

# SCHLARAFFENLAND IM MITTELMEER

TEXT: KLAUS WILHELM

56

Am Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie lüften die Abteilungen von Marcel Kuypers und Nicole Dubilier die Geheimnisse von Seegraswiesen. Mit erstaunlichen Entdeckungen: Nicht nur an Land, sondern auch im Meer spielen Mikroorganismen eine entscheidende Rolle für Fitness, Produktivität und Stoffflüsse der Pflanzen.

Wer gern im Meer schwimmt oder am Ufer spazieren geht, kennt Seegras vor allem als unangenehmes Strandgut: Die länglichen, graugrünen Blätter werden im Herbst und nach Stürmen oft massenhaft angespült. An der Ostseeküste etwa gehören dicke Seegrasmatten vielerorts zum Strandbild – genauso wie die Bagger, welche die Pflanzenreste beseitigen. Forschende dagegen beginnen gerade erst zu verstehen, welchen Wert die Unterwasserwiesen tatsächlich haben.

Seegraswiesen sind weltweit in den flachen Küstenregionen gemäßigter und tropischer Meere verbreitet. Mit insgesamt etwa 600 000 Quadratkilometern bedecken sie eine Fläche größer als jene Frankreichs. Sie sind die Grundlage für ein Ökosystem, das

vielen Tieren, darunter auch bedrohte Arten wie etwa Meeresschildkröten, Seepferdchen und Seekühe, ein Zuhause ist und etlichen Fischarten eine sichere Kinderstube bietet.

Seegräser zählen zu den Blütenpflanzen und bilden, im Gegensatz zu Algen, echte Wurzeln aus. Dadurch sind sie fest im Meeresboden verankert und schützen die dahinterliegenden Küsten vor Erosion. Seegraswiesen produzieren jede Menge Sauerstoff und nehmen außerdem jedes Jahr Millionen Tonnen an Kohlendioxid auf, das sie als sogenannten blauen Kohlenstoff – *blue carbon* – einlagern.

Die Wiesen unter Wasser haben daher nicht nur eine immense ökologische Bedeutung. Sie spielen auch eine wichtige Rolle im globalen Klimageschehen. Bis vor Kurzem aber war nur wenig über die damit assoziierten Mikroorganismen bekannt. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie in Bremen haben nun in ihren gemeinsamen Arbeiten Licht ins Dunkel gebracht. Ihre Expeditionen ins Mittelmeer liefern erstaunliche neue Erkenntnisse. Insbesondere die Frage, wie die Kohlenstoffspeicherung im Meer überhaupt abläuft,

war lange Zeit ungeklärt. Die Abteilung „Symbiose“ des Bremer Max-Planck-Instituts unter der Leitung von Direktorin Nicole Dubilier ist jetzt einem Mechanismus auf die Spur gekommen. Forschungsgruppenleiter Manuel Liebeke hatte vor einigen Jahren das Metabolom darmloser Würmer analysiert, die in einer Seegraswiese vor Elba im Mittelmeer heimisch sind. Das Metabolom umfasst alle Moleküle eines Organismus oder Ökosystems, die irgendwie mit dem Stoffwechsel zu tun haben – Aminosäuren, Zucker, Fette und viele mehr. Zur großen Verwunderung aller wies der Forscher in den Würmern riesige Mengen an pflanzlichen Zuckern nach. Woher konnten diese stammen?

„Wir haben vermutet, dass die Zucker aus dem Seegras kommen“, sagt Liebeke. Um dem nachzugehen, entnahmen die Forschenden an mehreren Orten Wasser aus der Wurzelumgebung von Seegräsern – vor Elba, aber auch in der Karibik. „Wir gehen mit einer dünnen Metallnadel ins Sediment und holen mit einer Art langer Spritze Porenwasser aus verschiedenen Regionen neben und unter dem Seegras heraus“, beschreibt der Wissenschaftler das Vorgehen. Die Proben werden dann zur Analyse möglichst schnell tiefge-



# WISSEN AUS

— BIOLOGIE & MEDIZIN

Spielwiese für Meeresfor-  
schende: Wissenschaftle-  
rinnen und Wissenschaft-  
ler des Bremer Max-  
Planck-Instituts für  
marine Mikro-  
biologie untersuchen  
Seegrasfelder der Art  
*Posidonia oceanica* vor der  
Küste Elbas.

kühlt ins Bremer Labor verfrachtet. Die Crux: Das Salz im Meerwasser würde die Messungen der Stoffwechselprodukte in der Probe stören.

Federführend hat Dubilier's damalige Mitarbeiterin Maggie Sogin daher ein Verfahren entwickelt, um zunächst das störende Salz zu entfernen. Danach wandert die Probe in ein Analysegerät: einen Gaschromatografen mit gekoppeltem Massenspektrometer. Die Maschine fertigt eine Art Schnappschuss der chemischen Verbindungen in der Porenwasserprobe an. So wird ersichtlich, welche Moleküle darin vorhanden sind und in welchen Mengen. „In unseren Porenwasserproben war immer ein Riesenpeak zu sehen, der von dem Zucker Saccharose herrührte“, sagt Sogin, die mittlerweile an der Universität von Kalifornien, Merced, tätig ist. Noch niemals zuvor waren im Meer solche Zuckermassen nachgewiesen worden: „Es ist achzigmal mehr als sonst in Meerwasser üblich“, erklärt Nicole Dubilier. Um das global einzuordnen: Die Forschenden schätzen, dass in den Böden unter allen Seegraswiesen der Ozeane eine Million Tonnen Saccharose stecken – ein gigantischer Berg Zucker.

58

## Ein Überlaufventil für Energie

Physiologisch gesehen ist die Freisetzung von Zucker durch das Seegras höchstwahrscheinlich ein Mechanismus, um einen Überschuss an Energie zu bewältigen – ähnlich einem Überlaufventil. Nur: Wie kann es sein, dass sich in einem Ökosystem so viel Saccharose anhäuft? In den zumeist sauerstoffreichen Umgebungen an Land stürzen sich sofort Heerscharen von Mikroorganismen auf den Zucker und bauen ihn ab. Der größte Teil des Bodens im Wurzelbereich von Seegraswiesen – die sogenannte Rhizosphäre – ist dagegen frei von Sauerstoff. Doch gibt es unter den Mikroben genügend Spezialisten, die auch damit zurechtkommen. Es hat eine Weile gedauert, bis die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf des Rätsels Lösung kamen. Geholfen hat ihnen dabei eine Erkenntnis aus ihrer

Innige Partnerschaft: Die Mikroskopaufnahmen zeigen einen Querschnitt durch eine Seegraswurzel (oben) und einen Ausschnitt aus dem Wurzelinneren (unten), auf dem die Symbionten zu erkennen sind (in Pink).

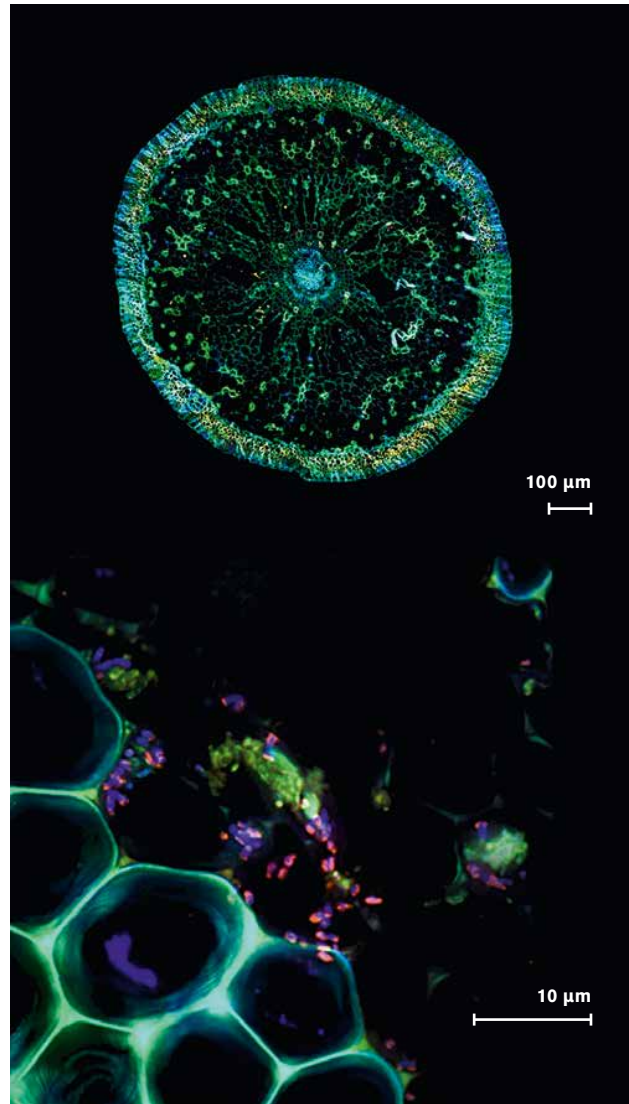


BILD: MPI FÜR MARINE MIKROBIOLOGIE / DANIELA TIENKEN / SOEREN AHMEKAMP

Wurmforschung. Denn einer ihrer Kollegen hatte herausgefunden, dass einige der mikrobiellen Symbionten, die in den darmlosen Würmern leben, Phenole abbauen können – chemische Substanzen, die etwa in Rotwein, dunkler Schokolade, Tee oder Beeren vorkommen und für ihre keimtötenden Eigenschaften bekannt sind. Dies brachte die Bremer auf die richtige Spur: Produziert das Seegras womöglich Phenole, die verhindern, dass Bakterien den Zucker wegfuttern? Die Forschenden starteten eine Reihe von Experimenten, die eindeutig belegen: Das Seegras produziert tatsächlich Phenole und gibt sie, wie auch den Zucker, ins Sediment ab! Die Substanzen hindern viele Bakterienarten da-

ran, die Saccharose zu verwerten. Einige Mikroorganismen haben sich jedoch an die sauerstoffarme, aber phenolreiche Situation angepasst und können den Zucker trotzdem nutzen. Dank dieser Fähigkeit leben sie wie im Schlaraffenland, ohne ernsthafte Konkurrenz.

Das Team der Abteilung „Biogeochemie“ unter der Leitung von Direktor Marcel Kuypers erforscht Seegraswiesen schon seit ungefähr zehn Jahren. Kuypers' Mitarbeiterin Wiebke Mohr und ihre Kolleginnen und Kollegen haben kürzlich die Ursache gefunden, warum das Seegras im Mittelmeer trotz Nährstoffarmut ausgezeichnet gedeihen kann: Es pflegt in seinen Wurzeln

eine Symbiose mit einem Bakterium, das den Pflanzen den nötigen Stickstoff liefert. Der Lebensraum vieler Seegräser ist für den Großteil des Jahres arm an Nährstoffen. In seiner molekularen Form ist Stickstoff im Meer zwar reichlich vorhanden, die Seegräser können ihn jedoch so nicht aufnehmen. Dass die Pflanzen dennoch üppig gedeihen, liegt an ihren mikroskopisch kleinen Helfern: Diese fixieren den gelösten Stickstoff innerhalb der Wurzeln und stellen ihn den Pflanzen in nutzbarer Form zur Verfügung. Wie diese innige Beziehung zwischen Seegras und Bakterium organisiert ist, untersuchte das Bremer Team gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen von Hydra Marine Sciences in Bühl und dem Schweizer Wasserforschungsinstitut Eawag. Bis dahin vermutete man, dass der fixierte Stickstoff von Bakterien stamme, die im Sediment der Rhizosphäre leben. „Wir haben nachgewiesen, dass diese Beziehung wesentlich enger ist“, sagt Mohr. „Die Bakterien leben direkt in den Wurzeln der Seegräser.“

## Bakterien, die Stickstoff fixieren

Es ist das erste Mal, dass eine derart enge Symbiose mit Stickstoff fixierenden Bakterien bei Seegräsern gezeigt wurde. Bisher war sie nur von Landpflanzen bekannt: Vor allem landwirtschaftlich wichtige Arten wie Hülsenfrüchte, Weizen oder Zuckerrohr lassen sich den Luftstickstoff von Bakterien aufbereiten und liefern diesen im Gegenzug Kohlenhydrate und andere Nährstoffe. Ein ganz ähnlicher Austausch von Stoffwechselprodukten findet auch zwischen dem Seegras und seinen Symbionten statt.

Die Bakterien, die in den Pflanzenwurzeln leben, sind eine Neuentdeckung. Mohr und ihr Team gaben ihnen den Namen *Celerinatantimonas neptuna*, nach ihrem Gastgeber, dem Neptungras (*Posidonia oceanica*). Verwandte von *C. neptuna* wurden auch schon bei Meeresalgen gefunden, etwa beim Seetang. „Vor etwa hundert Millionen Jahren haben Seegräser vom Land aus das Meer besiedelt. Damals haben sie

wohl die Bakterien von den großen Algen übernommen“, vermutet Wiebke Mohr: „Sie haben das an Land höchst erfolgreiche System kopiert. Um im nährstoffarmen Meerwasser überleben zu können, haben sie sich marine Symbionten zugelegt.“ Die Studien des Bremer Teams schlagen eine Brücke über das gesamte Ökosystem, von der Produktivität des Seegrases bis hin zu den dafür verantwortlichen Symbionten im Wurzelwerk. Die Forschenden nutzen dafür eine Vielzahl von Untersuchungsmethoden: Sauerstoffmessungen vor Ort verraten die Produktivität der Seegraswiese. Spe-

---

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Seegräser stellen riesige Mengen an Saccharose her, die sie im Sediment einlagern. Dieser Zucker bildet ein riesiges Kohlenstoffreservoir, das klimaschädliches Kohlendioxid speichert.

In ihren Wurzeln beherbergen die Seegräser symbiotische Bakterien, welche die Pflanzen mit lebensnotwendigem Stickstoff beliefern.

Andere Mikroben tragen dazu bei, dass in den Sedimenten der Seegraswiesen das Treibhausgas Methan produziert wird. Dieses wird sogar dann noch freigesetzt, wenn die Pflanzen bereits abgestorben sind.

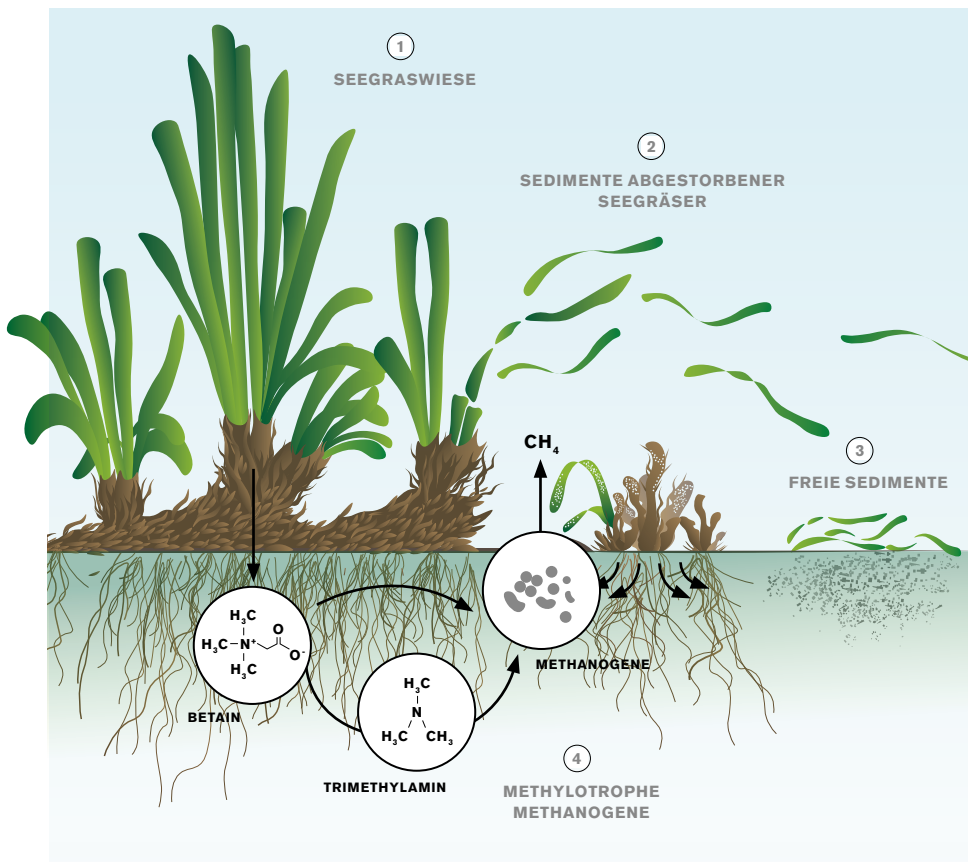
---

zielle Mikroskopietechniken wie die Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH) ermöglichen es, einzelne Bakterienarten farbig zu markieren und die Symbionten zwischen den Wurzelzellen der Seegräser zu lokalisieren. Im NanoSIMS, einem hochmodernen Massenspektrometer, lässt sich die Aktivität der Bakterien nachweisen. Genom- und Transkriptomanalysen zeigen, welche Mechanismen für die

Interaktion zwischen Wirt und Symbiont wahrscheinlich wichtig sind.

So gelang auch der Nachweis, dass die Lebensgemeinschaft im Seegras einen jahreszeitlichen Rhythmus pflegt – abhängig von der Nährstoffmenge in den Küstengewässern, die saisonal variiert. Im Winter und Frühjahr reichen die in Wasser und Sediment enthaltenen Nährstoffe den Seegräsern aus. „Die Symbionten sind dann zwar vereinzelt in den Wurzeln der Pflanzen vorhanden, aber wahrscheinlich nicht sehr aktiv“, sagt Mohr. Im Sommer, wenn das Sonnenlicht zunimmt, wachsen immer mehr Algen und zehren die Nährstoffe auf. Dann wird auch der Stickstoff knapp. In dieser Phase übernehmen die Symbionten und liefern den Seegräsern den nötigen Stickstoff. So ist es möglich, dass diese im Sommer, wenn doch eigentlich karge Zeiten anbrechen, ihr größtes Wachstum zeigen.

Für den Kohlenstoffkreislauf und damit auch für das Klima spielen Seegraswiesen eine wichtige Rolle, da sie zum einen sehr produktive Ökosysteme sind, zum anderen aber auch natürliche Quellen von Methan. Als Doktorandin in der Forschungsgruppe „Treibhausgase“ unter der Leitung von Jana Milucka untersucht Sina Schorn die Aktivität Methan produzierender Mikroorganismen, unter anderem in den Seegraswiesen des Mittelmeers. Denn während ihres Wachstums bilden Seegräser, so wie ihre Verwandten an Land, große Torfablagerungen unter der Sedimentoberfläche. Terrestrischer Torf setzt beim mikrobiellen Abbau des organischen Materials große Mengen an Methan frei. Dasselbe passiert auch unter Wasser: Methan, der einfachste Kohlenwasserstoff, ist ebenfalls ein Treibhausgas, und zwar ein weitaus potenteres als Kohlendioxid. Damit haben Seegraswiesen neben ihrer klimaschützenden auch eine klimaschädliche Wirkung, die den *Blue-carbon*-Effekt teilweise kompensiert. Wie das Methan gebildet wird, war lange Zeit unklar. Sina Schorn und ihre Kolleginnen und Kollegen vermuteten zunächst, dass das Gas in Seegraswiesen genauso produziert wird wie in terrestrischen Ökosystemen. Umso größer war die



### Methanproduktion in Seegraswiesen

- 1) Neptungras (*Posidonia oceanica*) produziert eine Vielzahl von methylierten Verbindungen, die von Mikroorganismen abgebaut werden. Dabei entsteht Methan ( $\text{CH}_4$ ).
- 2) Pflanzenteile in den Sedimenten abgestorbener Seegraswiesen setzen über lange Zeiträume methylierte Verbindungen frei.
- 3) Losgelöste Seegrasblätter, die sich auf freien Sedimenten ablagern, sind ebenfalls eine Quelle für methylierte Moleküle.
- 4) Im Sediment lebt eine vielfältige Gemeinschaft von Mikroben – sogenannte methylophile Methanogene –, die Methan direkt aus methylierten Verbindungen (etwa Betain) oder aus deren Abbauprodukten (wie Trimethylamin) freisetzen.

GRAFIK: GCO NACH SCHORN, S., AHMERKAMP, S., ET AL. DIVERSE METHYLOTROPHIC METHANOGENIC ARCHAEA CAUSE HIGH METHANE EMISSIONS FROM SEAGRASS MEADOWS. PNAS, VOL. 119 | NO. 9, MARCH 1, 2022

60

Überraschung, als die Forschenden die Mechanismen der Methanproduktion genauer unter die Lupe nahmen: „In den Sedimenten der Seegraswiesen entsteht Methan nur aus einer bestimmten Gruppe organischer Verbindungen“, erklärt die Mikrobiologin. Diese sogenannten methylierten Verbindungen stellt die Seegraspflanze selbst her. Spezialisierte Mikroorganismen – die methanogenen Archaeen – erledigen dann die Umwandlung zu Methan.

## Methan aus totem Pflanzengewebe

Zu den methylierten Verbindungen zählt beispielsweise Betain – ein Molekül, das Seegräsern hilft, mit dem schwankenden Salzgehalt des Meerwassers klarzukommen. Da methanogene Mikroorganismen diese Verbindungen direkt nutzen können, ist die Methanproduktion in den Seegraswiesen höchst effizient, und das Methan wird sehr schnell freigesetzt. Wie durch einen Strohhalm gelangt das Gas durch

das Pflanzengewebe aus dem Meeresboden ins Wasser. Weil Seegräser nur in flachen Meeresgebieten wachsen, haben Mikroorganismen dort kaum Gelegenheit, das Methan abzubauen, ehe es in die Atmosphäre entweicht. „Zudem wird das Methan aus dem Sediment durch die Bewegungskraft der Wellen regelrecht ausgewaschen“, sagt Jana Milucka.

Im Zuge ihrer Studie beprobten die Bremer Forschenden neben produktiven Seegraswiesen auch eine, die bereits abgestorben war. Dabei erlebten sie eine weitere Überraschung: „Die Raten der Methanproduktion waren dort ähnlich hoch wie in einer intakten Seegraswiese“, erzählt Jana Milucka. „Der Grund für diese anhaltende Methanfreisetzung ist vermutlich, dass die methylierten Verbindungen sehr lange im Gewebe der Pflanzen erhalten bleiben.“ Sie fanden sich sogar noch in Pflanzengewebe, das bereits vor mehr als zwei Jahrzehnten abgestorben war.

Zusammengenommen zeigen die Erkenntnisse der Bremer Wissenschaft-

lerinnen und Wissenschaftler, dass Seegraswiesen eine wichtige, bislang weit unterschätzte Rolle im Klimasystem spielen. Gleichzeitig sind die Wiesen unter Wasser akut bedroht: Als küstennahe Lebensräume sind sie von den menschengemachten Veränderungen besonders betroffen. Vor allem die Überdüngung der Meere durch Landwirtschaft und Aquakultur setzt ihnen zu. Große Mengen an Phosphor und Stickstoff führen zu übermäßigem Algenwachstum. Die Seegräser erhalten dadurch nicht mehr genügend Licht und sterben ab. Hinzu kommen immer mehr Freizeitboote, die auf Seegraswiesen ankern und Löcher in den Bewuchs reißen, die sich kaum wieder schließen. Mit einer Wachstumsrate von wenigen Zentimetern pro Jahr regenerieren sich die Unterwasserwiesen nur sehr langsam.

Die größte Bedrohung aber ist die Erderwärmung: Neptungras etwa reagiert sehr empfindlich auf Hitze. Schon wenige Grad mehr erzeugen bei den Pflanzen physiologischen Stress und erhöhen die Absterberate. „Derzeit er-

leben wir weltweit ein Absterben von Seegraswiesen, mit verheerenden Auswirkungen auf die Küsten“, sagt Jana Milucka. Für das Klima ist das in zweifacher Hinsicht fatal: „Unsere Ergebnisse zeigen, dass nach dem Absterben der Pflanzen kein Kohlendioxid mehr aus der Atmosphäre gebunden und im Sediment als blauer Kohlenstoff gespeichert wird. Zusätzlich wird weiterhin Methan freigesetzt.“

## Küstenregionen als Kohlenstoffspeicher

Die neuen Erkenntnisse machen deutlich, dass Seegraswiesen weit größere Aufmerksamkeit verdienen, als ihnen bisher zuteilwurde. Die Bremer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten weiterhin über mehrere Gruppen hinweg eng zusammen, um das Verständnis dieses faszinierenden Lebensraums zu verbessern. Innerhalb der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) beteiligt sich das Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie an verschiedenen Projekten, die Küstenregionen in den Fokus rücken – indem sie etwa untersuchen, wie viel Kohlenstoff die Seegraswiesen an deutschen Küsten speichern können. Mehrere Institutionen haben sich dazu im Projekt sea4soCiety zusammengeschlossen.

Die Max-Planck-Forschenden Manuel Liebeke und Jana Geuer sind daran beteiligt. Sie analysieren, welche kohlenstoffhaltigen Substanzen die Pflanzen produzieren und ins Wasser abgeben: „Wir haben bereits Hunderte unterschiedlicher Verbindungen gemessen“, sagt Liebeke. Als Nächstes wollen sie herausfinden, wie stabil diese Moleküle unter Stress sind, beispielsweise unter starkem UV-Licht oder bei erhöhten Temperaturen. Für das weitere Schicksal des Kohlenstoffs ist das entscheidend: „Die Idee ist, gezielt solche Küstenökosysteme zu fördern, die langfristig möglichst viele stabile Kohlenstoffverbindungen produzieren“, erklärt Liebeke. Auch eine Wiederaufforstung zerstörter Flächen wäre denkbar, wenn die Beschaffenheit der Küsten es zulässt. Mit weit-sichtiger Planung gewährleisten die

Bremer Forschenden auch die Zukunft ihrer Forschung an Seegraswiesen. Zu diesem Zweck wurde im westlichen Mittelmeer, auf der Urlaubsinsel Mallorca, gerade eine neue Forschungskoooperation ins Leben gerufen. Von der Max-Planck-Gesellschaft mit einer halben Million Euro gefördert, wird der Leuchtturm von Portocolom in Zukunft als Außenposten der Bremer Seegrasforschung fungieren. Gemeinsam mit dem spanischen Meeresforschungsinstitut Imedea in Esporles planen die deutschen und mallorquinischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zukünftig Langzeitbeobachtungen und Detailstudien an den Seegräsern und an den vielen Bewohnern dieses Lebensbereichs. Denn wie das Bremer Max-Planck-Institut eindrucksvoll gezeigt hat, zählen beim Klimaschutz längst nicht nur die Wälder an Land – sondern auch marine Ökosysteme wie die Wiesen unter Wasser.

←

---

## GLOSSAR

### ARCHAEEN

Einzellige Mikroorganismen ohne Zellkern. Neben den Bakterien und den Eukaryoten bilden sie eine dritte Lebensdomäne innerhalb der Biologie.

### BLAUER KOHLENSTOFF (BLUE CARBON)

Jener Kohlenstoff, den der Ozean sowie Meeres- und Küstenökosysteme aufnehmen und speichern.

### RHIZOSPHÄRE

Bereich des Bodens, der von den Pflanzenwurzeln unmittelbar beeinflusst wird.

### SACCHAROSE (ROHRZUCKER)

Zweifachzucker aus je einem Molekül Glukose und Fruktose.

---

Aus dem Meer ins Labor: Sina Schorn untersucht Proben von Neptungras (*Posidonia oceanica*), die vor der Küste Elbas gesammelt wurden. In ihrer Doktorarbeit erforscht sie Methan produzierende Mikroorganismen in Seegraswiesen.



FOTO: ACHIM MULHAUPT FÜR MPG