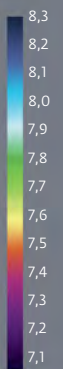


2200

pH-Wert



Schlechte Prognosen: Nach Simulationen der Hamburger Max-Planck-Forscher liegt der pH-Wert des Oberflächenwassers im Jahr 2200 deutlich niedriger als 1950, erkennbar an der Farbverschiebung in den roten Bereich (links). Die Meere versauern.

Luft gibt dem Ozean Saures

Der Mensch hat mit der Industrialisierung ein bedrohliches Großexperiment gestartet, dessen Folgen längst noch nicht abzusehen sind. Mit dem massiven Ausstoß von Kohlendioxid heizt er der Erde ein. Aber nicht nur das: Die erhöhte Konzentration des Treibhausgases in der Luft lässt auch die Ozeane versauern. Welche Konsequenzen das haben könnte, erforschen **Tatiana Ilyina** und ihre Mitarbeiter am **Max-Planck-Institut für Meteorologie** in Hamburg.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

Man nennt sie „Seeschmetterlinge“, denn sie schweben im Meer wie kleine Flügelwesen. Doch Pteropoden gehören zu den Schnecken. Ihre Gehäuse sind so klein wie die Fingernägel eines Babys. Mit seltsam transparenten Häutchen rudern sie durchs Wasser. Obwohl sie winzig sind, sind sie ungemein wichtig, denn es gibt Milliarden von ihnen. Fische und auch Wale verschlingen sie in rauen Mengen. Pteropoden gelten als ozeanische Knaberei. Amerikanische Zoologen nennen sie schlicht *potato chips of the seas*, Kartoffelchips der Meere.

Doch der Nachschub an Pteropoden, heißt es, ist gefährdet. In Zukunft dürfte ihnen der Klimawandel zu schaffen machen, genauer: die Ozeanversauerung.

Dass sich die Erde durch den Ausstoß von Kohlendioxid wie ein Treibhaus erwärmt, ist heute allgemein be-

kannt. Weniger bekannt ist, dass die steigende Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre auch dazu führt, dass das Meer langsam saurer wird. Denn die Ozeane nehmen einen großen Teil des Kohlendioxids aus der Atmosphäre auf. Das Gas bildet im Wasser, vereinfacht ausgedrückt, Kohlensäure. Je mehr Kohlendioxid die Menschheit in die Luft bläst, desto mehr löst sich im Wasser, und desto mehr Kohlensäure entsteht. Der pH-Wert, der angibt, wie alkalisch oder sauer das Wasser ist, sinkt. Und das wird für die Pteropoden und andere Lebewesen zum Problem, denn bei niedrigerem pH-Wert können sie kaum noch Kalk für den Gehäusebau erzeugen. Welche Konsequenzen das für das Leben und die Nahrungsketten im Meer hat, ist bislang noch weitgehend unbekannt.

Heute beträgt der pH-Wert des Wassers 8,1. Damit ist das Wasser streng genommen eine schwache Lauge und keine Säure. Der Begriff Versauerung trifft trotzdem zu, weil der pH-Wert seit Beginn der industriellen Revolution um etwas mehr als 0,1 in Richtung Säure ge-

» Indem das Meer Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt, bremst es den Treibhauseffekt.

sunken ist. 0,1 klingt wenig. Da der pH-Wert logarithmisch gestaucht ist, entspricht das aber tatsächlich bereits einem um etwa 30 Prozent saureren Wasser.

MIT DEM COMPUTER AUF DER SUCHE NACH ANTWORTEN

Wenn Wasser mit Kohlendioxid reagiert, lässt sich das in einer einfachen chemischen Gleichung ausdrücken. Doch der Weg des Kohlendioxids und des in ihm enthaltenen Kohlenstoffs durch die Meere ist so komplex, dass Forscher bislang kaum abschätzen können, wie stark sich der Lebensraum Meer verändern wird. Wie schnell werden verschiedene Meeresgebiete versauern? Wie wirkt sich das viele Kohlendi-

oxid auf das Gedeihen des pflanzlichen Planktons aus, der mikroskopisch kleinen Algen, der Lebensgrundlage der Meeresbewohner? Wird sich die Aufnahme von Kohlendioxid künftig verlangsamen? All diese Fragen müssen erst noch beantwortet werden.

Tatiana Ilyina versucht, die Antworten mithilfe des Computers zu finden. Die Ozeanografin arbeitet am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, wo seit vielen Jahren Simulationen des Erdklimas und Berechnungen zum Klimawandel durchgeführt werden. Ilyina hat dabei vor allem den Weg des Kohlenstoffs von der Atmosphäre ins Meer und durch die Ozeane im Blick. Denn davon hängt der Klimawandel ganz entscheidend ab: Indem

das Meer Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt, bremst es den Treibhauseffekt.

Ilyinas Spezialität ist die Simulation der Biogeochemie des Meeres. Darunter versteht man die chemischen Prozesse zwischen dem Wasser, dem Meeresboden und Stoffen, die Meereslebewesen abgeben und aufnehmen. Eine wichtige biogeochemische Komponente ist der Kohlenstoff. Und damit hat auch das Kohlendioxid einen entscheidenden Einfluss auf die Biogeochemie. In den vergangenen Jahren hat Ilyina viel Zeit damit verbracht, die biogeochemischen Prozesse in Rechenvorschriften umzusetzen und in die Klimamodelle ihrer Kollegen einzuarbeiten, insbesondere in das schon seit vielen Jahren etablierte



Seeschmetterlinge (*Limacina helicina*) sind räuberische marine Schnecken und gehören zu den wichtigsten Planktonorganismen. Saures Meerwasser wirkt ätzend auf ihre Kalkschalen.

Meereschemie-Modell HAMOCC. Inzwischen haben die Computer einige interessante Erkenntnisse ausgespuckt.

Für eine Simulation versuchen Forscher wie Tatiana Ilyina stets, die Realität zu vereinfachen und dennoch die wesentlichen Prozesse in ihr Modell einzubauen. Im Falle der Biogeochemie ist das anspruchsvoll, denn der Kohlenstoff geht viele Wege. Schon der Übergang des Kohlendioxids ins Meer ist komplex, weil von der Temperatur des Meerwassers abhängt, wie viel Gas sich im Wasser löst. Kaltes Wasser nimmt mehr Gas auf als warmes. Der arktische Ozean, so zeigen die Simulationen, dürfte in den kommenden Jahrzehnten infolgedessen deutlich schneller versauern als zum Beispiel die subtropischen und tropischen Meeresregionen.

KOHLENDIOXID MIT DEM GEWICHT VON 500 000 AUTOS

Ist das Kohlendioxid (CO_2) aus der Luft ins Meer übergegangen, reagiert es mit Wasser (H_2O) zu Kohlensäure. Diese wiederum reagiert mit den natürlich im Wasser enthaltenen Carbonationen (CO_3^{2-}) zu Bicarbonat (HCO_3^-). Da sich das CO_2 recht schnell in Ionen verwandelt und damit quasi aus dem Wasser entfernt wird, können die Meere permanent große CO_2 -Mengen aufnehmen: Täglich schlucken die Ozeane CO_2 -Massen, die im Gewicht 500 000 Autos entsprechen. Die verschiedenen Ionen befinden sich in einem Gleichgewicht und können sich bei veränderten Umweltbedingungen ineinander umwandeln. Auch der pH-Wert beeinflusst dieses Gleichgewicht.

Ilyinas Simulationen haben ergeben, dass sich das Gleichgewicht durch die Versauerung in Richtung Bicarbonat verschiebt. Für manche Meerestiere dürfte der damit einhergehende Schwund der Carbonationen fatal sein, denn Carbonat ist ein wichtiger Baustein von Muschelschalen und Schneckengehäusen. Wenn mehr und mehr CO_2 in die Ozeane gelangt, könnte die Menge der Carbonationen so weit abnehmen, dass die Kalkproduktion gestört wird. Sinkt die Carbonatmenge noch weiter, können sich Kalkschalen sogar auflösen.

Die Ergebnisse von Ilyinas Gruppe waren für den letzten Bericht des Welt-

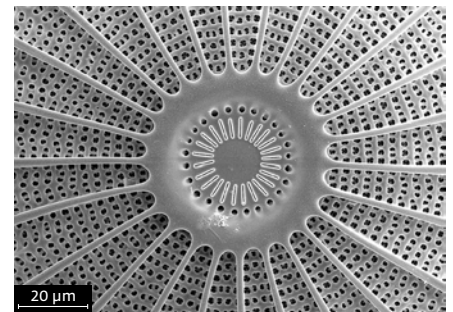
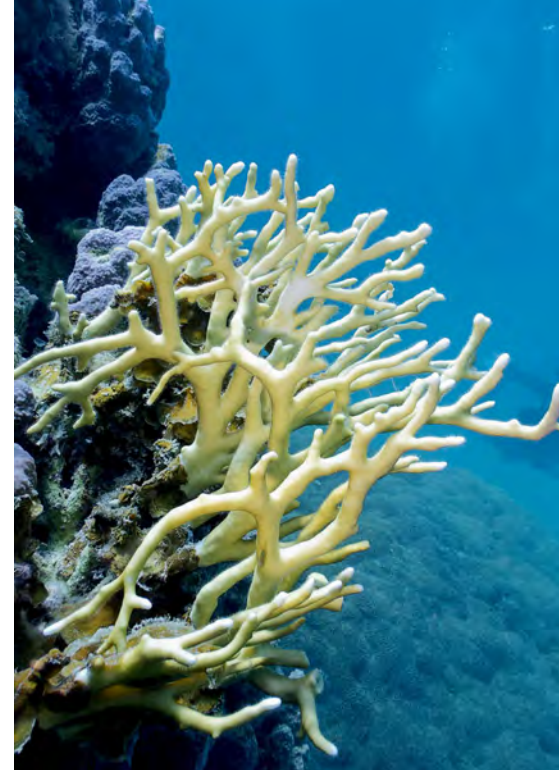
klimarates relevant. Denn das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg ist eine von etwa zwanzig Forschungseinrichtungen weltweit, deren Klimasimulationen die wissenschaftliche Basis für diesen Bericht bilden. Die verschiedenen Simulationen sind deshalb so wichtig, weil jede davon etwas andere Ergebnisse liefert.

Den Experten des Weltklimarates obliegt es, daraus eine Art wissenschaftlichen Konsens herauszulesen. „Coupled Model Intercomparison Project Phase 5“ (CMIP5) heißt dieses internationale Klimamodell-Vergleichsprojekt. Lange hatten Klimamodelle nur Strömungen und Temperaturen betrachtet. Doch nachdem der Weltklimarat den enormen Einfluss der Biogeochemie erkannte, machte er biogeochemische Berechnungen für den CMIP5 erstmals zur Pflicht. „Obwohl die Modelle zum Teil voneinander abweichen, sind wir uns darin einig, dass die Meere, global betrachtet, versauern“, sagt Ilyina.

Abweichungen gibt es meistens dann, wenn die verschiedenen Modelle einzelne Regionen betrachten, die räumliche Auflösung also feiner wird. Simulationen zeigen, dass es unter dem Phytoplankton Gewinner und Verlierer geben wird. Einige Berechnungen sagen für manche Meeresregionen wie die Arktis sogar voraus, dass Plankton insgesamt besser gedeihen wird als bisher. Der Grund: Durch das Schwinden des Eises gelangt mehr Sonnenlicht ins Wasser, das Planktonalgen genau wie Landpflanzen benötigen.

Die meisten Simulationen prognostizieren aber das Gegenteil: Demnach dürfte die Versauerung diesen Meeresorganismen unter dem Strich Nachteile bringen. Die Mechanismen dahinter sind bislang noch nicht völlig klar. Die Rechnungen zeigen aber, dass Algen Kohlendioxid nicht mehr so gut in Zucker und andere lebenswichtige Moleküle umwandeln können und ihr Wachstum beeinträchtigt wird. Folglich dürfte die Menge an Plankton in den kommenden Jahrzehnten abnehmen.

Hinzu könnte ein physikalischer Effekt kommen, durch den die Algen hungern: Durch die Erderwärmung wird sich das Oberflächenwasser in den Meeren weiter aufheizen. Dadurch bildet sich ein warmer Wasserkörper, der auf



Die Versauerung der Meere bedroht riffbildende Feuerkorallen (*Millepora spec.*, oben) oder die im Freiwasser lebenden, mikroskopisch kleinen Kieselalgen (*Arachnoidiscus spec.*, unten).

dem kalten Tiefenwasser schwimmt. Zwischen diesen Wasserkörpern gibt es kaum Durchmischungen, da die Grenze zwischen warmem und kaltem Wasser wie eine Trennschicht wirkt. Die Konsequenz: Der Transport von nährstoffreichem Wasser aus der Tiefe an die Oberfläche wird unterbunden. Die Nährstoffe aber sind für das Wachstum des pflanzlichen Planktons essenziell. Auch die Daten aus Ilyinas Arbeitsgruppe deuten auf eine Abnahme des Phytoplanktons hin.

Die Abnahme der Phytoplanktonmengen wirkt sich nicht nur auf die Nahrungskette im Meer aus, sondern auch direkt auf den Kohlenstoffkreislauf. Das pflanzliche Plankton nimmt große Mengen an Kohlendioxid auf und wandelt dieses in Biomasse um. Sterben die Algen, sinken sie in die Tiefe ab. Damit werden letztlich große Mengen CO_2 aus den oberen Meeresschichten entfernt und auf lange Zeit dem Kohlen-

» Unsere Simulationen zeigen, dass die CO₂-Aufnahmekapazität der Ozeane in den kommenden Jahren tatsächlich abnehmen wird.«

stoffkreislauf entzogen. Klimaforscher sprechen vom Meer als Kohlenstoffsenke. Doch diese wird schrumpfen, wenn das pflanzliche Plankton abnimmt.

Dass künftig weniger CO₂ im tiefen Ozean unschädlich gemacht wird, liegt auch an der Physik. In einem relativ gleichmäßig temperierten Wasserkörper, wie ihn der Nordatlantik heute darstellt, finden starke Umwälzbewegungen und Durchmischungen statt. Dadurch wird CO₂ in großen Mengen in die Tiefe transportiert. Die strenge Schichtung von warmem und kaltem Wasser könnte diesen Transport künftig deutlich abschwächen.

EINE SCHWEFELVERBINDUNG ALS REGENMACHER

„Unsere Simulationen zeigen, dass die CO₂-Aufnahmekapazität der Ozeane in den kommenden Jahren tatsächlich abnehmen wird“, sagt Ilyina. „Nur leider wissen wir bislang nicht, welcher Faktor dabei die entscheidende Rolle spielt.“ Wie groß ist der Einfluss des Planktons und des biologischen CO₂-Transports in

die Tiefe? Wie stark wirkt sich der physikalische Transport aus? Welche Rolle spielen das Gleichgewicht der Ionen und der pH-Wert des Wassers?

Ilyina will nun versuchen, einzelne Aspekte aus ihren Simulationsrechnungen herauszunehmen, um festzustellen, wie sich das Meer und der Kohlenstoffkreislauf dann verändern. Das Problem: „Wenn wir bestimmte Parameter ausschalten, müssen wir sicherstellen, dass die Simulation die Wirklichkeit noch realistisch abbildet und plausible Ergebnisse liefert.“ Dafür ist Tatiana Ilyina die richtige Frau am richtigen Ort. Sie ist nicht nur Ozeanografin, sondern hat auch viele Jahre Modelliererfahrung. „Das Modellieren macht mir einfach Spaß“, sagt sie beinahe bescheiden. Die Klimaforscherin bringt also das richtige Handwerkszeug mit, um komplexe Aspekte wie die Biogeochemie in Algorithmen für Klimasimulationen zu verwandeln.

Wie wichtig die Biogeochemie ist, zeigt noch ein weiteres Experiment, das Ilyina gemeinsam mit ihrer Mitarbeiterin Katharina Six gemacht hat:

die Simulation der Zukunft von Dimethylsulfid-Gas. Wer schon einmal durch den Tang am Ostseestrand gestapft ist, kennt den Muff dieser Substanz. Sie entsteht, wenn sich tote Algen zersetzen. Dimethylsulfid gehört zu den Regenmachern. Es steigt über den Ozeanen hoch in die Atmosphäre auf und trägt dort über einige Zwischenschritte letztlich zur Wolkenbildung bei. Kurz: Dimethylsulfid ist eine der wichtigsten Schwefelverbindungen in der Atmosphäre.

Die Simulation zeigt, dass die Menge des Dimethylsulfids in der Atmosphäre mit der Versauerung der Ozeane weltweit abnimmt. Daher entstehen weniger Wolken, die das Licht der Sonne und zum Teil auch deren Wärmestrahlung reflektieren. Die Erde heizt sich in der Folge noch stärker auf.

Die Folgen der erhöhten CO₂-Konzentrationen im Meer sind momentan noch unüberschaubar. Inzwischen sprechen Forscher von den *evil twins*, den bösen Zwillingen Erderwärmung und Ozeanversauerung. Die Zusammenhänge werden noch verworrener, wenn

Carbonatsättigung (angegeben als Ω-Wert) im Ozean in den Jahren 1950 (links) und 2200 (rechts). Die blauen Regionen weisen eine Untersättigung auf, die roten Bereiche sind übersättigt. 1950 finden sich blaue Regionen, in denen sich Kalk auflöst, nur in den Tiefen des Pazifiks. Bis zum Jahr 2200 haben sich diese Gebiete stark ausgebreitet.



man bedenkt, dass der Kohlenstoffkreislauf im Meer auch andere Kreisläufe beeinflusst. Etwa den Stickstoffkreislauf. Der wird unter anderem von Cyanobakterien angetrieben, pflanzlichen Planktonorganismen, die früher als Blaualgen bezeichnet wurden.

Cyanobakterien gibt es seit vielen Hundert Millionen Jahren. Sie entwickelten sich zu einer Zeit, als in der Erdatmosphäre wenig Sauerstoff, aber viel CO₂ vorhanden war. Die Mikroben lieben CO₂ geradezu. Erhöhte CO₂-Konzentrationen treiben sie zu Höchstleistungen an. Cyanobakterien gehören zu den wenigen Lebensformen, die Luftstickstoff N₂ in andere Stickstoffverbindungen umwandeln können, beispielsweise in solche, die Pflanzen als Nahrung nutzen.

DIE FOLGEN EINER DÜNGUNG WÄREN NICHT ABSEHBAR

Mehr CO₂ bedeutet damit mehr Stickstoffverbindungen. Ob das für das Leben im Meer von Vorteil ist oder Nachteile mit sich bringt, kann noch niemand mit Gewissheit sagen. Zweifellos profitieren die Cyanobakterien davon, dass es mehr CO₂ in den Meeren gibt. Vor allem aber zeigt das Beispiel, wie schwierig es ist, die biogeochemischen Prozesse zu erfassen und in eine Simulation zu übertragen.

Das gilt auch für die Rechnungen, die Tatiana Ilyinas Gruppe zu der Idee anstellte, die Versauerung künstlich aufzuhalten. Als Vorbild dient dabei ein natürlicher Prozess: Carbonationen, die im Meer nicht aus gelöstem CO₂ beziehungsweise Kohlensäure entstehen, sondern durch die Verwitterung etwa von Kalkstein, gehen nicht mit einer Versauerung des Wassers einher, sondern mit dem genauen Gegenteil. Aus abgebautem Gestein entstandene Carbonationen und andere alkalisch wirkende Ionen neutralisieren Säure und puffern damit den CO₂-Effekt ab. Dies geschieht seit Millionen von Jahren. Seit Jahren wird nun diskutiert, ob sich die Ozeanversauerung abbremsen ließe, wenn man das Meer zusätzlich mit alkalischen Verbindungen wie etwa Calciumhydroxid, gelöschtem Kalk, düngte.

Derartige Methoden zur künstlichen Bekämpfung des Klimawandels




Simulieren die Zukunft der Ozeane: Tatiana Ilyina (links) und Katharina Six besprechen ihre neuesten Ergebnisse.

bezeichnen Forscher als Geoengineering. Ilyina hat überprüft, ob das überhaupt machbar wäre. Die Ergebnisse der Simulation sind ernüchternd: Man müsste weltweit die 200-fache Menge der durch natürliche Verwitterung entstehenden Ionen ins Meer kippen. Insgesamt bräuchte man etwa 70 bis 100 Milliarden Tonnen Kalkstein. Das ist unbezahlbar.

Vor allem aber würde an den Stellen, an denen man die Substanzen ins Meer streut, der pH-Wert auf bis zu 8,7 ansteigen, bis sich die Substanzen durch Strö-

mungen verteilt haben. Das wäre zu viel des Guten und ein massiver Eingriff in die Ökosysteme. Die Konsequenzen für die Lebewesen wären unabsehbar. Eine globale Düngung hält Ilyina deshalb für Unsinn. Zumal ihre Forschung eines klarmacht: Das Beziehungsgeflecht von Biogeochemie und Klima ist zu komplex, als dass der Mensch die Wirkung kontrollieren könnte, wenn er einzelne Prozesse wie den Kohlenstoffkreislauf aus dem Gleichgewicht bringt. ◀

 www.max-wissen.de/136269

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Seit die Konzentration an Kohlendioxid in der Atmosphäre steigt, verändert sich nicht nur das Klima, auch die Ozeane versauern.
- In Wasser mit niedrigerem pH-Wert sinkt die Konzentration an Carbonationen, so dass alle Lebewesen mit einer Kalkschale ihre Gehäuse schlechter aufbauen können.
- Die Ozeanversauerung bewirkt Rückkopplungen, die den Treibhauseffekt verstärken können.
- Modellsimulationen zeigen, dass die Menge an Plankton in den Meeren infolge der Versauerung und der Erderwärmung abnehmen dürfte und die Ozeane weniger CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen. Gleichzeitig geben die Meere weniger Dimethylsulfid ab, wodurch die Wolkenbildung beeinträchtigt wird und mehr Wärmestrahlung der Sonne auf die Erdoberfläche trifft.
- Die Versauerung mit Geoengineering zu bremsen wäre extrem teuer und hätte unabsehbare Folgen für die Biogeochemie, die Ökologie der Meere und das Klima.

GLOSSAR

CMIP5: Im „Coupled Model Intercomparison Project Phase 5“ ermitteln Klimaforscher für die Berichte des Weltklimarates IPCC aus den Ergebnissen von Klimasimulationen, die an 20 Institutionen weltweit vorgenommen wurden, einen wissenschaftlichen Konsens.

Phytoplankton: Mikroorganismen der Meere wie etwa Grünalgen, Kieselalgen und Blaualgen, die wie Pflanzen durch Fotosynthese die Energie des Sonnenlichts nutzen. Phytoplankton steht am Anfang der Nahrungskette in den Ozeanen.