

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.

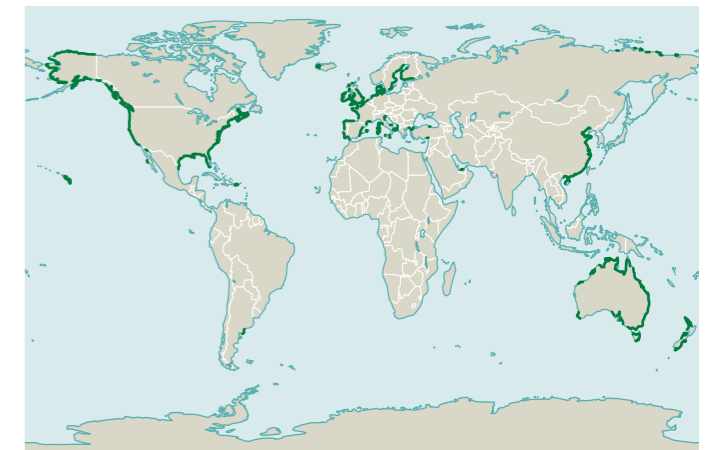


Verbreitungsgebiete vegetationsreicher Küstenökosysteme

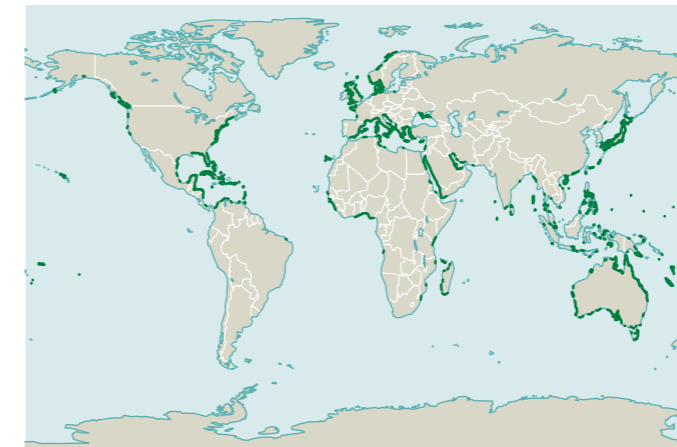
Mangrovenwälder



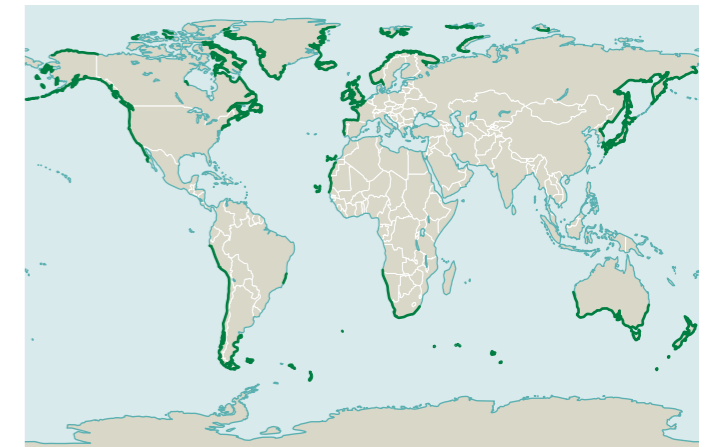
Salzmarschen



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.

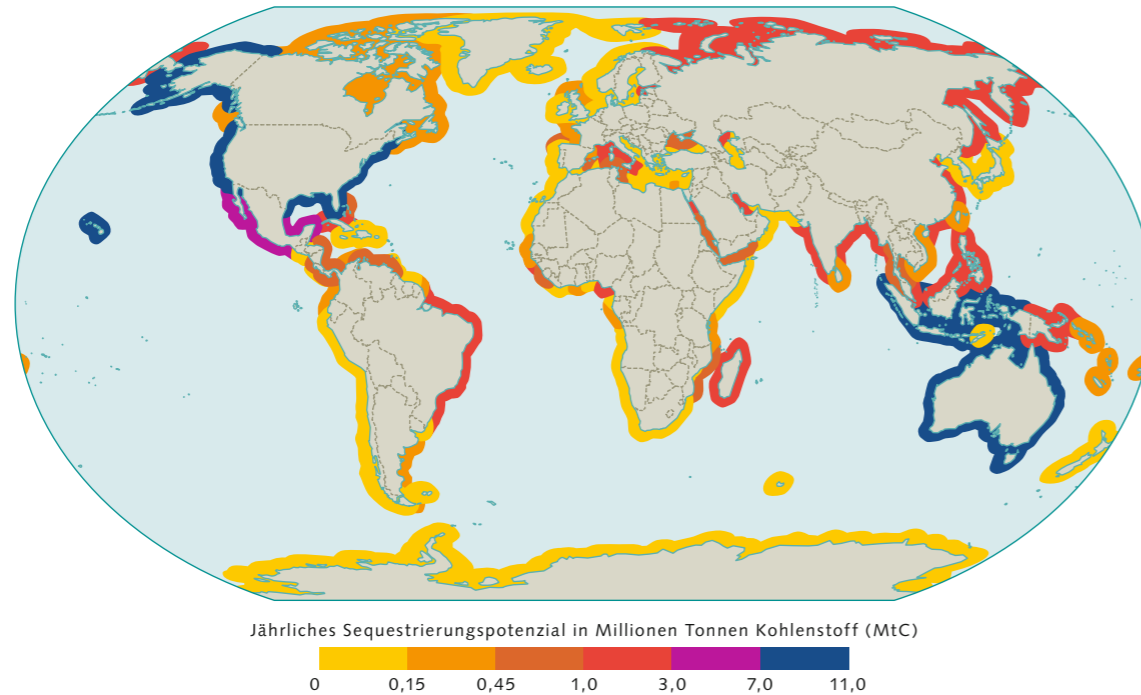
Hinzu kommt, dass die Meereswiesen und -wälder die Wasserbewegung bremsen. Auf diese Weise gelingt es ihnen, viele Schwebstoffe aus dem Wasser zu filtern und die Partikel sowie abgestorbenes Tier- und Pflanzenmaterial zwischen ihren Halmen und Wurzeln abzulagern. Durch diesen steten Partikeleintrag wächst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

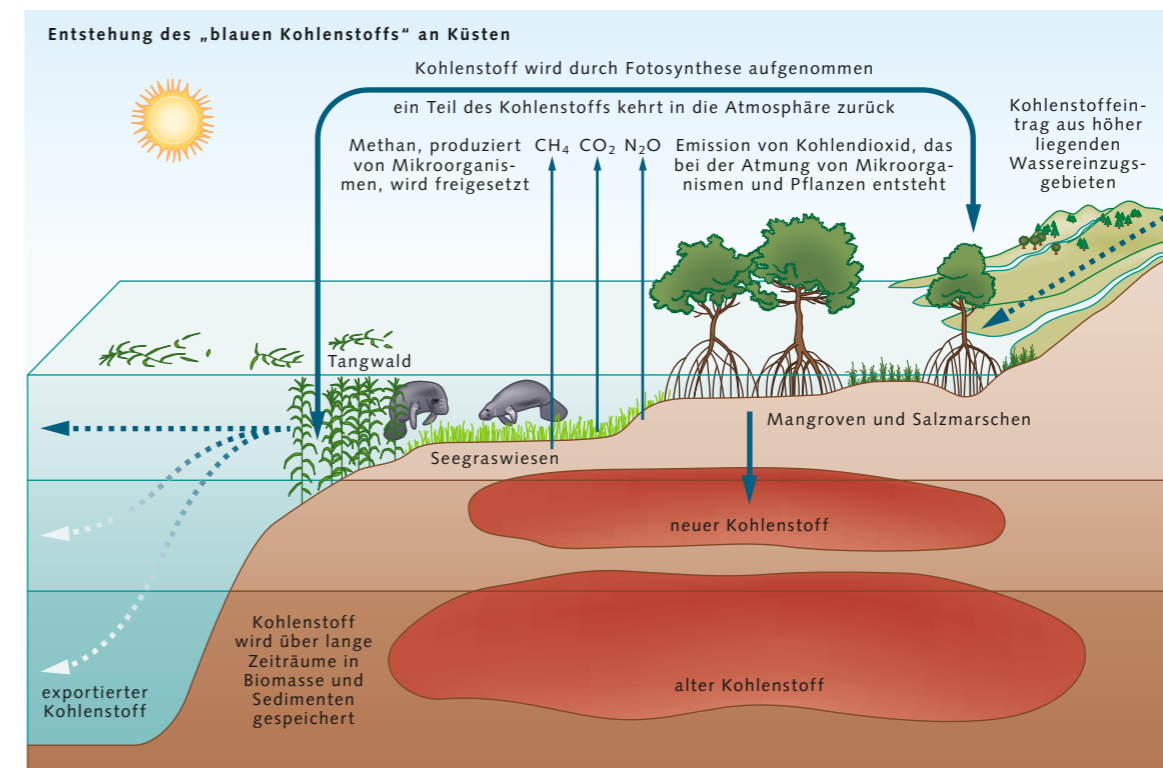
Doch damit nicht genug: Salzmarschen, Seegraswiesen, Mangroven- und Tangwälder produzieren Sauerstoff. Sie filtern Krankheitserreger, Schweb-, Schmutz- und Schadstoffe aus dem Wasser, bremsen Meeresströmungen, Wellen und Sturmfluten aus und schützen die Küsten so vor Erosion und durch die Anhäufung von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



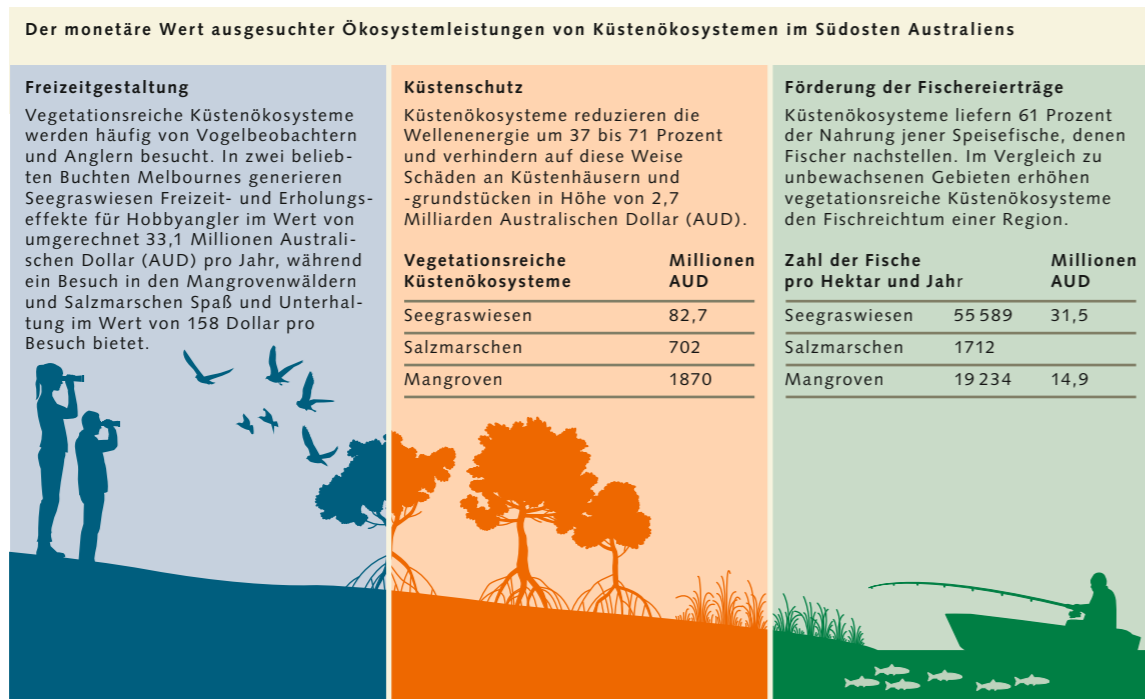
von Klimawandel, Küstenentwicklung und -verbau, Land- und Aquakulturwirtschaft, Meeresverschmutzung, Überfischung und anderweitiger intensiver Nutzung sind in den zurückliegenden 100 Jahren bis zu 50 Prozent aller Salzmarschen, etwa ein Drittel aller Seegraswiesen sowie etwa 35 bis 50 Prozent der Mangrovenwälder 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

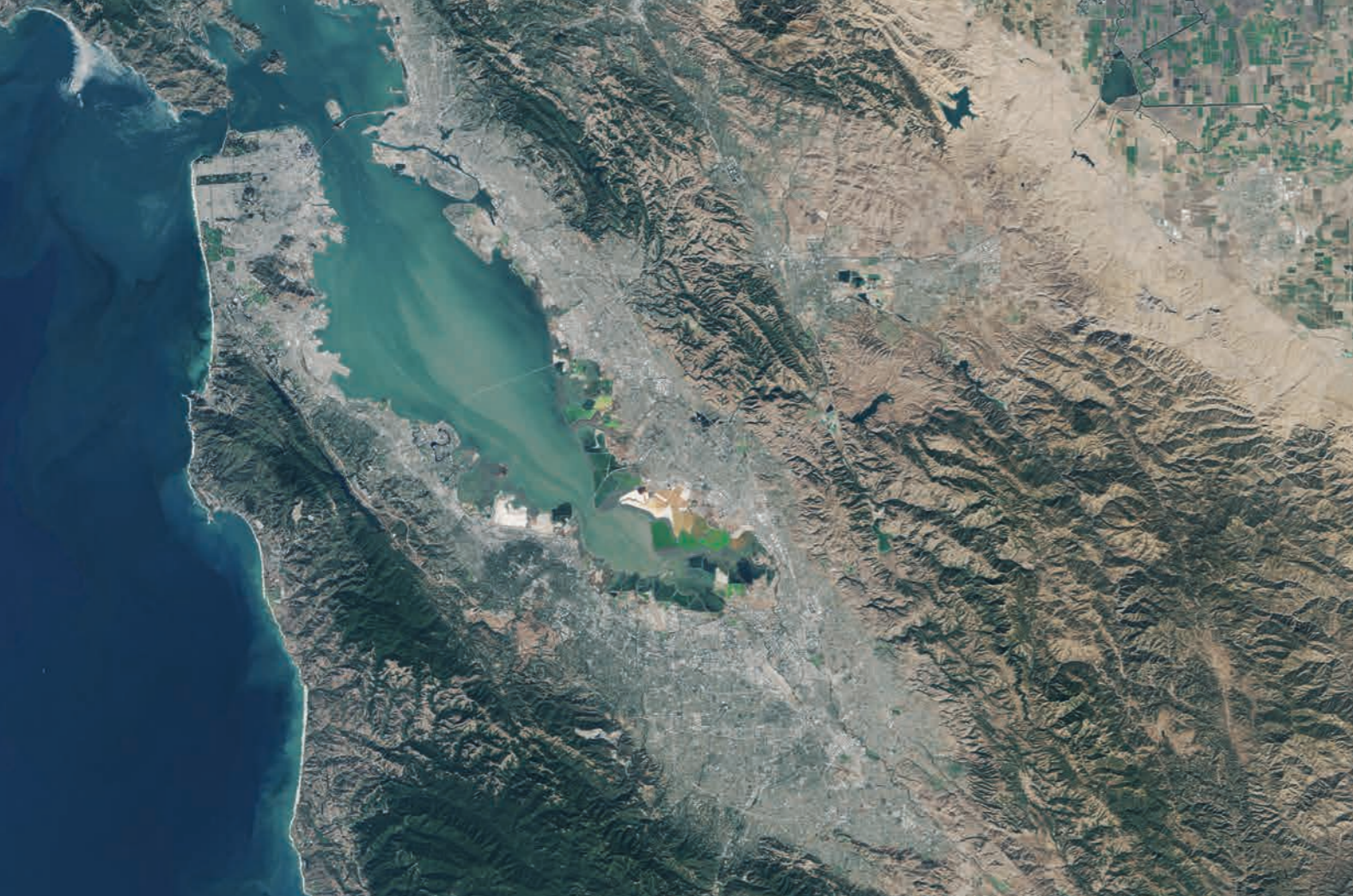
Der Klimawandel stellt eine große Bedrohung für die Küstenökosysteme dar. Infolge der steigenden Luft- und Wassertemperaturen verlagern Pflanzen und Tiere ihren Lebensraum polwärts; Hitzestress erhöht ihre Anfälligkeit für Krankheiten. Infolge steigender Meeresspiegel werden einstige Gezeitenbereiche 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-

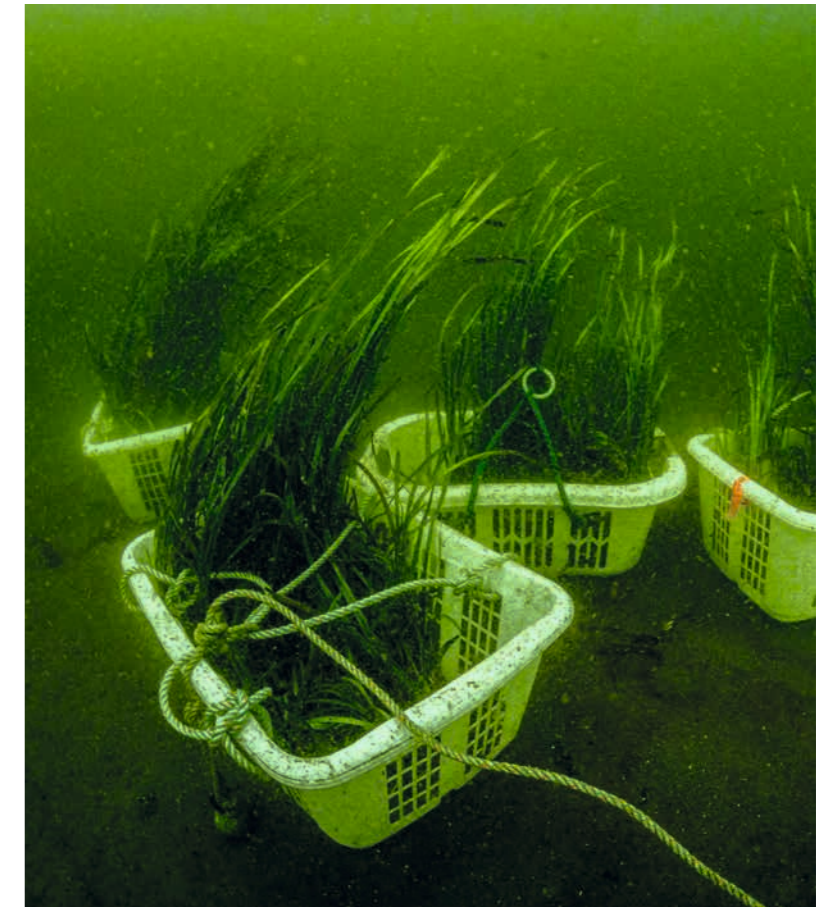
schiedener Parameter wie Strömungsgeschwindigkeit und Sedimentationsrate die durchschnittliche Kohlenstoffeinlagerung.

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 Kohlenstoffeinlagerungsrate 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. Entspreche 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

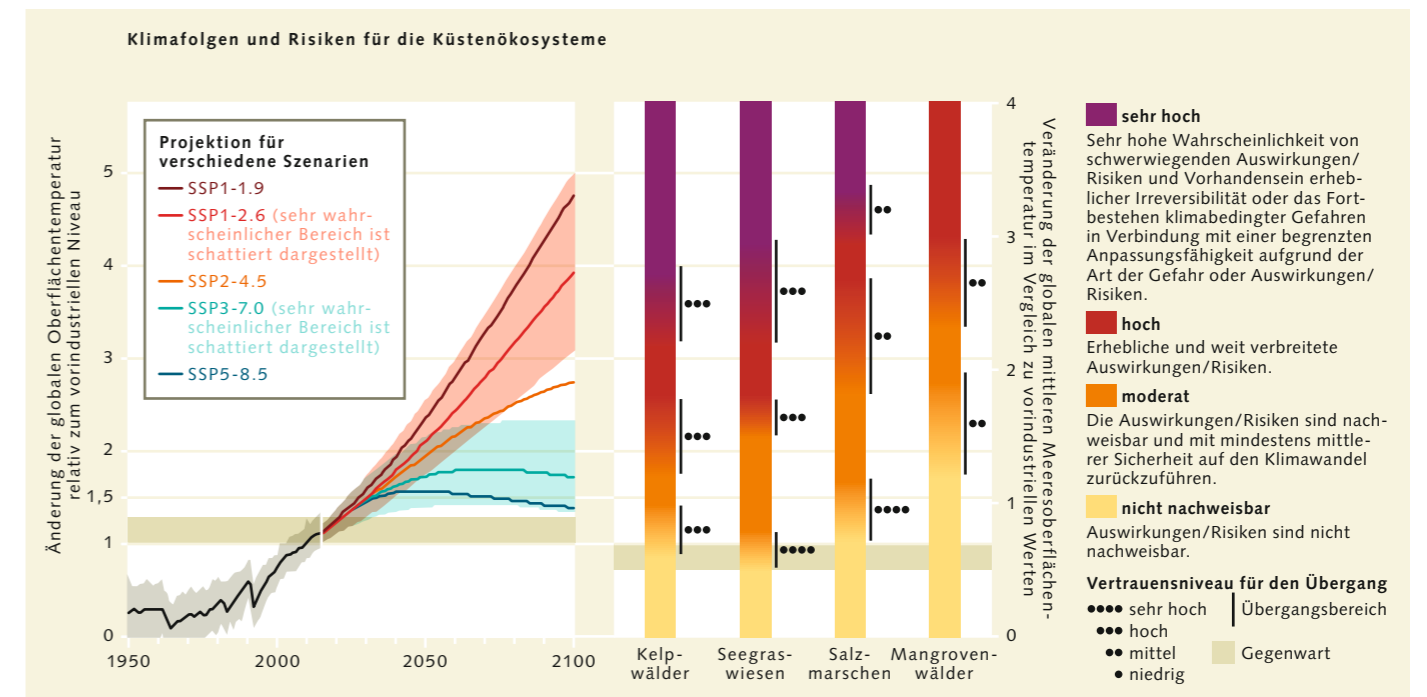
oder verschwinden, wären auch ihre Kohlenstofflagerstätten im Küstensediment in Gefahr. Schätzungen zufolge könnten schlimmstenfalls Kohlenstoffspeicher in einem Umfang von 3,4 Milliarden Tonnen Kohlenstoff bis zum Jahr 2100 verloren gehen.

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

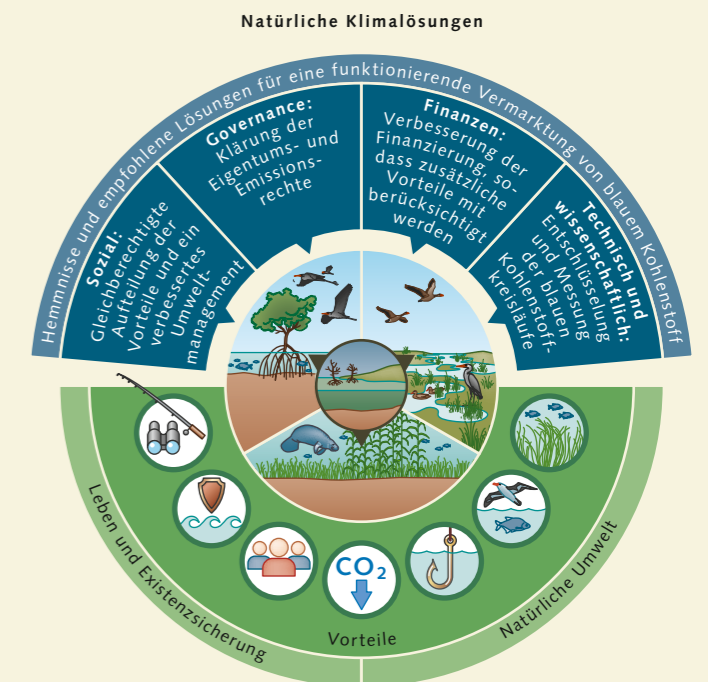
Viele Blue-Carbon-Projekte können diese Anforderungen bislang noch nicht erfüllen – etwa, weil es schwierig ist, genau nachzuweisen, wie viel zusätzliches Kohlendioxid der Atmosphäre entnommen wird. Aus diesem Grund ist die Menge der vergebenen Blue-Carbon-Emissionszertifikate auch noch vergleichsweise 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 finanziell 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 Spannbreite 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, Grundnetzfisherei, 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.