Test-ArtUp“). Er beteiligt sich außerdem an Studien zu den Folgen einer gezielten Alkalinitätssteigerung des Ozeans („RETAKE“ und „OCEAN ALK-ALIGN“) und betreut Untersuchungen im Rahmen des EU-Forschungsprojektes „OceanNETs“.

Dr. Michael Sswat forscht als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Biologische Ozeanografie am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. In dieser Funktion koordiniert er unter anderem als Projektmanager die Forschungsarbeiten im „Test-ArtUp“-Konsortium der deutschen Forschungsmission „CDRmare“ sowie des Helmholtz-European-Partnering-Projekts „Ocean-CDR“. In beiden untersuchen Fachleute aus verschiedenen Forschungsinstitutionen, ob sich Technologien für künstlichen Auftrieb sinnvoll zum Zweck der Kohlendioxid-Entnahme einsetzen lassen, inwiefern sie technisch optimiert werden müssten, welche Umweltrisiken und ökologischen Nebeneffekte mit ihrem Einsatz verbunden wären und wie mögliche Einsätze finanziert und reguliert werden könnten. Nebenher ist er als Forschungstaucher, Fotograf und freiberuflicher Meeresbiologe tätig.

Dr. Lukas Tank hat an der Humboldt-Universität in Berlin zu ethischen Fragen der Bepreisung von Kohlendioxidemissionen promoviert und forscht seit dem Jahr 2021 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Nachwuchsgruppe „Klimaethik und Globale Gerechtigkeit“, die am Philosophischen Seminar der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel beheimatet ist. Der Ethiker engagiert sich inhaltlich nicht nur in der deutschen Forschungsmission „CDRmare“, sondern hält zu Fragen der Klimaethik auch öffentliche Vorträge oder beteiligt sich an Ausstellungen und Diskussionsforen. Gemeinsam mit Christian Baatz und seiner Kollegin Frederike Neuber hat Lukas Tank die in Kapitel 9 erläuterten Thesen zur Ethik von CDR-Verfahren aufgestellt.

Prof. Dr. Klaus Wallmann ist Geowissenschaftler, leitet die Forschungsabteilung Marine Geosysteme am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und lehrt Grundlagen der marinen Biogeochemie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen den Stoffumsatz an kalten Quellen und Schlammvulkanen am Meeresboden, die Entstehung von Gashydraten, den mikrobiellen Abbau organischer Substanzen in Oberflächensedimenten und die Rückführung von Nährstoffen aus den Sedimenten in den Ozean. Darüber hinaus gilt er als Deutschlands führender Experte für die Einlagerung von Kohlendioxid in Sandsteinformationen unter dem Meer. Von 2011 bis 2015 leitete er bereits ein EU-Forschungsprojekt zu den Folgen der Kohlendioxideinlagerung im Meeresboden. Aktuell koordiniert er im Rahmen der Forschungsmission „CDRmare“ das Konsortium GEOSTOR, in welchem Forschende untersuchen, mit welchen Methoden die Kohlendioxid-speicherung im geologischen Untergrund der deutschen Nordsee unter Einhaltung des Vorsorgeprinzips möglich wäre.

Lennart Westmark hat Jura in Hamburg studiert und arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Alexander Proelß an der Universität Hamburg. Im Mittelpunkt seiner Forschung stehen aktuell die rechtlichen Rahmenbedingungen der Kohlendioxid-speicherung in Sandsteinformationen tief unter der deutschen Nordsee. Lennart Westmark analysiert im Rahmen der Forschungsmission „CDRmare“ die internationale, europäische und deutsche Gesetzgebung zur Kohlendioxideinlagerung unter dem Meer und leitet daraus Empfehlungen für deren praktische Umsetzung ab. In seiner Promotion beschäftigt er sich mit der Rolle der Klimaforschung in der Gesetzgebung.

Mirco Wölfelschneider hat Biologie und aquatische Ökologie studiert und forscht als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe „Mangrovenökologie“ am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung in Bremen. Für seine Doktorarbeit hat er mehrere Monate in Brasilien verbracht, um dort den Austausch von organischem Material zwischen Mangroven und Küstengewässern zu untersuchen. Parallel dazu koordiniert Mirco Wölfelschneider als Projektmanager des „CDRmare“-Forschungsverbundes für vegetationsreiche Küstenökosysteme („sea4soCiety“) die vielen natur- und sozialwissenschaftlichen Untersuchungen zu Seegraswiesen, Salzmarschen, Tang- und Mangrovenwäldern und unterstützt dessen wissenschaftlichen Koordinator Prof. Dr. Martin Zimmer.

Prof. Dr. Martin Zimmer ist Biologe, leitet die Arbeitsgruppe „Mangrovenökologie“ am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung in Bremen, lehrt an der Universität Bremen und ist Mitglied der Mangroven-Expertengruppe der Weltnaturschutzunion

(IUCN). Er verbringt mehrere Wochen pro Jahr auf Expeditionen in die von Mangrovenwäldern bewachsenen Küstenregionen der Tropen. Dort untersuchen er und sein Team unter anderem den Austausch von Material und Organismen zwischen benachbarten Küstenökosystemen. Sie analysieren den Kohlenstoffgehalt im Untergrund sowie Zersetzungsprozesse des organischen Materials und erforschen Wechselwirkungen zwischen Organismen in den artreichen Mangrovenwäldern – und wie sich diese auf Ökosystemprozesse und -leistungen auswirken. Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt sind die menschengemachten Umweltveränderungen und ihre ökologischen Folgen für Mangrovenwälder. Seit dem Jahr 2021 koordiniert Martin Zimmer im Rahmen der deutschen Forschungsmission „CDRmare“ den Forschungsverbund für vegetationsreiche Küstenökosysteme „sea4soCiety“. In diesem interdisziplinären Verbund untersuchen Forschende aus verschiedenen Institutionen, welche Rolle Seegraswiesen, Salzmarschen, Mangroven- und Tangwälder im Kohlenstoffkreislauf des Meeres spielen und wie sich ihre Kohlendioxidaufnahme auf umwelt- und sozialverträgliche Weise verstärken ließe.

Unser Dank gilt außerdem dem Team der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt), welches uns mit Rat und Expertise zur Seite stand, als es darum ging, die Details des Europäischen Emissionshandels sowie dessen bevorstehende Reform zu erläutern.

Index

- Gefettete Seitenzahlen verweisen auf diejenigen Textstellen, die für das Verständnis besonders wichtig sind.
- 1,5-Grad-Ziel 14 ff., 42 ff., 79
 2-Grad-Grenze 42 ff.
 2. Emissionshandelssystem (EU-ETS 2) 200
 6. Weltklimabericht 12 ff.
- A**
 Abkommen über den Schutz und die nachhaltige Nutzung der marinen Biodiversität in Gebieten jenseits staatlicher Hoheitsgewalt (Biodiversity Beyond National Jurisdiction, BBNJ) 192 ff.
 Abscheidungsanlagen 153 ff.
Aedes-Stechmücke 28
 Aerosole 34 ff.
 Afrika 28, 78, 124
 agroforstwirtschaftliche Landnutzung 81
 Alaska 136, 199
 Aletsch-Gletscher 204
 Algen 23 ff., 59
 Algenblüte 23 ff., 90
 Algenfarm 116 f.
 Algenwachstum 122 ff.
 Algenzellen 122 ff.
 Algerien 154
 Alkalinität 127, **136 ff.**
 Alkalinitätszerhöhung **136 ff.**, 196
 Alkalinitätsgrad 136 ff.
 alkalische Lösung 141
 Amazonas-Regenwald 50, 71 ff.
 Amerika 124
 Ammonium 160
 Ankerit 170
 Annual Greenhouse Gas Index (AGGI) 35
 anorganisch-biologische Kohlenstoffpumpe **65 ff.**
 Antarktis 17
 Antarktischer Eisschild 17
 Antarktischer Krill 66
 Aoshan-Bucht 132
 Apple 112
- Aquakultur 25
 Aquifer 170 ff.
 Aragonit 59
 Argentinien 24
 Arizona 25
 Arktis 17
 Arktischer Ozean 59
 Artenvielfalt 70 ff., 102 ff.
 artificial Upwelling 123 ff.
 Artikel-6.4-Mechanismus 191
 Atlantischer Kabeljau 101
 Atmosphäre 13 ff.
 Aufforstung 46, 78 ff.
 Auftriebsgebiete 124
 Auftriebspumpen 124 ff.
 Auftriebsschlauch 127
 Auftriebszone 56
 Ausfällung 141
 Australien 107, 139, 160
 Azoren 172
- B**
 Bahamas 100
 Barentssee 164
 Barrierschicht 154
 Barrow Island 160
 Basaltgestein 46, 141 ff., 152 ff.
 Battersea Power Station 41
 Belgien 160 ff.
 Berggletscher 16 ff.
 Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS), Bioenergiegewinnung mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -einlagerung) 46 ff., **83 ff.**, 116, 152 ff., 201
 Bikarbonat 163 ff.
 Biodiversitätskonvention (Convention on Biological Diversity, CBD) 148
 Bioenergiepflanzen 78 ff.
 biogene Kohlendioxidquellen 202
 Biokohle 81 ff.
 biologische Kohlenstoffpumpe 60 ff., 116, **122 ff.**
- biologischer Kalender 23 f.
 Biomasse 97 ff.
 Biotreibstoff 83
 Blattfläche 71
 blauer Wasserstoff 153 ff.
 Blue Carbon **96 ff.**
 Blue-Carbon-Emissionszertifikate 112 f.
 Blue Economy 90
 Bodenkohlenstoff **70 ff.**
 Bodenverbesserer 83
 BP 154
 Brandkalk 141
 Brandschutzmanagement 81
 Brasilien 24, 50
 Braunalgen 98 ff.
 Brevik 153
 Brucit 141
 Buttermuscheln 138
- C**
 Cambridge 142
 CarbFix-Projekt 170 ff.
 Carbon Capture and Storage (CCS, Kohlendioxidabscheidung und -speicherung) 45 ff., 152 ff., 182 ff.
 Carbon Capture and Utilisation (CCU, Kohlendioxidabscheidung und -verwertung) 45 ff., 158 ff.
 Carbon Dioxide Removal (CDR, Kohlendioxid-Entnahme) 34 ff., 76 ff., 182 ff.
 Carbon Engineering 157
 Carbon Farming 202
 Carbon Leakage 200
 Cascade Mountain 141
 Cascadia-Becken 174
 CDRmare 91, 131, 146
 Channel Islands of California 110
 chemische Absorption 152 f.
 Chemosynthese 55
 Chesapeake Bay 109
 Chevron Australia 160
 China 26, 75, 116 f., 160
- Cholera 28
 Chrom 146
 Climate Action Tracker 47
 Climate Engineering 191
 CO₂-Netto-Null 202
 Coccolithophoriden 122
 Colorado 77
 Colorado River 25
 Conservation International 112
 Costa Rica 96
 Cyanobakterien 123
- D**
 DAC-Anlage 157
 Dampfreformierung 154
 Dänemark 160 ff.
 Darwin 165
 dauerhaft eingelagert 105
 Deckschicht 154
 Dekarbonisierung 186
 Demokratische Republik Timor-Leste 165
 Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) 200
 Deutsche Energie-Agentur (dena) 161
 deutsche Küste 105
 Deutschland 128, 145, 161, 197
 Diatomeen 122
 Dinoflagellaten 122
 Direct Air Capture (DAC, direkte Kohlendioxid-Entnahme) 86, 152 ff.
 Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS, direkte Kohlendioxid-Entnahme mit anschließender Speicherung) 46 ff., 86, 152 ff.
 Direct Air Carbon Capture and Utilisation (DACCU, direkte Kohlendioxid-Entnahme und Weiterverarbeitung) 86
 direkte und indirekte Emissionen 36
 Distickstoffmonoxid 34 ff.
 Dolomit 170
- Downstream-Emissionshandel 200
 Düngeeffekt **76**
 Düngemittel 153 ff.
 Dürre 25 ff.
- E**
 East Coast 160
 Eisen 122
 Eisendüngung 149
 Eisenstaub 90
 elektrochemische Verfahren **142 ff.**
 Elektrolyse 154
Emiliania huxleyi 122
 Emissionsbilanzierungs-vorschrift 113
 Emissionsgutschriften 112 f.
 Emissionshandel **112 ff.**
 Emissionszertifikate 85, 112 f.
 Enhanced Oil Recovery 158
 enterische Fermentation 78 ff.
 Enzyme 123
 Equinor 162 f.
 Erderwärmung 24 ff.
 Erdmantel 137
 Erdsystem 55 ff.
 Ernährungssicherheit 79
 Ethylen 160
 EU-Forschungsprojekt Ocean artUp 128
Euphausia superba 66
 Europäische Energiebörse (European Energy Exchange, EEX) 200
 Europäischer Emissionshandel (European Union Emissions Trading System, EU-ETS) **112 ff.**, **189 ff.**
 Europäische Union 160
 Extremereignisse 14 ff.
 Exxon 160
- F**
 Ferrum 169
 Feuchtgebiete 70 ff.
 Finnland 75, 160 ff.
 Florida 108
- Flügelnschnecken 59, 108 ff., 123
 Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) 34
 Foraminiferen 61, 108
 Formationswasser 163 ff.
 fossile Energieträger 35 ff.
 fossile Kohlendioxidquellen 202
 Fotosynthese 55 ff., 76 ff., 96 ff., 122 ff.
 Frankreich 160
 Fujian 117
- G**
 Gasaustausch 55 ff.
 Gelbes Meer 132
 Gemeinsame Sozioökonomische Entwicklungspfade (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 42
 geochemische CDR-Verfahren 86
 Geoengineering 191
 Geofon 167
 geologische Speicher 156 ff.
 gepulster Auftrieb 128
 GESAMP-Arbeitsgruppe für meeresbasierte Verfahren zur Minderung des Klimawandels (GESAMP Working Group 41 on Ocean Interventions for Climate Change Mitigation) 196
 Gesteinsmehl 141 ff.
 Gesteinsverwitterung 60, 86, 136 ff.
 glasfaserbasiertes Überwachungssystem 167
 Gletschereis 16 ff.
 Global Carbon Project 74
 globale Oberflächentemperatur 13 ff.
 globaler Meeresspiegel 16 ff.
 Gorgon-CCS-Projekt 160
 Gran Canaria 130, 148
 Graslandschaften 70 ff.
- grauer Wasserstoff 154
 Great Barrier Reef 22, 139
 Greenwashing 112, 161
 Grönland 17
 Großalgen **116 ff.**, 196
 Großalgenzucht 117
 Großbritannien 160
 Großer Fetzenfisch 102
 Grünalgen 116 f.
 Grundnetzfisherei 103
 Grundwasser 17 ff.
 grüner Wasserstoff 141 ff., 154
 Gülle 70
 Güllewirtschaft 83
- H**
 Hawaii 38
 Hitzestress 27
 Hitzetoleranz-Grenze 26 f.
 Hitzewelle 14 ff.
 Hochwasserrisiko 24 ff.
 Houston 165
 Humboldtstrom 130
 Hurrikan 19
 Hydrogenkarbonat 57 ff., 136 ff.
 HyNet 160
 Hyperthermie 27
- I**
 Ikaite 146
 Indien 28, 169
 indirekte Emissionen 36
 Indonesien 72
 Infektionskrankheiten 28
 In Salah-CCS-Projekt 154
 integrierte Assessment-Modelle (Integrated Assessment Models, IAMs) 49
 Internationale Energieagentur (International Energy Agency, IEA) 152 ff.
 Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) 175
 Internationale Seeschiffahrts-Organisation (International
- Maritime Organization, IMO) 195
 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat) **12 ff.**, 34 ff., 85, 103
 Island 46, 170 ff.
- J**
 Jamaika 175
 Japan 75, 160
- K**
 Kalifornien 110, 124, 142
 Kalk 59 ff., 108
 Kalkalgen 108 ff., 122
 Kalkbildung 137 ff.
 Kalkstein 136 ff., **137**
 Kalzit 59, 170
 Kalzium 86
 Kalziumhydroxid 141
 Kalziumkarbonat 108, 137 ff.
 Kalziumoxid 141, 153
 Kammerlinge 59, 108 ff.
 Kanada 14 ff., 75, 157 ff.
 Karbonat 57 ff., 136 ff., 170 ff.
 Karbonatgestein 55 ff.
 Karbonatminerale 86
 Katar 160
 Kelpwälder 96 ff.
 Kieselalgen 122, 137 ff.
 Kingston 175
 Klima-Gerechtigkeitsproblem **30 f.**
 Klima-Indikatoren der WMO **19**
 Klimasensitivität 40 f.
 Klimasystem der Erde 13 ff.
 Klima- und Umweltethik 185 ff.
 Klimawandel **12 ff.**, 34 ff.
 Klimawandelanpassung 33
 Klimawirksamkeit 38 ff.
 Klimaziele **47**
 Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) 45 ff., 152 ff., 182 ff.

- Kohlendioxidabscheidung und -verwertung (Carbon Capture and Utilisation, CCU) 45 ff., 158 ff.
- Kohlendioxid-Äquivalente 36 ff.
- Kohlendioxidaufnahme 70 ff., 122 ff., 136 ff.
- Kohlendioxid-Budget 42 ff.
- Kohlendioxidemissionen 72 ff.
- Kohlendioxid-Entnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) 34 ff., 76 ff., 182 ff.
- Kohlendioxid-Freisetzung 74 ff.
- Kohlendioxidleckage 166
- Kohlendioxidneutralität 43 ff., 202
- Kohlendioxid-Partialdruck 55 ff.
- Kohlendioxidquelle 71 ff., 202
- Kohlendioxidspeicher **152 ff.**
- Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) 177 ff.
- Kohlensäure 57 ff., 86
- Kohlensäure-Kettenreaktion 57 ff.
- Kohlenstoffaufnahme 96 ff.
- Kohlenstoffaustausch **53 ff.**
- Kohlenstoffbilanz **56 ff.**
- Kohlenstoffbindung 122 ff.
- Kohlenstoff-Einlagerungsrate 107
- Kohlenstoffflüsse 56 ff.
- Kohlenstoffkreislauf **52 ff.**, 70 ff., 96 ff.
- Kohlenstoffpulver 155
- Kohlenstoffpumpe 60 ff.
- Kohlenstoffquelle 55 ff.
- Kohlenstoffsänke 55 ff., 71 ff., 100 ff.
- Kohlenstoff-Sequestrierung 74 ff.
- Kohlenstoffspeicher 53 ff., 70 ff., 136 ff.
- Kohlenstoff-Überkonsum 130
- Kohlenstoffverbindungen 54 ff.
- Kolumbien 24, 112
- Kondensstreifen 187
- Konzentrationsgleichgewicht 57 ff.
- Kooperationsprinzip 192 ff.
- Korallen 59, 108 ff., 137
- Korallenbleiche 22 f.
- Körper-Kerntemperatur 27
- Kotballen 123 ff.
- Kreidefelsen 55, 136
- Krill 123
- Kühlgrenztemperatur 26
- künstlicher Auftrieb **122 ff.**, 196
- Küstenbebauung 103
- Küstenmetropolen 28 ff.
- Küstenschutz 100 ff.
- L**
- Lachgas 34 ff., 70 ff., 100 ff.
- Lachsfarm 129
- Lake Powell 25
- landbasierte CDR-Verfahren **77 ff.**
- Landnutzungsänderungen 35 ff., 70 ff.
- Landnutzungsemissionen 202
- Landvegetation 70 ff.
- Landwirtschaft 70 ff.
- La Niña 22
- Lava 141
- Lebensmittelproduktion 79 ff.
- Leckagerisiko 154
- Leopoldina 86
- Leukoma staminea* 138
- Lewis and Harris 99
- lokale Klimaveränderungen 71 ff.
- London 41
- Londoner Konvention 90, 148, 194 ff.
- Londoner Protokoll 90, 148, 176 ff., 194 ff.
- Los Angeles 32
- Löschkalk 141
- Luftpulser 168
- M**
- Macrocystis pyrifera* 110
- mafisch 169
- Magnesium 86, 169
- Magnesiumhydroxid 141
- Magnesiumoxid 141
- Makroalgen 62
- Malaysia 160
- Mangrovenwälder 38 ff., 62, **96 ff.**
- Manteltiere 65
- Maria (Wirbelsturm) 96
- Marine Cloud Brightening 196
- marine Hitzewellen 14 ff.
- marines Geoengineering 195
- Massachusetts 142
- Massachusetts Institute of Technology 142
- Massenaussterben **24**
- Mauna-Loa-Observatorium 38
- Mauretanien 124
- Mecklenburg-Vorpommern 178
- Meereschemie 134 ff.
- Meeresdüngung 196
- Meeresnutzungspläne 131
- Meeresraumplan 169
- Meeresschnee 63
- Meeresspiegelanstieg 16 ff.
- Meeresvereinnahmung 185
- Meeresverschmutzung 103
- Meereszirkulation 62
- Meerwasserentsalzungsanlage 142
- Mesokosmen **146**
- Methan 34 ff., 70 ff., 100 ff.
- Methanpyrolyse 154
- Mikronährstoffe 122
- Mineral 60 ff.
- Mineralien 136 ff.
- Mineralisierungsprozesse 137
- mitigation deterrence 189
- Mittelmeerraum 26
- Mittelozeanische Rücken 163
- Monfort Beef 77
- Moore 38 ff., 70 ff.
- Müllverbrennung 153
- Muschelgärten 138
- Muscheln 59, 108 ff., 137
- Muschelschalen-Trick 138
- N**
- Nagaoka 168
- Nährstoffe 122 ff.
- Nahrungsnetz 63
- Namibia 124
- nationale Emissionseinsparungsziele (Nationally Determined Contributions, NDCs) 47
- nationale Klima-Langfriststrategie 47
- Natriumhydroxid 141
- Naturkatastrophen 24
- natürliche Klimallösungen (Natural Climate Solutions, NCS) **70 ff.**
- natürlicher Klimaschutz 202
- negative (Treibhausgas-)Emissionen 202
- Netto-(Kohlendioxid-)Entnahme 202
- Netto-Null der Treibhausgasemissionen 43 ff.
- Netto-Null-Szenario 156
- Nickel 146
- Niederlande 165 ff.
- Niedersachsen 178
- Nitrat 122
- Norcem 153
- Nordafrika 160
- Nordamerika 138
- Nordatlantik 56, 123
- Nordpazifik 15
- Nordsee 146, 164 ff.
- Nordseeküste 105
- Northern-Lights-Projekt 153 ff.
- Northton 99
- Norwegen 75, 129, 153 ff.
- O**
- Oberflächenwasser 122 ff.
- Ocean Alkalinity Enhancement (marine Alkalinitätserhöhung) 137
- Ocean Grabbing 185
- Ökosystemdesign 105
- Ökosysteme 24 ff., 96 ff.
- Olivin 141 ff., 170
- Oregon 16
- organisch-biologische Kohlenstoffpumpe **62 ff.**, **122 ff.**
- Ostsee 145
- Ozeandüngung **90**
- Ozeanversauerung **57 ff.**, 136 ff.
- P**
- Pakistan 28, 39
- Palmöl 74
- Panzergeißler 122
- Pariser Klimaabkommen **42**, 191 ff.
- Pazifik 56
- Pazifischer Hering 101
- Pennsylvania 26
- Periklas 141
- Permafrost 16
- Peru 124
- Phosphor 54 ff., 122
- pH-Wert 14 ff., 58 ff.
- physikalische Abscheidung 152 f.
- physikalische Kohlenstoffpumpe 60 ff., 126 ff., 138
- Phytoplankton 62 ff., 122 ff.
- Picophytoplankton 122
- Plagioklas 170
- Porenraum 152 ff.
- Portlligat-Bucht 100
- Porto Velho 50
- ppb (parts per billion) 38
- ppm (parts per million) 38
- Präventionsgrundsatz 192 ff.
- Proteine 123
- Protonen 55 ff., 136 ff.
- Prozessemissionen 36, 152 ff.
- Pumpentechnik 127 ff.
- Pyroxene 170
- R**
- Reisanbau 83
- Renaturierung 79
- Restaurationsprojekte 103 ff.
- Restemissionen 45 ff., 152 ff., 182 ff.
- Rindfleisch 74
- Rio-Konferenz 193
- Rotalgen 116 f.
- Rotterdam 165
- Rückgang des arktischen Meereises 17 ff.
- Rückstrahlvermögen 196
- Ruderfußkrebse 123
- Rügen 55, 136
- Russland 75
- S**
- Sahara 26
- Salpen 65
- Salzgehalt 14 ff.
- Salzgestein 163
- Salzmarschen 38 ff., 62, **96 ff.**
- Sandsteininformationen 152 ff.
- Sandsteinschichten 152 ff.
- San Francisco 104
- Santos 165
- Sargassum*-Algen 116
- Sarmiento de Gamboa 127
- Saudi-Arabien 160
- Sauerstoff 54 ff.
- Sauerstoffarmut der Meere 13 ff.
- Sauerstoffatmung 55
- Säure-Base-Regulation 59
- Säurebindungsvermögen 57 ff., 127, **135 ff.**
- Savannen 70 ff.
- Saxidomus gigantea* 138
- Schelfmeer 62, 164 ff.
- Schelfsedimente 62
- Schleswig-Holstein 178
- Schmelzwasserzufluss 13
- Schotter 37
- Schottland 99
- Schweden 75, 160
- Schwefeldioxid 34
- Schweinswal 168
- Schwermetalle 146
- schwer vermeidbare Restemissionen 45
- Schwimmkörper 124
- Seegräser 59
- Seegraswiesen 38 ff., 62, **96 ff.**
- Seeigel 59
- Seenadeln 102
- Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen 174 ff., 193 ff.
- Seesterne 59, 102
- Seevölkerrecht 131
- Sequestrierungspotenzial 98
- Shandong 132
- Silikat 122 ff., 137 ff.
- Siliziumdioxid 122 ff.
- Siliziumschalen 123
- Sindh 39
- Skalierbarkeit 106 ff.
- Sleipner-Projekt 162 ff.
- Snøhvit-Projekt 164 f.
- Soja 50, 74
- Spitzkrokodil 102
- Sri Lanka 184
- Stahlherstellung 153
- Starkregen 16
- Starkregenereignisse 19
- Statoi 154
- Staudämme 103
- Stickstoff 54 ff., 122
- Stockholm 160
- Strahlungsbilanz 71
- Strömungsmodelle 128
- Subsidenz 17
- subtropische Wirbel 126 ff.
- Südafrika 169
- Südamerika 26, 78
- Südasiens 26
- Südkorea 177
- Südlicher Ozean 55
- Südostasien 78
- synthetischer Harnstoff 158
- T**
- Taifun 19
- Taku-Gletscher 199
- Tangwälder **96 ff.**
- The Blob 15
- Tibet 85
- Tiefenwasser 122 ff.
- Tigerhai 100
- Tonstein 163
- Torfbrände 74
- Treibhauseffekt 13 ff., 34 ff.
- Treibhausgasemissionen 17 ff., 34 ff.
- Treibhausgas-Index 35
- Treibhausgas-Netto-Null 202
- Treibhausgasneutralität 43 ff., 76, 202
- Treibhausgasreduktion 76 ff.
- Treibhausgas-Restmengen 45 ff.
- tropische Korallenriffe 22
- Trottellummen 16
- türkiser Wasserstoff 154
- U**
- Überdüngung 25
- Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Konvention) 90, 148, 194 ff.
- Überflutungen 21
- Überschuss-Szenario 43
- ultra-mafisch 169
- Umweltbundesamt 197 f.
- Umweltverträglichkeitsprüfung 192 ff.
- Umweltvölkerrecht 193
- UN-Nachhaltigkeitsziele 79
- UN-Seerechtsübereinkommen (UNCLOS) 174 ff., 193 ff.
- unterirdische Kohlenstofflagerstätten 96 ff.
- Upstream-Emissionshandel 201
- Uranin 131
- Uria aalge* 16
- USA 14 ff., 75, 107, 157 ff.
- US-amerikanische Ozean- und Atmosphärenbehörde (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 35 ff.
- Utah 25

V

vegetationsreiche Küsten-
ökosysteme 62, **96 ff.**
Venusmuscheln 138
verdrängte Emissionsreduktion 189
Vereinigte Arabische Emirate 160
Verhaltenskodex für die
Erforschung meeres- und
landbasierter Verfahren der
Kohlendioxid-Entnahme 92 ff.
Verifizierung von Emissionsvermeidungen und
Kohlendioxid-Entnahme durch den Schutz und die
(Wieder-)Aufforstung von
Wäldern (Verified Carbon
Standard REDD+ Methodology Framework) 113
Versauerung der Meere 13 ff.
Verwitterung 86, 141 ff.
Vietnam 107
Virginia 107
Vorsorgeprinzip 192 ff.
vulkanische Aktivität 137
vulkanisches Glas 170

W

Waldbewirtschaftung 72 ff.
Waldbrandgefahr 71
Wärmeineleffekt 28 f.
Washington 141
Wasserknappheit 25
Wasserkraft 25
Wasserkreislauf 19
Wasserstoff 54 ff., **154 ff.**
– blauer 153 ff.
– grauer 154
– grüner 141 ff., 154
– türkiser 154
Wasserstoffkationen 57,
136 ff.
Wasserversorgung 25 ff.
Wellenpumpen 124 ff.
Wellenpumpentest 131

Weltklimabericht (sechster) 12 ff.
Weltklimakonferenz 91
Weltklimarat **12 ff.**, 34 ff.,
85, 103
Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological
Organization, WMO) 13 ff.
Westantarktis 17
Wetterextreme 14 ff.
Wiederaufforstung 46, 78 ff.
Wintershall Dea 166

Z

Zement 153
Zement-CCS-Anlage 153
Zementherstellung 36, 86,
141
Zementklinker 153
Zentralafrika 79
Zentralamerika 26
Zertifikate 105
Zink 146
Zooplankton 59 ff., 123 ff.
Zwei-Grad-Grenze 42 ff.
zweites Emissionshandels-
system (EU-ETS 2) 200

Partner



Future Ocean: Im Future-Ocean-Netzwerk bündeln Forschende aus den Meeres- und Wirtschaftswissenschaften, der Medizin, Mathematik, Informatik sowie den Rechts-, Sozial- und Gesellschaftswissenschaften ihre Expertise und untersuchen den Ozean- und Klimawandel. Insgesamt haben sich mehr als 250 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU), dem GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, dem Institut für Weltwirtschaft (IfW) und der Muthesius Kunsthochschule zusammengeschlossen, um Handlungsoptionen für einen nachhaltigen Schutz und Nutzen des Ozeans zu entwickeln.



IOI: Das International Ocean Institute wurde 1972 als gemeinnützige Nichtregierungsorganisation von Elisabeth Mann Borgese gegründet. Es besteht aus einem Netzwerk von verschiedenen Niederlassungen, die über die ganze Welt verteilt sind, und hat seinen Hauptsitz in Malta. Das IOI setzt sich für eine friedliche und nachhaltige Nutzung des Ozeans ein.



KDM: Das Konsortium Deutsche Meeresforschung bündelt die Expertise der deutschen Meeresforschung. Seine Mitglieder setzen sich aus allen Forschungseinrichtungen zusammen, die in Meeres-, Polar- und Küstenforschung aktiv sind. Ein Hauptanliegen des KDM ist es, die Interessen der Meeresforschung gegenüber nationalen und internationalen Entscheidungsträgern und der EU sowie gegenüber der Öffentlichkeit gemeinsam zu vertreten.

mare

mare: Die Zeitschrift der Meere wurde 1997 von Nikolaus Gelpke in Hamburg gegründet und erscheint alle zwei Monate in deutscher Sprache. Mare rückt den Stellenwert, den das Meer als Lebens-, Wirtschafts- und Kulturraum für den Menschen bietet, in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Neben dem Magazin, das vielfach für seine hochwertigen Reportagen und Fotostrecken ausgezeichnet wurde, bringt der mareverlag zweimal im Jahr ein Buchprogramm heraus.

Danksagung

Die Erstellung einer Publikation wie die des „World Ocean Review“ ist in erster Linie ein Unterfangen, das mit hohem Aufwand verbunden ist. Daher gilt mein Dank zuerst allen beteiligten Wissenschaftlern, die an dieser Ausgabe mitgewirkt haben. Ein herzliches Dankeschön auch den Organisationsteams des Forschernetzwerkes Future Ocean und des Konsortiums Deutsche Meeresforschung für die reibungslose Kommunikation und die Arbeit hinter den Kulissen.

Dank gebührt darüber hinaus insbesondere auch der Wissenschaftsjournalistin Sina Löschke, die den Texten die allgemeine Verständlichkeit gegeben hat, die es nun auch den „Nicht-Wissenschaftlern“ ermöglicht, den roten Faden nicht aus den Augen zu verlieren. Im Zusammenwirken mit Anna Boucsein und Andrea Best, die für Gestaltung und Satz verantwortlich waren, Petra Koßmann und Anastasia Hermann, die die Bildredaktion innehatten, Dimitri Ladischensky, der das Lektorat betreute, und Susanne Feyke, die das Korrektorat durchführte, möchte ich zuletzt auch Jan Lehmköster herzlich danken, der als Gesamtprojektleiter auf maribus-Seite den „World Ocean Review“ von Beginn an federführend begleitet hat.

Nikolaus Gelpke

Geschäftsführer maribus gGmbH



Diese Veröffentlichung wird von der „Vereinte Nationen Dekade der Meeresforschung für nachhaltige Entwicklung“ als Dekade-Aktivität unterstützt. Die Verwendung des Logos der „Vereinte Nationen Dekade der Meeresforschung für nachhaltige Entwicklung“ durch eine Nicht-UN-Einrichtung bedeutet nicht, dass die Vereinten Nationen diese Einrichtung, ihre Produkte oder Dienstleistungen oder ihre geplanten Aktivitäten befürworten. Für weitere Informationen besuchen Sie bitte: <https://forum.ocean.decade.org/page/disclaimer>

Abbildungsverzeichnis

Umschlagsabbildung: Nick Cobbing; S. 2: mauritius images/Gabe Hearnshaw/Alamy Stock Photos; S. 8 v.o.n.u.: mauritius images/Gabe Hearnshaw/Alamy Stock Photos; DEEPOL by plainpicture; plainpicture/Spitta + Hellwig; mauritius images/Daniel Walther/Alamy Stock Photos; Ian Forsyth/Getty Images; S. 9 v.o.n.u.: Blue Planet Archive/Phillip Colla; © Henley Spiers/naturepl.com; plainpicture/Nikola Spasov; mauritius images/nature picture library/Lundgren/Wild Wonders of Europe; Ian Forsyth/Getty Images; S. 10/11: DEEPOL by plainpicture; Abb. 1.1: Kevin Frayer/Getty Images; Abb. 1.2: NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center; Abb. 1.3: Kathryn Elssesser/AFP via Getty Images; Abb. 1.4: Annie Spratt/unsplash; Abb. 1.5: nach IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. doi:10.1017/9781009157896, Infographic TS.1; Abb. 1.6: nach IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. doi:10.1017/9781009157896, FAQ 4.3 Figure 1; Abb. 1.7: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, doi:10.1017/9781009325844, Figure Cross-Chapter Box EXTREMES.1; Abb. 1.8: The Ocean Agency/XL Catlin Seaview Survey/Coral Reef Image Bank; Abb. 1.9: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, doi:10.1017/9781009325844, Figure 6.3; Abb. 1.10: Wellcome Collection no. 414771; Abb. 1.11: “A Borrowed Planet – Inherited from our ancestors. On loan from our children“ by Alisa Singer. © 2022 All rights reserved. Source: IPCC; Abb. 1.12: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, doi:10.1017/9781009325844, Figure TS.7; Abb. 1.13: Elliot Ross/www.elliottstudio.com; Abb. 1.14: nach IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. doi:10.1017/9781009157896, FAQ 3.1 Figure 1; Abb. 1.15: IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. doi:10.1017/9781009157896, Figure SPM.2; Abb. 1.16: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Figure 2.12.; Abb. 1.17: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Figure SPM 1; Abb. 1.18: Perfect Lazybones/Shutterstock; Abb. 1.19 und 1.20: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Figure SPM 2; Abb. 1.21: picture alliance/Xinhua News Agency/Stringer; Tab. 1.22: nach Ilissa B. Ocko et al., 2021. doi:10.1088/1748-9326/abf9c8; Abb. 1.23: Central Press/Getty Images; Abb. 1.24: IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. doi:10.1017/9781009157896, FAQ 5.4 Figure 1; Abb. 1.25: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Figure SPM 7;

Abb. 1.26: Arnaldur Halldorsson/Bloomberg via Getty Images; Abb. 1.27: nach Climate Action Tracker, Warming Projections Global Update, November 2022; Abb. 1.28: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Chapter 12, Chapter Box 8, Figure 1; Abb. 1.29: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Chapter 12, Chapter Box 8, Figure 2; Abb. 1.30: Victor Moriyama/The New York Times/Redux/laif; S. 52/53: plainpicture/Spitta + Hellwig; Abb. 2.1: nach Rita Erven, CDRmare; Abb. 2.2: plainpicture/Dirk Fellenberg, Abb. 2.3: nach IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. doi:10.1017/9781009157896, Figure 5.12; Abb. 2.4: nach IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. doi:10.1017/9781009157896, Figure 5.9; Abb. 2.5: nach IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. doi:10.1017/9781009157896, Figure 5.21; Abb. 2.6: nach Rita Erven, CDRmare; Abb. 2.7: akg-images/Science Source; Abb. 2.8: nach einer Vorlage des Office of Biological and Environmental Research of the U.S. Department of Energy Office of Science; Abb. 2.9: Annegret Stuhr/GEOMAR; Abb. 2.10: Daniela Dirscherl/WaterFrame; Abb. 2.11: nach IPCC, 2022, Impacts, Adaptation and Vulnerability. doi:10.1017/9781009325844, Figure 3.21; S. 68/69: mauritius images/Daniel Walther/Alamy Stock Photos; Abb. 3.1: © Jo-Anne McArthur/We Animals/naturepl.com; Abb. 3.2 und 3.3: nach Friedlingstein et al. 2022 (Global Carbon Project 2022); Abb. 3.4 und 3.5: nach FAO Forest Report 2022; Abb. 3.6: nach Hannah Ritchie/OurWorldInData.org, CC BY 4.0; Abb. 3.7: plainpicture/Emma Grann; Abb. 3.8: Glowimages/Getty Images; Abb. 3.9: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Figure 7.3; Abb. 3.10: nach Hannah Ritchie/OurWorldInData.org/environmental-impacts-of-food, CC BY 4.0; Abb. 3.11: nach Hannah Ritchie/OurWorldInData.org/food-choice-vs-eating-local, CC-BY 4.0; Abb. 3.12: Aleksandar Georgiev/Getty Images; Abb. 3.13: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Figure 7.11; Abb. 3.14: ssguy/shutterstock.com; S. 88/89: Ian Forsyth/Getty Images; Abb. 4.1: REUTERS/Mohamed Abd El Ghany; Abb. 4.2: © Woods Hole Oceanographic Institution/Paul Caiger; S. 94/95: Blue Planet Archive/Phillip Colla; Abb. 5.1: © Shane Gross/iLCP; Abb. 5.2: nach P. I. Macreadie et al., 2021, Nature Reviews Earth & Environment 2, 826–839. doi:10.1038/s43017-021-00224-1 und T. Wernberg et al., 2019, in C. Sheppard, 2019, “World Seas: An Environmental Evaluation” (Second Edition), Academic Press; Abb. 5.3: nach NOAA Climate.gov, Data: Ber-

tram et al., 2021; Abb. 5.4: Graham MacKay; Abb. 5.5: Diego Camejo/Beneath the Waves; Abb. 5.6: nach NOAA Climate.gov, graphic adapted from original by Sarah Battle, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory; Abb. 5.7 v.l.n.r.: Jayne Jenkins/Ocean Image Bank, Jayne Jenkins/Ocean Image Bank, Amanda Cotton/Ocean Image Bank, Dimitris Poursanidis/Ocean Image Bank; Abb. 5.8: nach P. I. Macreadie et al., 2021, doi:10.1038/s43017-021-00224-1; Abb. 5.9: NASA Earth Observatory images by Joshua Stevens, using Landsat data from the U.S. Geological Survey; Abb. 5.10: Shane Gross; Abb. 5.11: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. doi:10.1017/9781009325844, Chapter 3, Supplementary Material, Figure 1 und Figure TS.4; Abb. 5.12: Antonio Busiello/Getty Images; Abb. 5.13: nach P. I. Macreadie et al., 2022, doi:10.1016/j.oneear.2022.04.005; Tab. 5.14: nach CDRmare; Abb. 5.15: mauritius images/Carlos Rojas/Alamy Stock Photos; Abb. 5.16: Xinhua News Agency/eyevine/laif; S. 120/121: © Henley Spiers/naturepl.com; Abb. 6.1: Science Photo Library/Steve Gschmeissner; Abb. 6.2: nach L. A. Bistrow et al., 2017, doi:10.1016/j.cub.2017.03.030; Abb. 6.3: nach Rita Erven, CDRmare; Abb. 6.4: Science Photo Library/Steve Gschmeissner; Abb. 6.5: Diego Gutierrez; Abb. 6.6: Jost Kemper/Fachhochschule Kiel; Abb. 6.7: mauritius images/Andrey Armyagov/Alamy Stock Photos; Abb. 6.8: Michael Sswat/GEOMAR; Abb. 6.9: nach Wei Fan et al., 2019, doi:10.3390/w11091754, Fotos: Yao Zhang; S. 134/135: plainpicture/Nikola Spasov; Abb. 7.1: picture alliance/Design Pics/Scott Dickerson; Abb. 7.2: nach Rita Erven, CDRmare; Abb. 7.3: Clam Garden Network/Marco Hatch; Abb. 7.4: Aaron Takeo Ninokawa of UC Davis; Abb. 7.5: nach Rita Erven, CDRmare; Abb. 7.6: Science Photo Library/Kaj R. Svensson; Abb. 7.7: nach UCLA Institute for Carbon Management und E. Callagon La Plante et al., 2021, doi:10.1021/acssuschemeng.0c08561; Abb. 7.8: nach Thorben Amann/Rita Erven, CDRmare; Abb. 7.9: Bertrand Rieger/hemis.fr/laif; Abb. 7.10: Nick Cobbing; S. 151/152: mauritius images/nature picture library/Lundgren/Wild Wonders of Europe; Abb. 8.1: nach climatescience.org; Abb. 8.2: nach IEA, Operating and planned facilities with CO₂ capture by region, 2022, IEA, Paris, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/operating-and-planned-facilities-with-co2-capture-by-region-2022>, IEA, CC BY 4.0; Abb. 8.3: nach IEA, Operating and planned facilities with CO₂ capture by application, 2022, IEA, Paris, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/operating-and-planned-facilities-with-co2-capture-by-application-2022>; Abb. 8.4: nach EnBW; Abb. 8.5: © Markus Breig/Karlsruher Institut für Technologie, Allgemeine Services – Crossmedia, KIT; Abb. 8.6: nach Deutscher Bundestag, 2022; Abb. 8.7: nach IEA,

Annual CO₂ capture capacity vs CO₂ storage capacity, current and planned, 2022–2030, IEA, Paris, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-co2-capture-capacity-vs-co2-storage-capacity-current-and-planned-2022-2030> (Stand: September 2023); Abb. 8.8: nach IEA, Annual CO₂ storage capacity, current and planned vs Net Zero Scenario, 2020–2030, IEA, Paris, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-co2-storage-capacity-current-and-planned-vs-net-zero-scenario-2020-2030-3> (Stand: September 2023); Abb. 8.9: nach Deutscher Bundestag, 2022; Abb. 8.10: Alana Paterson/The New York Times/Redux/laif; Abb. 8.11: nach Deutscher Bundestag, 2022; Abb. 8.12: nach Global CCS Institute, 2022; Abb. 8.13: Chevron Australia Pty Ltd.; Abb. 8.14: Heidi Wideroe/Bloomberg via Getty Images; Abb. 8.15: nach Global CCS Institute; Abb. 8.16: nach Rita Erven/CDRmare; Abb. 8.17: mauritius images/Henryk Sadura/Alamy Stock Photos; Abb. 8.18: Solvin Zankl; Abb. 8.19: mauritius images/Naeblys/Alamy Stock Photos; Abb. 8.20: picture alliance/dpa/MAXPPP/Olivier Corsan; Abb. 8.21: nach Rita Erven/CDRmare; Abb. 8.22: mauritius images/Bernard Menigault/Alamy Stock Photos; S. 180/181: Ian Forsyth/Getty Images; Abb. 9.1: nach J. E. M. Watson et al., 2018; Abb. 9.2: REUTERS/Carlos Barria; Abb. 9.3: picture alliance/AP Photo/Felix Marquez; Abb. 9.4: © ESA, CC BY-SA 3.0 IGO; Abb. 9.5: Kev/Adobe Stock; Abb. 9.6: mauritius images/Sergey Nezhinkiy/Alamy Stock Photos; Abb. 9.7: nach IMO; Abb. 9.8: nach Umweltbundesamt; Abb. 9.9: © Nathan Kelley; Abb. 9.10: nach Umweltbundesamt/Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt); S. 202: Tabelle nach maribus; Abb. 9.11: picture alliance/AP Photo/Valentin Flauraud; S. 206: mauritius images/Gabe Hearnshaw/Alamy Stock Photos; S. 207 (beide): nach C3S/ECMWF, <https://climate.copernicus.eu/july-2023-sees-multiple-global-temperature-records-broken>, Datenaufbereitung rechte Grafik: Vincent Wawersik; S. 208: nach IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. doi:10.1017/9781009157896, Figure 5.12; S. 209: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Chapter 12, Chapter Box 8, Figure 2; S. 211: nach Rita Erven, CDRmare; S. 212: nach IPCC, 2022, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. doi:10.1017/9781009157926, Figure 7.11; S. 214: nach NOAA Climate.gov, graphic adapted from original by Sarah Battle, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory; S. 215: nach Rita Erven, CDRmare; S. 216: nach Rita Erven, CDRmare; S. 217: nach Rita Erven, CDRmare; S. 218: nach Global CCS Institute

Impressum

Gesamtprojektleitung: Jan Lehmköster, maribus
Redaktion und Text: Sina Löschke
Lektorat: Dimitri Ladischensky, mare
Gestaltung und Satz: Anna Boucsein, mare; Andrea Best, mare
Korrektorat: Susanne Feyke
Bildredaktion: Anastasia Hermann, mare; Petra Koßmann, mare
Grafiken: Walther-Maria Scheid
Produktion: HS Printproduktion, Holger Schmirgalski
Druck: Druckhaus Sportflieger
Papier: PrimaSet, FSC®-zertifiziert

ISBN 978-3-86648-733-8

Herausgeber: maribus gGmbH, Pickhuben 2, 20457 Hamburg

www.maribus.com

Reproduktion, Übersetzung in fremde Sprachen, Mikroverfilmung und elektronische Verarbeitung sowie jede andere Art der Wiedergabe nur mit schriftlicher Genehmigung der maribus gGmbH. Sämtliche grafischen Abbildungen im „World Ocean Review“ wurden von Walther-Maria Scheid, Berlin, exklusiv angefertigt. Im Abbildungsverzeichnis sind die ursprünglichen Quellen aufgeführt, die in einigen Fällen als Vorlage gedient haben.



Hier können Sie alle WORs direkt herunterladen
Link: <https://worldoceanreview.com/de/herunterladen>



Hier können Sie alle Ausgaben des WOR direkt bestellen
Link: <https://worldoceanreview.com/de/bestellen>

In der Reihe „World Ocean Review“ bisher erschienen und über www.worldoceanreview.com kostenlos bestellbar:

WOR 1, 2010

Mit den Meeren leben – ein Zustandsbericht

WOR 2, 2013

Die Zukunft der Fische – die Fischerei der Zukunft

WOR 3, 2014

Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken

WOR 4, 2015

Der nachhaltige Umgang mit unseren Meeren – von der Idee zur Strategie

WOR 5, 2017

Die Küsten – ein wertvoller Lebensraum unter Druck

WOR 6, 2019

Arktis und Antarktis – extrem, klimarelevant, gefährdet

WOR 7, 2021

Lebensgarant Ozean – nachhaltig nutzen, wirksam schützen