

Sauer macht traurig

Das Kohlendioxid aus unseren Auspuffen und Schloten verschwindet zu einem Drittel in den Ozeanen. Hier wird es zu Kohlensäure, die das Wasser immer saurer macht. Ein Großexperiment im Nordmeer bei Spitzbergen lässt wenig Gutes erahnen

Von Tim Schröder

Mare, No. 95, Dezember 2012/Januar 2013

Vermutlich sind sie die größten Plastiksäcke, die derzeit in den Meeren treiben. 25 Meter tief ragen sie hinab. Zwei Meter breit sind sie, reißfester als dicke Mülltüten und durchscheinend wie Frischhaltefolie. „Mesokosmen“ nennt Ulf Riebesell seine riesigen Kunststoffschläuche, die wohl ungewöhnlichsten Versuchsgeräte, die die Meeresforschung derzeit zu bieten hat. Sie hängen an einem Alugestänge mit quietschenden Schwimmkörpern. Der Meeresbiologe des Kieler Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung sperrt darin Meerwasser wie in einem Aquarium ein. 55000 Liter in einer Plastikwurst. Für gewöhnlich verfrachtet man Meeresgetier in Aquarien an Land, um es zu studieren. Mit den Mesokosmen aber kommt das Aquarium zu den Lebewesen ins Meer. Das Experiment ist einzigartig. In der Kunststoffhülle schließen die Forscher das Wasser mitsamt seiner Bewohnerschaft, den Algen, Kleinkrebsen und Fischlarven, für mehrere Wochen ein, um sie vor Ort zu beobachten. „Es ist ein Heidenaufwand, die Geräte mit einem Forschungsschiff aufs Meer zu fahren, mit dem Kran ins Wasser zu setzen und am Grund zu verankern“, sagt Riebesell. Aber sonst würde er nie erfahren, wie es um die Zukunft der Meereslebensräume steht. Denn Algen und Schnecken, Jungdorsche und Korallen sind akut bedroht: durch das Treibhausgas Kohlendioxid.

Lange hatten Wissenschaftler vor allem in die Luft geschaut und untersucht, wie stark Kohlendioxid, kurz: CO₂, die Atmosphäre aufheizen wird. Vor knapp zehn Jahren dämmerte den ersten Experten, dass sich die Menschheit mit der Verbrennung von Erdöl, Gas und Kohle ein zweites Riesenproblem einhandelt. Kohlendioxid löst sich leicht in Wasser, dabei erzeugt es Kohlensäure. Die Folge: Das Meer versauert langsam, aber sicher. Es schluckt ein Drittel von dem, was aus Auspuffrohren und Schloten in die Atmosphäre quillt. Täglich verschwinden CO₂-Massen mit einem Gewicht von rund vier Millionen Mittelklasseautos in den Ozeanen. Zur globalen Erwärmung gesellt sich die Ozeanversauerung – die Meeresforscher sprechen von den „evil twins“, den „bösen Zwillingen“. Was sich in den kommenden Jahrzehnten im Wasser abspielen wird, weiß niemand. Erste Experimente lassen schlimmes ahnen: im angesäuerten Meerwasser lösen sich die Gehäuse von Schnecken auf, manche Fischlarven büßen ihren Geruchssinn ein und verlieren die Orientierung. Die Zahl der Publikationen zur Ozeanversauerung ist in den vergangenen fünf Jahren nach oben geschneilt. Dennoch ist das Wissen fragmentarisch. Vielfach hat man nur einzelne Arten im Labor untersucht. Wie die Ökosysteme und die Nahrungsnetze reagieren, in denen tausende Arten miteinander verwoben sind, ist völlig offen.

Vielleicht helfen die Mesokosmen. Mesokosmos, „Mittelwelt“: Ökologen bezeichnen damit Experimente in Wassertanks, Versuche, die mehr erfassen als der Blick durch die Lupe in die Mikrowelt, aber weniger als die Erforschung der Makrowelt, der Realität draußen. Mit seinen treibenden Schläuchen versucht Riebesell so viel Realität wie

möglich einzufangen. Zwar ist das Meerwasser im Schlauch von der Außenwelt abgeschnitten wie der Guppy im Plastikbeutel. Doch das Drumherum stimmt. Das Wasser darin hat dieselbe Temperatur wie das Meer und auch die Sonnenstrahlung ist identisch. „Im Labor könnte man die natürlichen Bedingungen nur schwer nachahmen“, sagt Riebesell.

Vor gut einem Jahr reiste er mit den Gestellen zur Arktisinsel Spitzbergen, zur internationalen Forschungsstation in Ny-Ålesund, der nördlichsten ganzjährig bewohnten Siedlung der Welt, gerade einmal 1200 Kilometer vom Nordpol entfernt. selbst im Sommer ist es dort kalt. Nur für wenige Wochen gibt das Eis das Land um die Station frei. Das Wasser hat um die null Grad.

Die Forscher schleppten ihre Mesokosmen hinaus in den Fjord. Während des Transports waren die Schläuche gerafft. Erst auf dem Meer wurden sie aufgefaltet und in die Tiefe gezogen. Neun Mesokosmen dümpelten schließlich einige hundert Meter vom Ufer entfernt im Wasser, fremdartig wie abgestürzte Raumgefährte. „Wir haben die Mesokosmen mit Kohlendioxid beblubbert und in jedem Schlauch einen anderen pH-Wert eingestellt“, einen anderen Säuregrad, sagt Riebesell. Damit nehmen die Forscher in ihren Mesokosmen die Zukunft vorweg, denn mit Simulationen hat man inzwischen ziemlich genau berechnet, wann verschiedene Meeresgebiete niedrige pH-Werte erreichen und gefährlich versauern werden. Fünf Wochen fuhren die Forscher täglich hinaus in den Fjord. Sie nahmen Proben, bestimmten Sauerstoffgehalt und Nährstoffwerte. Im Labor gaben sie das Wasser in Petrischalen, zählten am Mikroskop die Algen und untersuchten Zooplankter, Larven und Krebschen, auf krankhafte Veränderungen.

Die Ergebnisse sind ernüchternd. Ab einem bestimmten pH-Wert geht es den Lebewesen an den Kragen, vor allem den Pteropoden, den Flügelschnecken mit ihren dünnen, zerbrechlichen Gehäusen. Die unscheinbaren Tierchen, die wie kleine Erbsen mit zarten Schwingen im Wasser rudern, sind enorm wichtig. Fische und Wale verschlingen sie in rauen Mengen. Pteropoden gelten als ozeanische Knabberei. Fatalerweise bauen sie ihr zartes Gehäuse aus Aragonit, einer bestimmten Kalkart, die leicht von gesäuertem Meerwasser angegriffen wird. Die Gehäuse lösen sich auf, die Mikroelfen gehen ein. so wie der Eisbär zur schicksalhaften Ikone der Erderwärmung geworden ist, sind die sympathischen Pteropoden symbolisch für die Versauerung der Meere. Im Internet findet man bereits den traurig-schönen „Pteropod-Blues“ samt Kinderchor.

Millionen Tonnen von zusätzlichem CO₂ machen aber nicht nur den Lebewesen zu schaffen. Sie bringen vor allem die Chemie des Meeres durcheinander. CO₂ führt nicht nur zu einer Versauerung. Es reagiert mit Wasser auch zu verschiedenen Ionen, geladenen Molekülen, genauer: zu Karbonat- und Bikarbonationen. Das Karbonat ist ein wichtiger Werkstoff für Pteropoden, Seeigel oder auch Muscheln, die es für den haus- und Schalenbau benötigen. Im versauernden Meerwasser nimmt die Menge der Karbonationen ab. Den Meerestieren fehlt es an Substanz. Das weiß man schon lange. Doch Riebesell hat aus Spitzbergen neue Erkenntnisse mitgebracht: In den besonders stark beblubberten Mesokosmen entsteht weniger Dimethylsulfidgas als in normalem Meerwasser. Wer schon einmal durch den Tang am Ostseestrand gestapft ist, kennt den Mief dieser Substanz. Er entweicht, wenn sich tote Algen zersetzen. Noch können die Forscher nicht erklären, warum die Gasproduktion abnimmt. Doch ist das Ergebnis

beängstigend. Dimethylsulfid gehört zu den Regenmachern. Es steigt über den Ozeanen in die Atmosphäre und bildet dort Wolken, denn an den Molekülen kondensiert Wasserdampf. „Diese Wolken reflektieren Sonnenlicht und zum Teil auch Wärmestrahlung“, erklärt Riebesell. „Steigt weniger Dimethylsulfid auf, könnte das die Wolkenbildung und die Rückstrahlung verändern.“ Auch hier sind die Folgen kaum abzuschätzen.

Die Ozeanversauerung selbst aber ist gewiss. Denn was hier abläuft, ist simple Chemie. Je mehr CO_2 in der Atmosphäre schwebt, desto mehr löst sich davon im Wasser. Die Veränderung des Klimas mit seinen vielen Variablen wie der Wasser- und Lufttemperatur, den Meeresströmungen oder Luftdrücken ist extrem schwer abzuschätzen. Die Ozeanversauerung aber ist eine einfache Gleichung. „Sie ist nicht einmal mehr in Australien umstritten, wo viele immer noch am Klimawandel zweifeln“, sagt die Meeresbiologin Katharina Fabricius vom Australian Institute of Marine Science in Townsville.

Von der nordaustralischen Hafenstadt Townsville sind es nur etwa 1000 Kilometer bis zu Fabricius' Untersuchungsgebiet, zu den bewaldeten Inseln Dobu und Normanby am Ostzipfel Papua-Neuguineas. Die von Korallen umrahmten Eilande sind dicht bevölkert, dennoch leben die Menschen noch ein Stück weit ursprünglich, die meisten in Holzhütten ohne Strom. Die Familien rudern mit Einbäumen hinaus ans Korallenriff. Hier ist klar abgesteckt, wer wo fischen darf. Fabricius kam vor gut zehn Jahren zum ersten Mal hierher, um die Riffe zu erforschen. Damals entdeckte sie etwas Außergewöhnliches: CO_2 -Quellen. An mehreren Stellen im Riff blubbern Gasbläschen aus dem Boden. Manchmal steigen nur vereinzelt Blasen auf, andernorts rauscht es geradezu, als hätte jemand Brausetabletten ins Meer geworfen. Es dauerte eine Weile, bis die Familien der Forscherin vertrauten. Heute besucht sie mehrmals im Jahr das natürliche CO_2 -Labor zusammen mit Kollegen. Sie tauchen hinab, um die Korallen zu vermessen und die pH-Werte zu bestimmen. Fabricius: „Hier können wir beobachten, wie sich CO_2 und das versauernde Wasser auf die Korallen auswirken. Je näher an den Gasquellen, desto stärker ist der Effekt.“ Wieder ist es wie eine Reise in die Zukunft. Jedes Jahr werden die Ozeane saurer, so wie das Wasser im Korallenriff mit jedem Meter in Richtung Gasquelle. „Wir können hier Bedingungen untersuchen, wie sie in 20, 50 oder 100 Jahren im Meer herrschen werden.“ Der Ausblick ist trostlos. Im versauernden Wasser ist es vorbei mit den grazilen Korallen, in denen sich bunte Fische und Krebschen tummeln. Offenbar stört das stark versauerte Wasser die Kalkbildung der bizarr verästelten Meeresgeschöpfe. Stattdessen machen sich dort die dicklichen Poriteskorallen breit, die fett wie Blumenkohl am Grund ruhen. „10 000 bis 100 000 verschiedene Spezies leben in einem intakten, reich verzweigten Korallenriff. In Poritesgemeinschaften finden wir nur einen Bruchteil dieser Vielfalt“, sagt Fabricius. Aber an den besonders durchblubberten Stellen ist sogar für die Porites Schluss. Sie wachsen einfach nicht mehr. Für die Inseln sind das trübe Aussichten. Denn wenn Stürme und Brecher die Riffe zerstören, wächst keine neue Korallenmasse nach, die das Ufer wie ein Wellenbrecher schützt. „Bei einem pH-Wert von 7,7 geht nichts mehr“, sagt Fabricius. „Dann stoppt das Riffwachstum endgültig.“

Seit Beginn der industriellen Revolution ist der pH-Wert der Ozeane von durchschnittlich 8,2 auf 8,1 gesunken. Chemisch ist das Ozeanwasser damit eigentlich basisch, also eher eine schwache Lauge. Der Begriff Versauerung ist dennoch angemessen. Denn wenn der pH-Wert sinkt, geht es abwärts in Richtung Säure. setzt sich der

Kohlendioxid ausstoß fort wie bisher, könnte der Meerwasser-pH-Wert bis zum Jahr 2100 um weitere 0,3 bis 0,4 Einheiten abnehmen und damit tatsächlich die 7,7 erreichen. 0,3 bis 0,4 Einheiten, das klingt nach wenig. Doch die pH-Skala ist logarithmisch, sie ist sozusagen mathematisch gestaucht. Tatsächlich wird das Meer dann um 100 bis 150 Prozent saurer sein als Mitte des 19. Jahrhunderts, als man Kohle als Rohstoff entdeckte und der erste Akt des Klimadramas begann.

Nicht alle Meere versauern gleich schnell. Als erstes wird es die Arktis treffen, denn Kohlendioxid und andere Gase lösen sich besonders gut in kaltem Wasser. Kritisch ist vor allem der Punkt, von dem an sich das Aragonit auflöst, der Pteropodenbaustoff. 2018 könnte bereits ein Zehntel des arktischen Ozeans diese Schwelle erreichen. Jahr für Jahr dürfte sich das Areal vergrößern und weiter nach Süden ausdehnen. 392 ppm, parts per million, Kohlendioxid hat die Atmosphäre heute, 392 Moleküle Kohlendioxid auf eine Million Teilchen. Das sind gut 100 ppm mehr als in vorindustrieller Zeit. „Solche Werte gab es auf der Erde seit 25 Millionen Jahren nicht mehr“, schimpft der Biogeochemiker Jelle Bijma vom Alfred-Wegener-Institut für Meeres- und Polarforschung in Bremerhaven. „Und die Kohlendioxidkonzentration nimmt zehnmals schneller zu als je zuvor.“ Bijma kennt sich aus mit dem prähistorischen Klima. In Bohrkernen aus dem antarktischen Eis und in Millionen Jahre alten Sedimenten vom Meeresgrund schürft er nach uralten Klimaspuren; nach bestimmten Kombinationen von Atomen in Kalkpanzern von Foraminiferen etwa, planktischen Urtieren. Denn je nach CO₂-Gehalt der Atmosphäre und dem pH-Wert im Wasser ändert sich deren Zusammensetzung. Hinweise auf den Zustand der Ozeane in grauer Vorzeit geben auch die Foraminiferenpanzer selbst. Wenn die Meere sauer waren, bildeten die Foraminiferen offenbar dünnere Schalen. „Aus den langen Zeitreihen wissen wir, dass die Menschheit die Lebensbedingungen in den Meeren heute so schnell verändert, dass sich die Organismen kaum daran anpassen können.“

Lebensbedingungen werden sich im Zeitraffertempo ändern. Das ist abzusehen. Der Physiologe Hans-Otto Pörtner, der im AWI ein Stockwerk unter Bijma arbeitet, will herausfinden, was dann passiert. Er untersucht seit vielen Jahren den Stoffwechsel von Meeresorganismen, schon deutlich länger, als es den Begriff Ozeanversauerung gibt. Denn das Thema Kohlendioxid ist nicht neu. Tiere erzeugen Kohlendioxid, wenn ihr Körper arbeitet. Unter Stress, beispielsweise auf der Flucht, nimmt die Kohlendioxidkonzentration im Körper zu und der pH-Wert in den Körperflüssigkeiten ab. Auch unter Sauerstoffmangel häufen Tiere CO₂ an, etwa Krebse und Würmer im Watt bei Ebbe. Besonders aktive Organismen wie Fische haben Stoffwechsel- und Gasaustauschstrategien entwickelt, die CO₂ beseitigen. Das weiß Pörtner längst. Doch mit dem Klimawandel kommen zwei Stressfaktoren zusammen: höhere Wassertemperaturen und die Versauerung.

„Wir wissen, dass der Stoffwechsel vor allem durch erhöhte Temperaturen belastet wird“, sagt Pörtner, „durch höhere CO₂-Konzentrationen werden die Tiere offenbar zusätzlich geschwächt.“ steigende CO₂-Werte im Körper setzen dem Herz-Kreislaufsystem und dem Nervensystem zu und erschweren die Sauerstoffaufnahme im Blut. Was in der Körperchemie im einzelnen schief läuft, will Pörtner in den kommenden Jahren erforschen. In jedem Fall aber reagieren die Tiere noch empfindlicher auf ungünstige Umgebungstemperaturen. Sie werden sich nach und nach aus Meeresgebieten zurückziehen, die ihnen nicht länger behagen. Andere Spezies wandern

ein – so wie der Kabeljau, der in die arktischen Gewässer vordringt und dort seinem Vetter, dem Grönlanddorsch, den Lebensraum streitig macht. Die „bösen Zwillinge“ werden die Artengemeinschaften in den Meeren durcheinanderwirbeln wie seit Jahrtausenden nicht. Das Ergebnis dieses „Ökosystemmixens“, wie Pörtner es nennt, ist offen. Wie es der großen Seespinne (*Hyas araneus*), einem feingliedrigen Nordseekrebs, ergehen wird, sehen die Bremerhavener Physiologen aber schon jetzt voraus. Für gewöhnlich geht es der an kaltes Wasser gewöhnten Seespinne erst ab 25 Grad Celsius richtig schlecht. Stellten Pörtner und seine Mitarbeiter im Aquarium aber eine CO₂-konzentration ein, wie man sie für das Ende dieses Jahrhunderts erwartet, schwächelten die Seespinnen schon bei 23,5 Grad. Drehten die Forscher die CO₂-konzentration noch weiter hoch, ging den Tieren schon bei 21 Grad die Luft aus.

Natürlich sind all diese Experimente nur Teile des großen Ökologiepuzzles, kleine Szenen aus dem Klimadrama, räumt Pörtner ein. Doch glaubt er daran, dass sich die einzelnen Erkenntnisse zu einem Gesamtbild zusammenfügen werden. „Unser Ziel ist eine sichere Prognose, wie welche Tiergruppe auf bestimmte Umweltbedingungen reagieren wird – auf erhöhte Temperaturen und CO₂-konzentrationen.“

Björn rost sieht das genauso. Er ist ebenfalls Physiologe am AWI. Auch er stützt sich überwiegend auf Laborexperimente. Und die, sagt er, zeigen naturgemäß nur einen Ausschnitt der Wirklichkeit. Rost hat sich nicht auf Tiere, sondern auf den Stoffwechsel des Phytoplanktons spezialisiert, der kleinen Algen im Meer. Das Phytoplankton ist die Grundlage des marinen Lebens. Die Mikropflanzen ernten Sonnenlicht und bauen daraus energiereiche Pflanzenmasse auf, von der das Zooplankton lebt. Und das wiederum ist Fischfutter. Geht es dem Phytoplankton schlecht, sieht es für das Leben im Meer schlecht aus.

In seinen Laboren reiht sich Glasflasche an Glasflasche, in denen die Algen wie Staub umeinanderwirbeln. Meterlange Schläuche stecken in den Gefäßen, über die Luft mit steigenden Kohlendioxidkonzentrationen eingeblasen wird. „Verschiedene Planktonarten reagieren unterschiedlich auf erhöhte CO₂-Werte, so viel ist sicher“, resümiert er. „Es wird Gewinner und Verlierer geben.“ Die Cyanobakterien profitieren offenbar. Diese früher als Blaualgen bezeichneten Geschöpfe entwickelten sich vor 3,5 Milliarden Jahren, als die Atmosphäre noch keinen Sauerstoff, aber viel CO₂ enthielt. ihr Stoffwechsel ist ganz und gar auf CO₂ eingestellt. Manche Kieselalgenarten, vor allem die rundlichen Kalkalgen, könnten sich hingegen rarmachen. „Im Labor versuchen wir den Stoffwechsel einzelner Algen genau zu verstehen, um überhaupt abschätzen zu können, was künftig geschehen wird.“

Wie die Experimente im Glas andeuten, könnte sich die Zusammensetzung des Algenmenüs mit steigendem CO₂-Gehalt und sinkendem pH-Wert verändern. Die verschiedenen Spezies konkurrieren um Licht und Nährstoffe. Gut möglich, dass sich das Gleichgewicht zwischen ihnen verschiebt. Ehemals dominante Arten könnten vergehen, unscheinbare erblühen. Manche Kieselalgen zählen zur Leibspeise der Zooplankter, andere werden verschmäht. Was geschieht, wenn das Lieblingsfutter verschwindet und schwer verdauliche Algen wuchern? Wie ergeht es dem Zooplankton und den Fischen? Ulf Riebesell versucht Antworten in seinen Mesokosmen zu finden, in denen sich Algen und Krebschen gemeinsam in naturnahem Ambiente tummeln. Nicht allein in der Arktis. Mit einem Faltmaß von acht mal drei Metern sind die Gestelle zwar sperrig, doch mobil.

Letzten Dezember ließen die Kieler sie auf Einladung von US-Kollegen wie eine Entenfamilie vor Hawaii treiben. Zwei Wochen tuckerten die Forscher hinterher. Im kommenden Jahr werden sie die Geräte für fünf Monate im Skagerrak vertäuen. Englische Kollegen, die ähnliche Mesokosmen gebaut hatten, hatten die Kieler gewarnt: „Die Wellen werden eure Schläuche in Fetzen reißen. Das lohnt sich nicht.“ Sie haben sich geirrt.