

5

Auswirkungen des Klimawandels auf das marine Ökosystem



> Dass der Klimawandel die Lebensgemeinschaften im Meer verändern wird, steht außer Frage. Zwar haben Veränderungen in den Ökosystemen meist mehrere Ursachen, doch spielen der steigende Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre und die globale Erwärmung eine entscheidende Rolle. Offen ist, wie stark Lebensgemeinschaften dadurch ins Wanken geraten.



Biologische Systeme im Stress

> Grundsätzlich sind Lebewesen gut an natürliche Bedingungsschwankungen in ihrer Umwelt angepasst. Sie ertragen für begrenzte Zeit sogar extreme Situationen. Der Klimawandel aber verändert manche Lebensräume so stark, dass für viele Arten der Stress zu groß wird. Kommen mehrere ungünstige Faktoren zusammen, können diese in der Summe sogar zum Aussterben von Arten führen.

Lebensräume verändern ihr Gesicht

Nicht nur Menschen können gestresst sein. Auch marine Pflanzen und Tiere geraten durch sogenannte Stressoren unter Druck – durch veränderte Bedingungen in ihrem Lebensraum. Stress gab es schon immer. Durch den Klimawandel aber nimmt er seit einigen Jahren ganz offensichtlich zu. Manchmal wird Stress schon durch einzelne Stressoren ausgelöst. Im Meer kann das beispielsweise eine durch Stürme verstärkte Sedimentation sein, die die Bodenlebewesen bedeckt, oder ein durch Algenblüten bewirkter Lichtmangel in tieferen Wasserschichten. Der Klimawandel fördert aber unerwünschterweise oftmals mehrere Stressoren gleichzeitig: Er verursacht „multiplen Stress“. So können an einem Standort zugleich die Temperatur, das Lichtangebot und der pH-Wert aus dem für die Lebewesen optimalen Bereich driften. Mitunter wirken auch aus fremden Regionen eingeschleppte Arten als Stressoren – als Fraßfeind, Krankheitserreger oder Nahrungskonkurrent.

Erschwerend kommt hinzu, dass die verschiedenen Stressoren nicht immer unabhängig voneinander wirken, sondern sich in manchen Fällen aufsummieren oder gar verstärken. Nicht immer führt das gleich zum Tod. In vielen Fällen beeinträchtigen die Stressoren vorerst nur die Leistungsfähigkeit eines Organismus. Dadurch verändern sich die Interaktionen des geschwächten Lebewesens mit seiner Umwelt, mit Fraßfeinden, Parasiten, Konkurrenten, Krankheitserregern oder Reproduktionspartnern. Diese Effekte können die oben beschriebene sogenannte Primärwirkung der Stressoren, beispielsweise durch Lichtmangel erzeugten Stress, deutlich übertreffen. Am weiter unten gezeigten Beispiel des Blasentangs werden diese Zusammenhänge verdeutlicht.

Zu viele Umweltveränderungen auf einmal

Zu den häufigsten Stressoren, die im Zuge des Klimawandels verstärkt auftreten und auf marine Ökosysteme wirken, gehören:

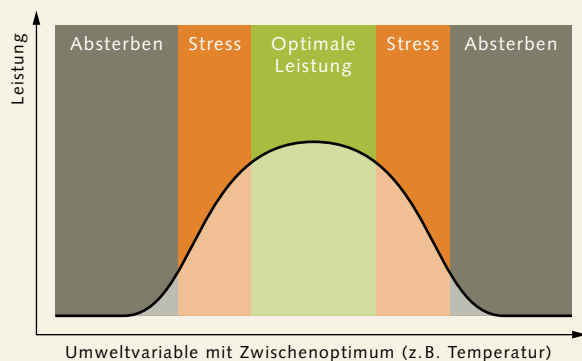
- die allmähliche Versauerung des Meerwassers und damit einhergehend eine mögliche Beeinträchtigung von Kalzifizierungsprozessen, der Kalkbildung bei Meeresorganismen (Kapitel 2);
- die Erwärmung des Meerwassers und die damit verbundenen Sekundäreffekte wie etwa eine stärkere Schichtung des Wassers, die Erhöhung von Stoffwechselraten der Organismen oder die Veränderungen von Löslichkeitskonstanten und damit der Menge von bestimmten im Wasser gelösten Substanzen wie etwa Gasen oder Karbonaten;
- die Aussüßung oder Versalzung in Randmeeren und die damit einhergehende Beeinträchtigung des Ionenhaushalts lebender Zellen (Kapitel 2);
- die Eutrophierung, das heißt die übermäßige Anreicherung des Wassers mit Nährstoffen, und andere Arten der chemischen Verschmutzung des Meerwassers. So erwarten Klimaforscher für weite Bereiche des Ostseeraums künftig erhöhte Niederschlagsraten. Mit dem zunehmenden Regen würde dann verstärkt Dünger aus der Landwirtschaft ins Meer gelangen (Kapitel 4);
- die Veränderungen von küstennahen Strömungs- und Sedimentationsprozessen durch menschliche Baumaßnahmen, die zum Teil Folge des Klimawandels und des steigenden Meeresspiegels sind. Dazu zählen Häfen, Wellenbrecher oder Deiche (Kapitel 3);
- die Ausbreitung exotischer Arten in neue Lebensräume. Es ist zu erwarten, dass sich als Folge des multiplen Stresses die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften

Wie Stress entsteht und wie er wirkt

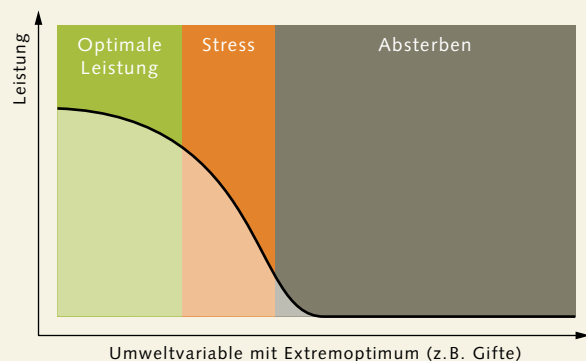
Auf einen Organismus in seinem Lebensraum wirken verschiedene Umwelteinflüsse, an die er in der Regel auch bei Schwankungen recht gut angepasst ist. Diese Anpassung der Lebewesen an die abiotischen Bedingungen ihres Verbreitungsgebiets, also die chemischen und physikalischen Gegebenheiten, hat über Tausende oder gar Millionen von Jahren, über evolutive Zeiträume stattgefunden. Stress entsteht, wenn diese Umweltvariablen vorübergehend oder dauerhaft deutlich außerhalb des Bereichs liegen, an den ein biologisches System (eine Zelle oder Art) angepasst ist. Derartige Stresssituationen können auf verschiedene Weise erzeugt werden:

- durch vorübergehende Schwankungen der abiotischen Bedingungen (zum Beispiel Jahreszeiten, Wetteranomalien);
- wenn im Wasser frei schwimmende Organismen, wie zum Beispiel planktische Larven, aus dem Zentrum des Lebensraums verdriften und sich an den Rändern des Verbreitungsgebiets ansiedeln, wo für sie keine optimalen Umweltbedingungen herrschen;
- wenn sich Klimazonen schneller verschieben, als sich die Arten evolutiv daran anpassen können.

Nicht immer sind Organismen Veränderungen schutzlos ausgeliefert. Sie können sich durchaus an neue Bedingungen anpassen und auf Stress reagieren. Eine Anpassung ist auf dreierlei Weise möglich. Am schnellsten, innerhalb von Tagen oder Wochen, wirkt die phänotypische Plastizität: Individuen stellen sich durch Veränderungen der Wuchsform, des Stoffwechsels oder der Ernährungsweise auf die neuen Gegebenheiten in ihrem Lebensraum ein. Das ist natürlich nur bis zu einem gewissen Grad möglich. Relativ schnelle Anpassungen über wenige Generationen sind auch über selektive Prozesse möglich: Sind in einer Population Genotypen, also Individuen mit bestimmten, nicht direkt sichtbaren, aber im Erbgut verankerten Eigenschaften, vorhanden, die mit den neuen Umweltbedingungen besser als andere Artgenossen zurechtkommen, so werden sich diese recht schnell durchsetzen. Die Leistungs- und Überlebensfähigkeit der Population ist somit gewährleistet. Evolutive Prozesse im klassischen Sinn, das zufällige Auftauchen einer Mutation, welche das Überleben in der sich verändernden Umwelt ermöglicht, werden bei vielen Arten mit langen Generationsdauern meist zu langsam sein, um mit den künftigen durch den Klimawandel verursachten Veränderungen in ihren Lebensräumen Schritt halten zu können.



5.1 > Verschiedene Umweltvariablen wirken sich unterschiedlich auf Organismen aus. So gedeihen viele Lebewesen am besten bei moderaten Temperaturen – dem sogenannten Zwischenoptimum (links). Wird es kälter oder wärmer, verschlechtert sich die Situation. Die Leistungsfähigkeit der Lebewesen nimmt ab. Anders verhält es sich



im Fall des Extremoptimums: In einem sauberen Lebensraum funktioniert der Organismus optimal. Breiten sich Gifte im Lebensraum aus, nimmt die Leistung ab. In beiden Fällen erfährt das Tier oder die Pflanze Stress, der zum Tod führen kann. Hält der Stress länger an, kann die Art im betroffenen Gebiet sogar ganz aussterben.

ten verändert. Außerdem könnten sich geographische Verbreitzonen verschieben, sodass Arten in ihren angestammten Heimatgebieten aussterben. Denkbar ist auch, dass sich exotische Spezies in fremden Regionen neu etablieren.

Der Blasentang – eine Spezies im Dauerstress

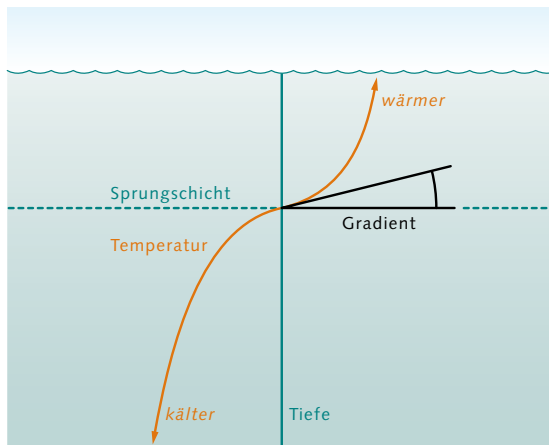
Der Blasentang, *Fucus vesiculosus*, ist eine Großalge der gemäßigten Breiten, die in der Nord- und Ostsee häufig vorkommt. Er besiedelt vor allem die **Gezeitenzone**, ist aber auch gelegentlich bis in 12 oder gar 15 Metern Tiefe anzutreffen. Der Blasentang erfüllt eine Reihe wichtiger Aufgaben im Ökosystem. Er ist zugleich Nahrungsquelle für verschiedene Organismen und wichtiger Sauerstofflieferant. Er bietet Jungtieren Schutz und dient diversen Spezies als **Substrat**, auf dem sie sich ansiedeln. In den vergangenen vier Jahrzehnten ist sein Bestand in der west-

lichen Ostsee um mehr als 90 Prozent zurückgegangen, in vielen Gebieten kommt er nicht mehr bis in 12, sondern nur noch bis in 3 Metern Tiefe vor. Lange hat man den Schwund in der Tiefe auf den Umweltstressor Eutrophierung zurückgeführt (Kapitel 4). Man vermutete, dass der Nährstoffüberschuss im Wasser zu dichteren Planktonblüten führt, sodass weniger Licht bis zum Meeresgrund dringt. Man nahm ferner an, dass Lichtmangel, wie er während einer Planktonblüte am Meeresboden herrscht, die Verteidigungsfähigkeit des Blasentangs gegen Fraßfeinde einschränkt. Zudem sieht es so aus, als könne sich der Blasentang mit abnehmendem Licht schlechter gegen Bakterien zur Wehr setzen.

Doch diese Erklärung ist unzureichend, da der Blasentang erstens Energie speichern kann und so auch dunklere Zeiten übersteht, zweitens auch noch bei sehr niedrigem Lichtangebot wächst. Selbst wenn man berücksichtigt, dass durch die Eutrophierung verstärkt Organismen wie

5.2 > Der Blasentang *Fucus vesiculosus* ist in Europa weit verbreitet. Durch den Klimawandel aber könnte er in manchen Gebieten aussterben.

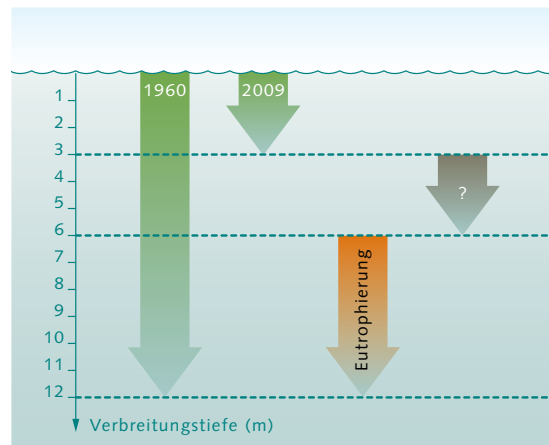




5.3 > Als Sprungschicht bezeichnet man die Trennungszone zwischen dem warmen, oberflächennahen Wasser und dem kalten Wasser in der Tiefe. Der Gradient ist ein Maß dafür, wie stark die Temperaturänderung zwischen warmem und kaltem Wasser an der Sprungschicht ist.

zum Beispiel Mikroalgen auf der Blasentangoberfläche wachsen, was zu weiterer Licht- und Nahrungskonkurrenz zwischen Alge und Tang führt, müsste der Blasentang noch bis in 6 Metern Tiefe hinab wachsen können. Erst unterhalb dieser Marke wäre das durch Lichtmangel und Nahrungskonkurrenz verursachte Energiedefizit so hoch, dass es für ihn tödlich wäre. Warum sich die Pflanze also bereits ab 3 Metern Tiefe rar macht, lässt sich damit nicht beantworten.

Inzwischen geht man davon aus, dass der Schwund im relativ flachen Bereich zwischen 3 und 6 Metern folgende Ursachen hat: Zum einen führt die bereits heute messbare Erwärmung des Meerwassers dazu, dass mit steigender Stoffwechselrate die Fraßfeinde hungriger und der bakterielle Befall intensiver wird. Zudem beeinträchtigen schnelle Temperatursprünge in verschiedenen Wassertiefen die Verteidigungsfähigkeit gegen Angreifer. Gerade in der Tiefe um 4 bis 5 Meter befindet sich im Sommer oft eine Sprungschicht. Der damit einhergehende Temperatursprung über wenige Tiefenzentimeter wird mit zunehmender Wassererwärmung schärfer. Schwappt eine solche Sprungschicht auf und ab, bedeutet dies für einen in dieser Tiefe wachsenden Blasentang schnelle und starke Temperaturschwankungen – und dadurch verringerte Verteidigungsfähigkeit.



5.4 > Um 1960 kam der Blasentang in der westlichen Ostsee bis in 12 Metern Tiefe vor, 2009 nur noch bis in 3 Metern. Der durch Eutrophierung verursachte Lichtmangel trägt erheblich zum Schwund zwischen 6 und 12 Metern bei. Den Rückgang zwischen 3 und 6 Metern aber kann man damit nicht erklären.

In den vergangenen Jahren ist außerdem ein neuer biologischer Stressor hinzugekommen: die aus Südostasien eingeschleppte Rotalge *Gracilaria vermiculophylla*. Die Ansprüche dieser Art an den Lebensraum ähneln stark denen des Blasentangs. Das Problem: Anders als der Blasentang kann sich die Rotalge ungeschlechtlich vermehren, was sie besonders reproduktiv macht. Darüber hinaus ist sie toleranter gegenüber Schwankungen der abiotischen Standortbedingungen und außerdem weniger attraktiv für Fraßfeinde. Mehr noch, die Fraßfeinde des Blasentangs nutzen die Rotalge als Schutzhabitat, in dem sie Zuflucht vor ihren Feinden finden. Problematisch ist auch, dass chemische Ausdünstungen von *Gracilaria* die Keimungsfähigkeit von *Fucus*-Eiern beeinträchtigen.

Fucus ist also einer Vielzahl von Stressoren und deren direkten und indirekten Effekten ausgesetzt: Lichtreduktion, Besiedlungs- und Fraßdruck oder der Nahrungskonkurrenz durch Algen. Alles zusammen schwächt das Wachstum und die Keimung. Damit haben die *Fucus*-Bestände den Verlusten durch Fraß und Konkurrenz immer weniger entgegenzusetzen. Das Beispiel *Fucus* macht deutlich, dass die direkten Effekte des Klimawandels zunächst gering sein mögen. Durch die Veränderung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Organismen aber sind sie dennoch vernichtend.

Störung im Planktonkreislauf

> Aktuelle Experimente und Studien zeigen, dass der Klimawandel, besonders die Erwärmung der Erde, eingespielte biologische Systeme aus dem Takt bringt. Für manche Lebewesen ist das fatal. Beunruhigend ist vor allem, dass sich der Lebensrhythmus der wichtigsten Nahrungsgrundlage in den Ozeanen, der des pflanzlichen Planktons, verändert.

Lebenswichtige Einzeller

Das Plankton ist von enormer Bedeutung als Nahrungsquelle für das Leben im Meer. Das Phytoplankton, Algen und Cyanobakterien, nimmt im Wasser gelöste Nährstoffe auf, wächst und teilt sich. Dadurch wird im Meer die Biomasse produziert, von der sich Zooplanktonorganismen, wie Kleinkrebse und Fischlarven, ernähren. Das Zooplankton wiederum wird von Fischen und ihren Larven gefressen. Das Plankton spielt somit in den **biogeochemischen** Kreisläufen des Ozeans eine Hauptrolle. Durch den Klimawandel bewirkte Veränderungen des Planktons werden daher in der Zukunft auch einen entscheidenden Einfluss auf das Funktionieren des gesamten **pelagischen Systems** haben.

Das Planktonwachstum kommt aus dem Takt

Zum Plankton gehören überwiegend kurzlebige Organismen. Diese vermehren sich in der Regel so schnell, dass innerhalb eines Jahres mehrere Generationen entstehen können. Grundsätzlich folgt die Entwicklung der Planktonorganismen einem regelmäßigen Jahreszyklus, der mit der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons beginnt. Dementsprechend bewirkt das zunehmende Lichtangebot im Frühjahr, dass die Menge des Phytoplanktons extrem schnell zunimmt. Schon wenige Wochen nach dem winterlichen Minimum erreicht die Biomasse einen Jahres Spitzenwert. Danach nimmt die Biomasse wieder kontinuierlich ab. Zum einen, weil das Zooplankton das Phytoplankton wegrisst, zum anderen, weil die im Wasser gelösten Pflanzennährstoffe während der Blüte stark aufgezehrt wurden und absinken. Die Phytoplankter finden also im Wasser immer weniger Nahrung.

In nährstoffarmen und kalten Meeresgebieten ist die Frühjahrsblüte die einzige, in vielen anderen Meeresgebieten die größte Nahrungszufuhr für das Zooplankton im Jahresverlauf. Damit ist die Frühjahrsblüte auch für die Ernährung der Fische, die sich vor allem von Zooplankton ernähren, von größter Bedeutung. Die Bodenlebewesen wiederum profitieren von den großen Mengen absinkenden organischen Materials, den Resten der abgestorbenen Phyto- und Zooplanktonorganismen.

Das kurzlebige Plankton reagiert ausgesprochen schnell auf physikalische und chemische Veränderungen im Meer oder Schwankungen im Nahrungsangebot. Gelegentlich kann die Größe der Populationen innerhalb nur weniger Tage oder Wochen extrem variieren. In anderen Fällen verändert sich die Zusammensetzung der Planktongemeinschaften: Bestimmte Planktonarten dominieren auf einmal. Veränderungen durch den Klimawandel sind in jedem Fall schon erkennbar. Einige davon entsprechen den Erwartungen: So wie die Obstbaumblüte an Land beginnt auch die Frühjahrsblüte des Planktons in vielen Meeresgebieten früher. Zudem verschieben sich die Verbreitungsgebiete von Planktonarten aufgrund der Meerese Erwärmung weiter Richtung Pol. Ein Beispiel ist die nach Norden gerichtete Ausbreitung der für die gemäßigte Zone charakteristischen Copepoden-Art *Calanus helgolandicus*, eines Kleinkrebses, der die in skandinavischen Breiten heimische Art *Calanus finmarchicus* verdrängt. Da beide Arten wichtige Fischnährtiere sind und ein ähnliches Nahrungsspektrum haben, sollte das keine gravierenden Auswirkungen auf das Funktionieren des Ökosystems haben. Aber nicht alle Veränderungen in den Plankton-Lebensgemeinschaften sind so unbedenklich. In manchen Fällen führt die Erwärmung des Wassers dazu, dass der Zooplanktonnachwuchs zu früh schlüpft und verhungert.

Die Copepoden

Copepoden (Ruderfußkrebse) zählen zu den Krebsen (Crustacea). Sie besiedeln sowohl Meerwasser als auch Süßwasser. Die meist nur wenige Hundert Mikrometer bis wenige Millimeter großen Tiere sind die artenreichste Gruppe der Crustaceen (etwa 14 000 Arten) und machen den größten Anteil des marinen Zooplanktons aus. Copepoden stellen damit eine wichtige Nahrungsgrundlage für Fische und andere Krebsarten dar.

Plankton-Experiment: Klimawandel im Wassertank

Forscher haben den Einfluss von Klimaänderungen auf die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons experimentell untersucht. Dazu wurden 1,4-Kubikmeter-Tanks mit Planktonorganismen befüllt, wie es dem Entwicklungsstand des Phytoplanktons im Spätwinter entspricht. In Klimakammern wurden die Tanks unterschiedlichen Lichtangeboten und verschiedenen Verläufen der Frühjahrs Temperaturen ausgesetzt. Simuliert wurden dabei ein gegenwärtiger Durchschnittsverlauf der Frühjahrs Temperatur sowie Erwärmungen um 2, um 4 und um 6 Grad Celsius. Die Ergebnisse sind beeindruckend: Die Frühjahrsblüte trat pro Grad Celsius Temperaturerhöhung um 1 bis 1,5 Tage früher ein. Ein besseres Lichtangebot verstärkte diesen Effekt. Das Zooplankton reagierte noch deutlicher auf die Erwärmung: Die Copepoden-Larven, die Nauplien, schlüpfen pro Grad Temperaturerhöhung um bis zu 9 Tage früher. Die Auswirkungen waren fatal, denn die meisten Nauplien schlüpfen vor der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons. Sie fanden keine Nahrung und verhungerten. Damit fiel eine ganze Generation aus.

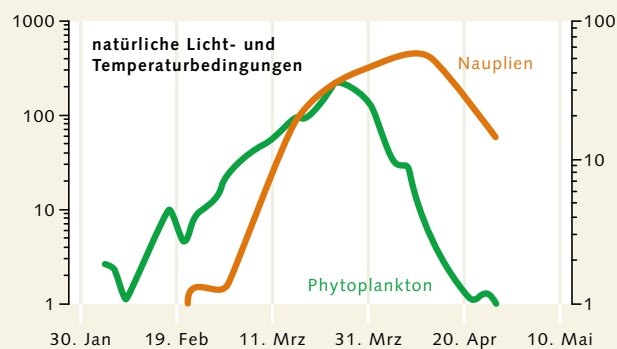
Nicht nur der Beginn der Frühjahrsblüte verschob sich aufgrund der Erwärmung. Auch die Gesamtbioasse des Phytoplanktons und seine Zusammensetzung änderte sich – zum Nachteil des Zooplanktons. Unter normalen Bedingungen dominierten großzellige Kiesel-

algen, die eine gute Nahrungsbasis für Copepoden sind. Unter wärmeren Bedingungen hingegen dominierten kleine **Flagellaten**. Copepoden können diese nur schlecht fressen. Die Folgen sind eindeutig: Die Tiere wachsen langsamer, sie produzieren weniger Eier und dadurch weniger Nachkommen.

Die Erwärmung des Wassers kann aber nicht nur für die Nahrungskette Phytoplankton – Zooplankton – Fisch negative Folgen haben. Sie wirkt sich auch auf die Speicherung des Klimagases CO₂ im Meer aus, auf die sogenannte biologische CO₂-Pumpe (siehe Kasten nächste Seite). Denn unter wärmeren Bedingungen verstärkt sich die Respiration von Zooplankton und Bakterien, also der Atemstoffwechsel, der CO₂ freisetzt. Dadurch wird das zunächst durch das Phytoplankton aufgenommene CO₂ wieder im Oberflächenwasser freigesetzt. Damit verringert sich der CO₂-Anteil, der in der Biomasse gebunden bleibt und als organische Substanz zum Meeresgrund absinkt und dort letztlich als Kohlenstoff am Boden eingelagert wird. Das ist vor allem deshalb problematisch, weil sich so ein fataler Rückkopplungsmechanismus des Klimawandels ergibt: Durch die Klimaerwärmung wird ein Mechanismus geschwächt, der der Atmosphäre bisher einen Teil des anthropogenen, klimaschädlichen CO₂ entzogen hat.

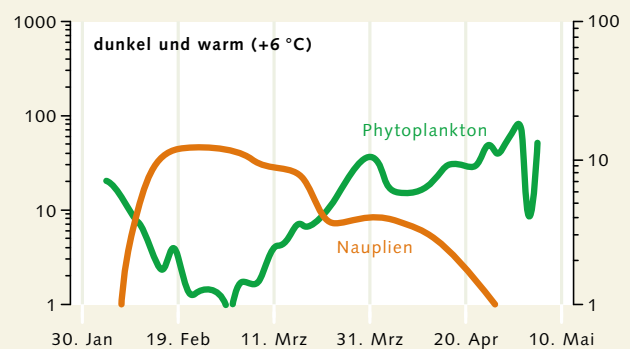
Menge Phytoplankton in Kohlenstoff
(Mikrogramm pro Liter)

Anzahl Nauplien
pro Liter



Menge Phytoplankton in Kohlenstoff
(Mikrogramm pro Liter)

Anzahl Nauplien
pro Liter



5.5 > Für gewöhnlich setzt die Vermehrung des Phytoplanktons (grüne Linie) mit dem zunehmenden Lichtangebot gegen Ende des Winters vor dem Schlüpfen der Zooplanktonlarven (Nauplien, rote Linie) ein. Damit steht den Zooplanktern beim Schlüpfen genug Nahrung zur Verfügung. Ist hingegen wenig Licht vorhanden und das Wasser um 6 Grad wärmer, schlüpfen die Zooplankter schon vor der Phytoplank-

tonblüte. Das ist fatal, denn in diesem Fall fehlt den Zooplanktonlarven die Nahrung. Sie verhungern. Das ist vor allem deshalb beunruhigend, weil Forscher zum Beispiel für die Ostsee genau dieses Szenario voraussagen: Aufgrund stärkerer Bewölkung dringt deutlich weniger Licht ins Wasser. Zugleich dürfte sich durch die Klimaerwärmung die Wassertemperatur erhöhen.

Die CO₂-Pumpe im Ozean

Der Begriff bezeichnet den Transport organischen Kohlenstoffs mittels Sedimentation in die Tiefen der Meere, wo er sich als Sediment ablagert. Zunächst bindet das Phytoplankton CO₂ im Rahmen der Photosynthese und wandelt es in organischen Kohlenstoff um. Der Großteil dieses Kohlenstoffs wird aber durch Respiration wieder freigesetzt, und zwar vom Phytoplankton selbst oder von Zooplanktern und Bakterien, die sich von lebendem oder abgestorbenem Phytoplankton ernähren. Findet die Respiration nahe der Wasseroberfläche statt, kann das freigesetzte CO₂ wieder an die Atmosphäre abgegeben werden. Nur ein winziger Teil der nahe der Meeresoberfläche produzierten organischen Masse sinkt ins Tiefenwasser, das nicht saisonal mit der Atmosphäre in Kontakt kommt, unterhalb der permanenten Sprungschicht. Nur dieser Teil des bei der Primärproduktion entstehenden organischen Kohlenstoffs bindet atmosphärisches CO₂ dauerhaft und wird als CO₂-Pumpe bezeichnet.

Eine wachsende Bedrohung: Harmful Algal Blooms

Harmful Algal Blooms (HABs, schädliche Algenblüten) sind Massenentwicklungen giftiger oder auf andere Art schädlicher Phytoplankter. Sicher ist, dass HABs weltweit zunehmen. Warum das so ist, weiß man bislang allerdings nicht ganz genau. Als Hauptursache gilt die Eutrophierung, die Überdüngung des Wassers mit Nährstoffen, aber auch der Klimawandel scheint eine Rolle zu spielen. Die schädlichen Algenblüten treten üblicherweise in den Sommermonaten auf, wenn die Wassersäule thermisch geschichtet ist: Eine erwärmte, leichte Oberflächenschicht liegt auf einer kälteren, schwereren Tiefenschicht. Der Temperaturgradient in der dazwischenliegenden Sprungschicht ist umso ausgeprägter, je wärmer das Oberflächenwasser ist.

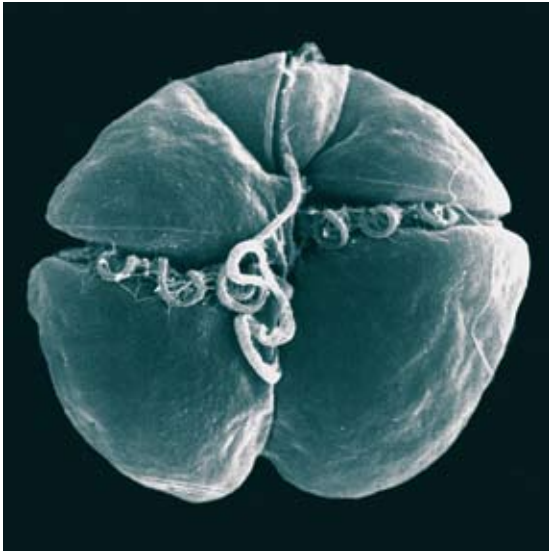
Ein größerer Temperaturgradient bedeutet, dass sich die Wassermassen an der Sprungschicht kaum durchmischen, da der Dichteunterschied, kalt und schwer zu warm und leicht, wie ein Widerstand wirkt. Daher gelangen kaum Nährstoffe aus der Tiefe an die Oberfläche. Sind die Nährstoffe an der Oberfläche durch das Phytoplanktonwachstum aufgezehrt, fehlt es also an Nachschub. Die für den Sommer charakteristische vertikale Trennung in eine Zone mit genug Licht und zu wenig Nährstoffen sowie eine Zone mit zu wenig Licht und ausreichend Nährstoffen



5.6 > Die stark nesselnde, für Menschen aber normalerweise nicht tödliche Leuchtqualle *Pelagia noctiluca* trat in den vergangenen Jahren gehäuft im Mittelmeer auf.

wird also durch die Sprungschicht verschärft. Hier haben große bewegliche Phytoplankter einen Vorteil. Sie können durch vertikale Wanderungen zwischen dem tiefen nährstoffreichen Wasser und den sonnendurchfluteten oberflächennahen Bereichen hin- und herwandern, wo sie Photosynthese betreiben. Hierzu gehören zahlreiche Dinoflagellaten und in der Ostsee vor allem auch Cyanobakterien, die ihr spezifisches Gewicht regulieren und wie ein Taucher auf- und absteigen können. Problematisch ist, dass es in beiden Gruppen zahlreiche toxische Arten gibt. Nehmen Muscheln diese Organismen auf, werden sie für den Menschen ungenießbar oder sogar tödlich.

Zum Teil geben die Planktonorganismen die Gifte auch direkt ins Wasser ab. In manchen Fällen sind diese sogar in Aerosolen nachweisbar – kleinen, in der Luft schwebenden Tröpfchen, die durch Wellenschlag in der Brandung entstanden sind. Ein besonders berüchtigter Vertreter ist der Dinoflagellat *Karenia brevis*, dessen regelmäßig vor Florida vorkommende Blüten Fischsterben, Muschelvergiftungen, Entzündungen bei Badenden und im Extremfall sogar Asthma bei Strandbesuchern verursachen. Fachleute schreiben die Häufung dieser Blüten der Klimaerwärmung zu. Wie erwähnt, gibt es auch unter den



5.7 > Der Dinoflagellat *Karenia brevis* kommt vor allem im Golf von Mexiko vor. Sein Nervengift Brevetoxin A kann beim Menschen zu Entzündungen und Asthmaanfällen führen.

Cyanobakterien zahlreiche giftige Stämme. Zwar wurden Untersuchungen bislang vor allem an Cyanobakterien durchgeführt, die im Süßwasser leben – insbesondere in Gewässern, aus denen Trinkwasser gewonnen wird oder in denen Badende durch dichte Cyanobakterienblüten gefährdet sind. Doch auch in der Ostsee wurden toxische Stämme verschiedener Cyanobakterien wie etwa *Nodularia spumigena* nachgewiesen.

Quallen werden zum Problem

Nicht nur HABs treten immer öfter massiv auf. Darüber hinaus beobachten Wissenschaftler zunehmende Massenvermehrungen bei Quallen. Die Folgen dieser explosionsartigen Vermehrungen sind bekannt: verletzte Badegäste, verstopfte Fischernetze, Nahrungskonkurrenz für Fische, Fraßdruck auf Fischeier und -larven. Die möglichen Ursachen dieser Massenvermehrungen sind durchaus umstritten. Ein wesentliches Problem ist vermutlich die Überfischung der Meere. Zooplankton fressende Fische sind Nahrungskonkurrenten der Quallen. Fehlen die Fische, bietet sich den Quallen ein reich gedeckter Tisch. Bekannt ist inzwischen auch, dass Quallen robuster als viele Fisch-



5.8 > Mikroskopisch kleine Ruderfußkrebse wie diese Calanus-Art sind weit verbreitet und gehören zu den wichtigen Nahrungsorganismen der Fische.

arten sind und deutlich niedrigere Sauerstoffkonzentrationen ertragen. Sauerstoffmangel im Meer wiederum tritt zunehmend infolge der Eutrophierung auf. Durch Eutrophierung bildet sich mehr Biomasse. Damit sinkt auch mehr organische Substanz ins Tiefenwasser ab, die dort von sauerstoffzehrenden Mikroorganismen abgebaut wird. Die Folge ist Sauerstoffmangel. Der Klimawandel kann diese Situation noch verschärfen, denn er führt zu einer Erwärmung der Meeresoberfläche. Dadurch werden Austauschprozesse verlangsamt, weil sich das sauerstoffreiche Oberflächenwasser weniger mit dem kalten Tiefenwasser mischt. Durch die Mikroorganismen in der Tiefe gezehrter Sauerstoff wird nur in geringem Maße ersetzt. Zunehmende Quallenplagen könnten somit die Folge kombinierter Stressoren sein.

Der Klimawandel wird also zu einer Neustrukturierung der pelagischen Lebensgemeinschaften führen, was Nachteile für die klassische Nahrungskette Phytoplankton – Zooplankton – Fische haben wird. Quallen hingegen werden davon profitieren. Es ist anzunehmen, dass die Überfischung und die Eutrophierung der Küstengewässer zudem synergistische Effekte haben werden, die die Situation weiter verschärfen.

Neue Arten in fremden Revieren

> Schon lange verfrachten Menschen Lebewesen von einem Teil der Welt in einen anderen – manchmal unbeabsichtigt, manchmal aber auch bewusst. Ganze Ökosysteme wurden dadurch bereits verändert. Der Klimawandel könnte diese Probleme verschärfen, denn mit der Erwärmung des Wassers könnten zuwandernde Arten häufiger gute Lebensbedingungen vorfinden.

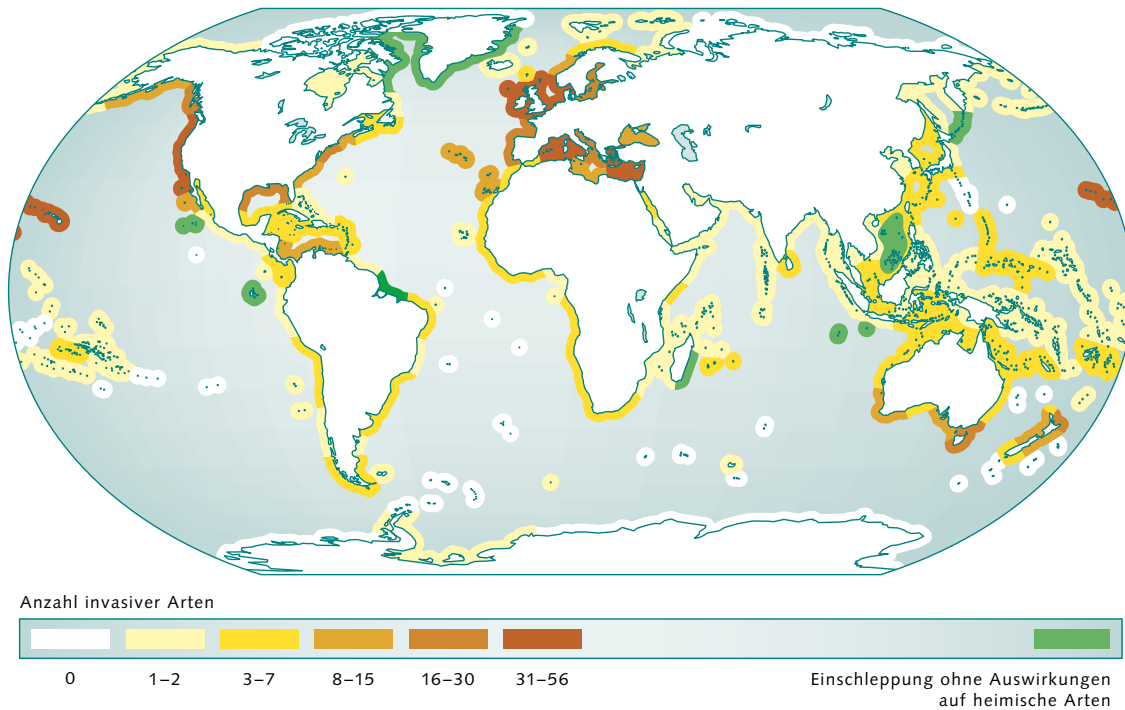
Die Ursachen der Verschleppung von Meeresorganismen

Seit Menschen die Meere befahren, reisen mit ihnen auch andere Arten um den Globus. Dabei handelt es sich nicht nur um nützliche Pflanzen und Tiere oder Schädlinge wie Krankheitserreger oder Ratten, sondern vor allem auch um Meeresorganismen. Historische Aufzeichnungen und archäologische Funde belegen, dass Segelschiffe der frühen Entdecker von bis zu 150 verschiedenen Meeresorganismen besiedelt waren, die auf oder in den hölzernen Rümpfen lebten oder Metallteile wie die Ankerkette als **Substrat** nutzten. Störte der Bewuchs, wurden die Lebewesen unterwegs abgekratzt. In anderen Fällen blieben die Organismen auf dem verrottenden Rumpf zurück, wenn ein Schiff nicht mehr zu reparieren war. Es überrascht deshalb kaum, dass viele holzbohrende Arten wie der Schiffsbohrwurm *Teredo navalis* heute weltweit verbreitet sind. Ob diese Arten schon vor Beginn der europäischen Entdeckungsreisen Kosmopoliten waren, lässt sich heute allerdings nicht mehr feststellen. Wie der Mensch zur Ausbreitung vieler Arten beiträgt, weiß man aber sehr genau. Durch Globalisierung, Handel und Tourismus werden immer mehr Meeresorganismen über die Ozeane transportiert. Es wird geschätzt, dass allein in den Ballastwassertanks von Frachtern, die den Schiffen Gleichgewicht verleihen, ständig mehrere Zehntausend verschiedene Arten zwischen geographisch weit entfernten Regionen unterwegs sind. Die meisten dieser Exoten sterben während der Reise oder am Zielort, und von den Überlebenden schafft es nur ein Bruchteil, sich erfolgreich zu vermehren und eine neue **Population** aufzubauen. Doch, wie eine Untersuchung in sechs Häfen in Nordamerika, Australien und Neuseeland zeigte, etabliert sich trotz aller Hinder-

nisse ein- bis zweimal pro Jahr an jedem der untersuchten Orte eine neue Art erfolgreich.

Geographische Barrieren können auch durch Kanäle überwunden werden. So sind bereits mehr als 300 Spezies durch den Suezkanal aus dem Indischen Ozean ins Mittelmeer eingewandert. Darüber hinaus werden Flüsse und andere Wasserstraßen für den Artenaustausch, wie etwa zwischen der Ostsee und dem Schwarzen Meer, verantwortlich gemacht. Eine weitere wichtige Ursache für die Verschleppung von Meeresorganismen ist der Handel mit lebenden Meeresorganismen für die Aquakultur, die Aquaristik oder die Nahrungsmittelindustrie.

Fachleute teilen die Küstengewässer der Welt in insgesamt 232 Ökoregionen auf, die entweder durch geographische Barrieren wie etwa Landbrücken voneinander getrennt sind oder sich durch unterschiedliche Umweltbedingungen wie etwa den Salzgehalt deutlich voneinander unterscheiden. Wie eine Analyse aus dem Jahr 2008 ergab, wurden durch den Menschen bereits in mindestens 84 Prozent dieser 232 Ökoregionen neue Arten eingeschleppt. Untersuchungen in Nord- und Ostsee haben ergeben, dass sich dort jeweils mindestens 80 bis 100 exotische Arten etablieren konnten. In der Bucht von San Francisco wurden bereits sogar 212 fremde Arten nachgewiesen, und für die Hawaii-Inseln geht man davon aus, dass etwa ein Viertel der ohne Mikroskop zu erkennenden Meeresorganismen eingeschleppt sind. Über die Verbreitung von Mikroorganismen und anderen Lebewesen, die sich nur schwer bestimmen lassen, weiß man aber noch relativ wenig. Lückenhaft sind die Bestandsaufnahmen auch für viele Meeresgebiete, die sich nur schwer erreichen lassen. Fachleute gehen grundsätzlich davon aus, dass sich fremde Organismen künftig durch die Klimaerwärmung in manchen Regionen noch besser etablieren



5.9 > In bestimmten Küsten-Ökoregionen der Erde machen sich invasive Arten besonders häufig breit. Betroffen sind vor allem die gemäßigten Breiten. Regionen, in denen Einwanderer heimische Arten nicht beeinträchtigen oder verdrängen, sind grün markiert.

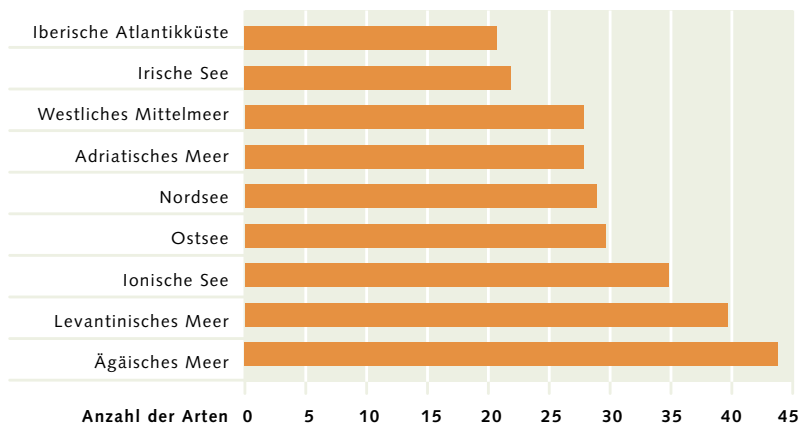
können. Wärme liebende Lebewesen aus Südostasien zum Beispiel könnten dann auch in Gebieten Fuß fassen, die bislang für sie zu kalt waren.

Neue Arten verändern die Biodiversität

Viele Exoten fügen sich in die einheimische Flora und Fauna ein, ohne diese zu dominieren. Damit erhöhen sie die Vielfalt der Artengemeinschaft. Durch Naturkatastrophen können mitunter Lebensräume völlig zerstört werden und ganze Artengemeinschaften aussterben. In solchen Fällen entwickelt sich in den betroffenen Regionen häufig durch Neueinwanderung ein ganz neues Artengefüge. Ein Beispiel dafür ist die Ostsee, die erst nach der letzten Eiszeit – also in erdgeschichtlich jüngster Zeit – entstand und in ihrer heutigen Form als Brackwassermeer nur etwa 7000 Jahre alt ist. Dort hat sich mit der Alge *Fucus radicans* nur eine einzige Art evolutiv entwickelt. Alle anderen heute heimischen Arten sind aus Lebensräumen wie der Nordsee oder dem Weißen Meer eingewandert. Die Artenwanderung ist also nicht immer problematisch oder durch den Menschen verursacht.

Seit Christoph Kolumbus 1492 Amerika erreichte, hat der Austausch zwischen weit entfernten Erdteilen ständig zugenommen. Damit wird es immer wahrscheinlicher,

dass es Arten gelingt, auch solche Ökoregionen zu erreichen, die weit von ihrem natürlichen Herkunftsgebiet entfernt sind. Mitunter können neue Arten dann zum Problem werden. Sie verdrängen heimische Arten und können damit die Biodiversität, die Artenvielfalt, verringern. Das kann besonders dann passieren, wenn es am neuen Standort keine Feinde für sie gibt. Die australische Grünalge *Caulerpa taxifolia* zum Beispiel hatte 15 Jahre nach ihrer ersten Entdeckung bei Monaco bereits 97 Prozent aller geeigneten Böden zwischen Toulon und Genua überwachsen und sich bis in die nördliche Adria und nach Sizilien ausgebreitet. Die Alge bildet Abwehrstoffe, die sie für die meisten Pflanzenfresser ungenießbar macht. Organismen aber, die sich von *Caulerpa* ernähren und an die Abwehrstoffe angepasst sind, fehlen im Mittelmeer. Auch die asiatischen Algen *Sargassum muticum* und *Gracilaria vermiculophylla* bildeten nach ihrer Einschleppung nach Europa an manchen Küsten monokulturähnliche Bestände. Der nordpazifische Seestern *Asterias amurensis* wiederum etablierte sich Mitte der 1980er Jahre in Südostaustralien. Zwei Jahre nach seiner ersten Entdeckung in Port Philipp Bay, einer großen Bucht vor Melbourne, zählte man dort bereits mehr als 100 Millionen Exemplare. Auch für den Seestern gab es in seinem neuen Lebensraum so gut wie keine Feinde, sodass er einheimische Seesterne,



5.10 > Anzahl ökologisch oder wirtschaftlich problematischer eingeschleppter Arten in besonders betroffenen Meeresregionen Europas.

Muscheln, Krebse und Schnecken stark dezimieren konnte. Die Biomasse der Seesterne übertraf schließlich sogar die Gesamtmenge aller in der Region gefischten Meerestiere.

In 78 Prozent der 232 Küsten-Ökoregionen der Welt wurden bereits derartige Fälle nachgewiesen, in denen neu eingeschleppte Arten einheimische Arten verdrängten. Besonders aus den gemäßigten Breiten, jenen Gebieten der Erde, in denen es weder besonders heiß noch kalt ist, sind viele Fälle bekannt. Abgesehen von Hawaii und Florida liegen die 20 am stärksten von eingeschleppten Meeresorganismen heimgesuchten Küsten-Ökoregionen ausschließlich im gemäßigten Nordatlantik und Nordpazifik oder in Südaustralien, und immerhin neun dieser Regionen liegen in Europa. Standorte wie die Bucht von San Francisco werden inzwischen von eingeschleppten Arten dominiert. Dort werden die fremden Spezies immer öfter als eine Bedrohung für die marine Biodiversität betrachtet, obwohl bisher noch kein einziger Fall bekannt geworden ist, in dem eingeschleppte Arten zum Aussterben einheimischer Organismen geführt hätten.

Die wirtschaftlichen Folgen der Einschleppung fremder Arten

Eingeschleppte Meeresorganismen können der Fischerei wirtschaftliche Einbußen beschern. So hat die aus Ame-

rika stammende Rippenqualle *Mnemiopsis leidyi* vor 25 Jahren zum Zusammenbruch der Küstenfischerei im Schwarzen Meer geführt, das zu jener Zeit bereits durch Überfischung und Eutrophierung ökologisch geschwächt war. 1982 wurden dort erstmals Exemplare gesichtet, die wahrscheinlich mit Ballastwasser eingeschleppt worden waren. Die Art breitete sich rasch aus und verdrängte dabei einheimische Arten, insbesondere Fische, von deren Eiern und Larven sie sich ernährte. Die Erträge der Fischerei brachen um fast 90 Prozent ein. 1989 zählte man dort mit 240 Exemplaren pro Kubikmeter Wasser die meisten *M. leidyi* weltweit. Erst die unbeabsichtigte Einführung der Rippenqualle *Beroe ovata*, eines Fressfeinds, konnte die Population zurückdrängen und eine Erholung der Fischbestände ermöglichen. Auch an der nordamerikanischen Ostküste machen eingeschleppte Arten Probleme. Dort verursachte die europäische Strandkrabbe *Carcinus maenas* Ertragsrückgänge in der Muschelfischerei.

Gelegentlich geht von neu eingewanderten Meeresorganismen sogar eine Gefahr für die Gesundheit des Menschen aus. Ein Beispiel sind die Mikroalgen der Gattung *Alexandrium*, die Nervengifte bildet. *Alexandrium*-Arten wurden in letzter Zeit an vielen Küsten entdeckt, an denen sie vor wenigen Jahrzehnten wahrscheinlich noch nicht vorgekommen waren. Solche Phänomene können durchaus negative Folgen für den Tourismus haben.

Fremde Arten werden nicht nur im Ballastwasser von Schiffen über die Meere transportiert. Häufig siedeln Unternehmer aus anderen Ländern stammende marine Organismen für die Zucht in Aquakulturen in artfremden Lebensräumen an. Dies mag kurzfristig wirtschaftliche Gewinne bringen. Es besteht aber die Gefahr, dass die importierte Art einheimische verdrängt und so mittel- oder langfristig zu ökonomischen oder ökologischen Schäden führt. Studien haben ergeben, dass von 269 untersuchten eingeschleppten Meeresorganismen immerhin 34 Prozent bewusst für die Zucht in Aquakulturen importiert worden sind. Ein Beispiel ist die Japanische Riesenauster *Crassostrea gigas*, die in mindestens 45 Ökoregionen angesiedelt wurde und in diesen heimisch geworden ist. Insbesondere zwischen 1964 und 1980 wurden große Mengen von Saataustern nach Europa importiert. Die ökologischen Auswirkungen waren in vielen Fällen verheerend. In Nordamerika und Australien bildet die Riesen-

auster dichte Bestände, die die einheimischen Arten verdrängen. Häufig bewirken die Muscheln außerdem eine Eutrophierung der Küstengewässer, da sie unverdauliche Partikel mit einem selbst produzierten Schleim ausscheiden – eine zusätzliche organische Belastung des Wassers. Auch in Frankreich wurde beobachtet, dass Riesenaustern zur Verschmutzung der Gewässer führen. Außerdem wurde ein Rückgang des Zooplanktons und auch größerer Tiere beobachtet. In den Niederlanden und in Deutschland neigt die Riesenauster dazu, auf Miesmuschelbänken zu siedeln. Damit verdrängt sie eine traditionell fischereilich genutzte Art.

Man nimmt an, dass neben der Riesenauster mindestens 32 weitere Arten unbeabsichtigt in die Nordsee eingeführt wurden – darunter die Pantoffelschnecke *Crepidula fornicata* und die Alge *Gracilaria vermiculophylla*, die sich beide als ökologisch problematisch erwiesen. Um künftig derartige Schäden zu vermeiden, könnte ein einheitliches Bewertungssystem hilfreich sein. Mit diesem könnte man einschätzen, wie groß das Potenzial einer Art ist, andere Organismen zu verdrängen. Zudem könnte man damit abwägen, welche Vor- und Nachteile die Einführung einer fremden Art in einen Lebensraum hat.

Seit geraumer Zeit versuchen Experten durch Vergleiche zwischen problematischen und harmlosen eingeschleppten Arten Eigenschaften zu identifizieren, die auf ein hohes Verdrängungspotenzial hinweisen. So schwimmen beispielsweise manche Algenarten auf, während andere absinken. Davon hängt ganz entscheidend ab, ob die Art verdriftet und sich ausbreiten kann. Bislang ist es aber schwierig, von einzelnen Eigenschaften einer Art auf ihr Verdrängungspotenzial zu schließen. Daher wird es vielleicht niemals möglich sein, eine sichere Vorhersage über das Verhalten einer Art an einem neuen Standort zu machen, weil zahlreiche Einflussgrößen eine Rolle spielen. Erschwert wird die Vorhersage dadurch, dass sich eine neue Art über einen längeren Zeitraum und mehrere Phasen im neuen Lebensraum etabliert: Auf eine Expansionsphase, in der sich die Art stark verbreitet, folgt meist zunächst ein Rückgang, ehe sich die Art völlig an den neuen Lebensraum angepasst hat. Will man das Verdrängungspotenzial einer Art korrekt einschätzen, muss man wissen, in welcher dieser Phasen sich die Art gerade befindet. Das aber lässt sich nur schwer feststellen.

Maßnahmen gegen die Arteinschleppung

Im Jahr 2004 wurde von der IMO (International Maritime Organization, Internationale Seeschiffahrts-Organisation) eine Konvention zur Ballastwasserbehandlung verabschiedet. Die Erstunterzeichnerstaaten, die zusammen für etwa ein Viertel des weltweiten Seeverkehrs verantwortlich sind, verpflichteten sich, in ihren Seehäfen Anlagen zur Behandlung von Ballastwasser zu installieren. 2016 sind solche Anlagen auch an Bord von Schiffen vorgeschrieben. Verstärkt wird die internationale Zusammenarbeit auch durch die Initiativen des ICES (International Council for the Exploration of the Sea, Internationaler Rat für Meeresforschung), der Mitte der 1990er Jahre einen Verhaltenskodex zum Umgang mit exotischen Arten in der Aquakultur verabschiedete und unter anderem Quarantänemaßnahmen empfahl. Der gemeinsame europäische Markt hat den Artenaustausch zwischen den Mitgliedstaaten der EU erleichtert. Der Transport von Saataustern beispielsweise hat als Ursache der Arteinschleppung innerhalb der EU inzwischen eine ähnliche Bedeutung wie das Ballastwasser. Zugleich wurde der Import von Austern aus Nicht-EU-Gebieten weitgehend eingestellt. Die internationale Zusammenarbeit innerhalb der EU hat also einerseits den Schutz vor Arteinschleppung aus außereuropäischen Bioregionen verbessert, andererseits aber den Artenaustausch zwischen den verschiedenen Bioregionen der EU eher verstärkt.

Lassen sich Einschleppungen künftig vermeiden?

Beim Umgang mit exotischen Meeresorganismen ist Vorsicht geboten, denn Arteinschleppungen ins Meer sind meist irreversibel. Eine mechanische Beseitigung bereits etablierter Arten ist praktisch unmöglich. Sie würde aufwendige Taucheinsätze erfordern. Viele Arten durchleben mikroskopische Überdauerungs- oder Larvenstadien, in denen sie frei schwimmen. In solchen Phasen entziehen sich die Organismen völlig der Kontrolle. Es ist denkbar, natürliche Feinde im neuen Lebensraum anzusiedeln, aber auch diese Organismen könnten sich später als Bedrohung erweisen. Politik und Umweltmanagement werden daher verstärkt die wesentlichen Ursachen der Arteinschleppung kontrollieren müssen. Wichtig wäre dabei eine möglichst lückenlose Überwachung, etwa von Aquakulturen oder Ballastwasser. Alleingänge auf nationaler oder lokaler Ebene dürften aber kaum von Erfolg gekrönt sein. Aussichtsreicher sind internationale Strategien, die von allen Anrainern einer Ökoregion getragen werden.

Die Rolle der biologischen Vielfalt im Meer

> Lange Zeit war unklar, inwieweit die biologische Vielfalt im Meer von Bedeutung ist. Inzwischen gilt als sicher, dass sie ein Ökosystem funktionstüchtig und leistungsfähig hält. Außerdem macht sie Lebensräume widerstandsfähiger gegen Umweltveränderungen. Doch das eingespielte Artgefüge gerät mehr und mehr durcheinander.

Das schnelle Verschwinden der Arten

Seit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert hat die biologische Vielfalt im Meer dramatisch abgenommen. Die Hauptursachen für den Verlust sind die Zerstörung von Lebensräumen durch Schleppnetzfisherei, die Verschmutzung und Überdüngung der Meere sowie der voranschreitende Klimawandel. Die biologische Vielfalt schrumpft dabei vermutlich schneller als jemals zuvor in der Erdgeschichte. Gleichzeitig kennt man nur einen Bruchteil der Arten in der Tiefsee oder den Polarmeeren, sodass der Artenverlust im Meer noch weniger als der an Land erfasst und bewertet werden kann.

Warum ist biologische Vielfalt im Meer wichtig?

Jedes Ökosystem erbringt bestimmte Leistungen, die für Lebewesen essenziell sind. Eine der bedeutendsten Leistungen von Meeresökosystemen ist der Aufbau pflanzlicher Biomasse aus Sonnenlicht und Nährstoffen (Primärproduktion), die Nahrungsgrundlage aller anderen Arten im Meer und letztlich auch des Menschen ist. Etwa die Hälfte der weltweiten Primärproduktion geht auf mikroskopisch kleine Pflanzen zurück, das Phytoplankton im Meer, das wächst und sich teilt. Eine weitere Ökosystemleistung ist die Bildung von Lebensräumen, sogenannten Strukturen, in Küstenökosystemen. So bilden Großalgen, Seegras oder Korallen großräumige unterseeische Wälder, Unterwasserwiesen oder Riffe, die Lebensraum für viele weitere Arten wie Schnecken, Krebse und Fische sind. Die Algenwälder und Seegraswiesen in der Ostsee sind lebenswichtige **Habitats** für Fischbrut und Jungfische, die hier heranwachsen, bevor sie als Erwachsene ins offene

Meer schwimmen. Schnecken und kleine Krebse wiederum weiden von den Großalgen oder vom Seegras aufwachsende Mikroalgen ab. Damit stellen sie sicher, dass die strukturbildenden Pflanzen nicht überwuchert werden und ausreichend wachsen können – das ist ihre Ökosystemleistung. Die mikroalgenfressenden Schnecken und Krebse selbst sind Nahrungsgrundlage größerer räubernder Krebse und Fische.

Da Seegras und Großalgen langlebig und eine schlechte Futterquelle für weidende Krebse und Schnecken sind, werden sie recht alt. Sie speichern in ihrer Biomasse für lange Zeit Nährstoffe wie Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die aus der Landwirtschaft durch die Flüsse ins Meer gespült werden. Seegras und Großalgen fungieren daher in Küstenökosystemen als eine Art biologische Kläranlage.

Wissenschaftler haben sich gefragt, ob der dramatische Verlust der biologischen Vielfalt Konsequenzen für das stabile Funktionieren von Ökosystemen hat. Diese Frage kann nach zehn Jahren intensiver Forschung mit einem klaren Ja beantwortet werden. Vor allem Experimente in Küstenökosystemen wie Seegraswiesen oder Großalgenwäldern haben gezeigt, dass die biologische Vielfalt im Meer unerlässlich ist, um die oben erwähnten Ökosystemleistungen aufrechtzuerhalten. In diesen Experimenten wurde auf unterschiedliche Weise die Artenvielfalt verringert, um die Ökosystemleistungen von artenreichen und artenarmen Gebieten miteinander zu vergleichen. In einem Freilandexperiment wurde beispielsweise die Anzahl der Großalgenarten künstlich reduziert, indem man einige zu Beginn der Wachstumsperiode entfernte. Tatsächlich verringerte sich in diesem artenarmen Lebensraum die Algenbiomasse insgesamt – und damit auch die Nahrung für die Konsumenten sowie die Zahl der verfüg-



5.11 > In Kelpwäldern, wie diesem vor Kalifornien, leben Hunderte Fischarten, unter anderem der gelbliche Greenie, *Sebastes flavidus*.

baren **Habitats**. In einem anderen Experiment wurde die Artenanzahl der Weidegänger reduziert, welche die auf dem Seegras wachsenden Mikroalgen abweiden. Es stellte sich heraus, dass artenarme Weidegängergemeinschaften insgesamt weniger Mikroalgen abgrasen als artenreiche. Letztlich führte der Artenverlust zu verringertem Seegraswachstum, weil die aufwachsenden Mikroalgen die Photosynthese des Seegrases behindern. Die Experimente zeigen, dass sich die Verminderung der biologischen Vielfalt in beiden Fällen negativ auf die Strukturen des Lebensraums auswirkt – ganz gleich, ob man die Artenzahl der Produzenten, der Großalgen, oder die der Konsumenten wie beispielsweise der Weidegänger verringert.

Wie funktioniert biologische Vielfalt?

Verschiedene Arten haben unterschiedliche physikalische und biologische Ansprüche. Genau damit lassen sich die positiven Effekte biologischer Vielfalt erklären. So gibt es Algenarten, die optimal unter starker Lichteinstrahlung wachsen, während andere Schwachlicht bevorzugen. Das

führt dazu, dass die eine Algenart dem Licht entgegenwächst und eine Algenkrone ähnlich wie eine Baumkrone bildet, während die andere optimal darunter im Schatten wächst. Dies hat zwei Konsequenzen: Erstens können beide Arten stabil zusammenleben, ohne sich gegenseitig zu verdrängen. Zweitens nutzen beide Arten zusammen das Licht optimal aus. Sie bilden gemeinsam mehr Nahrung für andere Arten als eine Art allein. Diese komplementäre Nutzung der vorhandenen Ressourcen, der sogenannte Komplementaritätseffekt, ist ein wichtiges positives Charakteristikum biologischer Vielfalt.

Andererseits wird eine Ökosystemleistung wie das Abweiden von Seegras häufig von einzelnen sehr effektiven Arten erbracht. Ein Beispiel: Wirbellose Algenfresser wie etwa Asseln und Schnecken unterscheiden sich in ihrer Nahrungspräferenz. Weidende Schnecken haben eine kräftige Raspelzunge und weiden damit vorzugsweise flache Mikroalgenrasen ab, während Asseln eher hoch wachsende fadenförmige Algen bevorzugen. Ist die Algenflora auf Seegrasblättern von flach wachsenden Mikroalgen dominiert, wird das Seegras hauptsächlich von den

Kelpwald

Als Kelpwald bezeichnet man dichte Algenwälder, in denen die Kelpalgen dominieren. Dabei handelt es sich um teils mehrere Meter lange dünne Braun- und Rotalgen. Kelpwälder kommen vor allem an der Westküste Amerikas, an der Küste Argentiniens, vor der Westküste Afrikas sowie vor Australien und Neuseeland vor. Sie sind einzigartige Ökosysteme mit charakteristischen Artengemeinschaften.

Schnecken beweidet. Enthält das Wasser viele Nährstoffe, dominieren eher fädige Algen, und Asseln halten das Seegras von Algen frei. Welche der beiden Arten diese Leistung übernimmt, hängt also von der jeweiligen Umweltbedingung ab. Wird eine Ökosystemleistung hauptsächlich durch eine Art und nicht von mehreren gleichzeitig erbracht, spricht man vom Selektionseffekt. Die jeweilige Umwelt selektiert sozusagen die momentan optimal funktionierende Art.

Wichtig ist nicht allein die Anzahl der Arten. Von Bedeutung ist auch, wie viele Individuen der verschiedenen Arten vorkommen beziehungsweise welche Art dominant ist. Der Selektionseffekt bewirkt, dass sich natürliche Gemeinschaften meist aus wenigen dominanten und vielen seltenen Arten zusammensetzen. Unter stabilen Umweltbedingungen werden Ökosystemleistungen, wie der Aufbau von Pflanzenbiomasse, deshalb häufig durch einzelne dominante Arten mit optimalen Merkmalen aufrechterhalten. Die vielen seltenen Arten spielen hierbei zunächst eine untergeordnete Rolle. Ändern sich aber die Umweltbedingungen, sind sie häufig am Zug. So kann eine zuvor noch unbedeutende Art plötzlich zur vorherrschenden werden.

Auch im Meer dominieren an einem Standort oft sehr wenige Arten. Es gibt sogar Extremfälle, in denen eine einzige Art überwiegt. Zu diesen Ökosystemen zählen unter anderem Seegraswiesen oder Kelpwälder. Hier wird die biologische Vielfalt nicht durch den Artenreichtum, sondern durch die genotypische Vielfalt der Seegraspflanzen derselben Art gewährleistet: Zwar gehören alle Pflanzen zur selben Spezies, in ihrem Erbgut aber gibt es versteckte Unterschiede.

Wie anderswo die Artenvielfalt hält in der Seegraswiese die genotypische Vielfalt die Ökosystemleistung aufrecht – also die unsichtbaren genetischen Unterschiede zwischen den Individuen derselben Art. So zeigten Seegraswiesen, in denen man experimentell mehrere verschiedene Genotypen zusammen anpflanzte, höhere Sprossdichten und eine höhere Gesamtbiomasse. Darüber hinaus erhöhte sich auch die Zahl der Weidegänger. Durch die vergrößerte genotypische Vielfalt verbesserte sich folglich insgesamt die Ökosystemleistung Nahrungsproduktion. Es stand mehr Seegras zur Verfügung und auch für räubernde Fische verbesserte sich das Nahrungsangebot, weil es

viele Weidegänger gab. Mehr noch: Selbst die Widerstandskraft von Ökosystemen gegenüber bestimmten Störungen und Umweltveränderungen kann durch genotypische Vielfalt verbessert werden. So erholte sich ein Seegrasgebiet mit hoher genotypischer Vielfalt nach einer ungewöhnlichen Hitzewelle schneller als Gebiete mit niedriger Vielfalt.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels wird vermutlich die Vielfalt der seltenen Arten oder Genotypen erheblich an Bedeutung gewinnen. Diese sind eine potenzielle „biologische Versicherung“ für die Aufrechterhaltung von Ökosystemleistungen. Sie können noch unbekannte Merkmale oder genetische Informationen besitzen, die sie unter den neuen Umweltbedingungen anpassungsfähig und damit widerstandsfähiger und produktiver machen als die ursprünglich dominanten Arten oder Genotypen.

Wie gefährdet ist die biologische Vielfalt?

Durch rapide Veränderungen von Wassertemperatur, Salzgehalt und der Nährstoffkonzentration, aber auch durch Überfischung, Lebensraumzerstörung und eingeschleppte Arten wird die biologische Vielfalt im Meer weltweit mit wachsender Geschwindigkeit verloren gehen. Daran gibt es keinen Zweifel: In der Summe sind die Störungen so groß, dass weitere Arten verschwinden werden. Damit verringert sich auch die stabilisierende Wirkung der ehemals vielfältigen Lebensgemeinschaften, was zu gefährlichen Effekten führen kann – zu Lebensräumen, die ihre Ökosystemleistung nicht mehr erbringen können oder an Widerstandskraft verlieren. So verwandeln sich Korallenriffe mit hoher biologischer Vielfalt durch Überfischung und Nährstoffeintrag in artenarme Lebensräume, in denen wenige Algenarten dominieren. Es fehlt an Riffischen, die die Korallen ursprünglich von aufwachsenden Algen frei gehalten haben, sodass sich nun keine neuen Korallenlarven ansiedeln können.

Die europäischen Blasentangwälder wiederum werden durch artenarme Lebensgemeinschaften verdrängt, die von Fadenalgen dominiert sind. Fadenalgen aber sind ein schlechter Lebensraum für Jungfische und andere Organismen. Zum einen produzieren sie weniger Sauerstoff, zum anderen speichern sie Nährstoffe zudem nur kurzfristig, da sie anders als Blasentangwälder vergleichsweise

kurzlebig sind und gern von Schnecken und Krebsen gefressen werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Fadenalgen und die aufgrund der nun höheren Nährstoffkonzentrationen im Meerwasser massiv wuchernden Phytoplanktonblüten die frischen Tangkeimlinge beschatten. Im Ergebnis wird deren Wachstum nachhaltig behindern. Das Verschwinden einer Art, wie in diesem Fall des

Blasentangs *Fucus vesiculosus*, der wichtige Ökosystemstrukturen schafft, kann also die Umweltbedingungen und damit auch den Lebensraum für andere Arten zu deren Nachteil verändern. In letzter Konsequenz führt das dazu, dass die biologische Vielfalt noch weiter schwindet und das Ökosystem seine Leistung künftig nicht mehr erbringen kann.

CONCLUSIO

Die Folgen des Klimawandels für die biologische Vielfalt im Meer

Der globale Klimawandel wird zwangsläufig dazu führen, dass sich in den kommenden Jahrzehnten und Jahrhunderten zahlreiche Umweltvariablen mehr oder weniger gleichzeitig verändern. Wie stark einzelne Arten und Lebensgemeinschaften davon betroffen sein werden, hängt von verschiedenen Einflussgrößen ab. Noch kann niemand sicher abschätzen, inwieweit sich die Lebensbedingungen in verschiedenen marinen Ökosystemen regional verändern werden. So könnten antarktische Planktonalgen von einer Meerwassererwärmung sogar profitieren und Süßwasser liebende Arten in der östlichen Ostsee von der Aussüßung ihres Lebensraums. In manchen Lebensräumen wird die Einwanderung fremder Spezies möglicherweise sogar eine Zeit lang die Artenvielfalt erhöhen. In den meisten Fällen jedoch wird die Verschiebung von Umweltgemeinschaften zu Stress führen, der die Toleranz der Organismen übersteigt. So wird der an Kaltwasser angepasste Blasentang an seinem südlichen Verbreitungsrand vor Portugal durch die künftige Erwärmung wohl über seine Toleranzgrenzen hinaus gestresst werden. Dieser abiotische Stress könnte auch dadurch verschärft werden, dass die Veränderungen schneller eintreten, als sich die Art daran anpassen kann. Arten, die sich an die abiotischen Veränderungen nicht anpassen können, werden sich in günstigere Habitate zurückziehen müssen, um zu bestehen. Können sie sich aber nicht schnell genug

oder hinreichend verbreiten oder in ihrer neuen Lebensgemeinschaft behaupten, werden sie aussterben. In beiden Fällen sind lokale Artverschiebungen zu erwarten. Sensitive Arten verschwinden, opportunistische, anpassungsfähigere Arten hingegen werden häufiger. Zu diesen gehören auch viele eingeschleppte Spezies. Die Neustrukturierung des Artenmenüs einer Lebensgemeinschaft kann letztlich auch die Funktionalität der Gemeinschaft verändern. Welche Ökosystemleistungen die marinen Lebensgemeinschaften in Zukunft erbringen werden, ob sie die bislang existierenden besser oder schlechter ausüben, ob bislang erbrachte Leistungen völlig verschwinden oder sich nur jahreszeitlich oder räumlich verlagern, hängt davon ab, ob die ökologischen Funktionen einer verschwindenden Art durch andere bereits vorhandene oder neu eingeschleppte Arten ersetzt werden können. In einzelnen Fällen mögen Ökosysteme die regionale Veränderung der Artengemeinschaft beispielsweise durch Zuwanderung verkraften. Global gesehen aber werden Arten verloren gehen und Ökosysteme ihr Gesicht verändern. Welche Konsequenzen der Ausfall einer Art haben kann, zeigt eindrucksvoll das klassische Beispiel des in Kelpwäldern heimischen Seeotters. Seeotter ernähren sich unter anderem von Seeigeln, die Kelptange fressen. Da die Seeotter in manchen Gebieten intensiv bejagt wurden, konnten sich die Seeigel explosionsartig vermehren und die Kelpwälder großräumig zerstören. Damit veränderte sich nicht nur der Lebensraum, sondern mancherorts sogar die Strömung in Küstennähe.

Abbildungsnachweis

S. 100–101: David B. Fleetham/SeaPics.com, Abb. 5.1: nach Wahl, Abb. 5.2: Laurie Campbell/NHPA/Photoshot/dpa Picture-Alliance, Abb. 5.3: maribus, Abb. 5.4: nach Wahl, Abb. 5.5: nach Sommer, Lengfellner et al. (in prep.), Abb. 5.6: David B. Fleetham/SeaPics.com, Abb. 5.7: www.learner.org/jnorth/tm/manatee/RedTide.html, Abb. 5.8: Arco/NPL Kim Taylor, Abb. 5.9: nach Molnar et al. (2008), Abb. 5.10: nach Molnar et al. (2008), Abb. 5.11: David Wrobel/SeaPics.com

Reproduktion, Übersetzung in fremde Sprachen, Mikroverfilmung und elektronische Verarbeitung sowie jede andere Art der Wiedergabe nur mit schriftlicher Genehmigung der maribus gGmbH. Sämtliche grafischen Abbildungen im „World Ocean Review“ wurden von Walther-Maria Scheid, Berlin, exklusiv angefertigt. Im Abbildungsverzeichnis sind die ursprünglichen Quellen aufgeführt, die in einigen Fällen als Vorlage gedient haben.

Impressum

Gesamtprojektleitung: Jan Lehmköster

Redaktion: Tim Schröder

Lektorat: Dimitri Ladischensky

Redaktionsteam Exzellenzcluster: Dr. Kirsten Schäfer, Dr. Emanuel Söding, Dr. Martina Zeller

Gestaltung und Satz: Simone Hoschack

Bildredaktion: Petra Kossmann

Grafiken: Walther-Maria Scheid für maribus

ISBN der Printversion: 978-3-86648-000-1

Herausgeber: maribus gGmbH, Pickhuben 2, 20457 Hamburg

www.maribus.com