

Häufig gestellte Fragen zum Thema Ozeanversauerung

Einleitung

Die Versauerung unserer Ozeane ist ein relativ neues und multidisziplinäres Forschungsgebiet, welches Themen wie Chemie, Paläontologie, Biologie, Ökologie, Biogeochemie, wissenschaftliches Modellieren und Sozialwissenschaften umfasst. Die meisten Studien zu diesem Thema wurden in den letzten 10 Jahren veröffentlicht und obwohl sie zum Teil Gewissheit lieferten, bleiben dennoch viele Fragen unbeantwortet. Da sich einige Aspekte zum Thema der Ozeanversauerung wie z.B. die Carbonatchemie als durchaus komplex und teilweise widersprüchlich erweisen, sind sowohl die Medien als auch die breite Öffentlichkeit in Bezug auf wissenschaftliche Sichtweisen oder Ergebnisse zu diesem Thema verwirrt.

Aus diesem Grund hat das US-Programm „Ozean, Kohlenstoff und Biogeochemie“ (OCB; www.us-ocb.org) in Zusammenarbeit mit den europäischen (<http://www.epoca-project.eu/>) und britischen (<http://www.nerc.ac.uk/research/programmes/oceanacidification/>) Programmen zur Ozeanversauerung eine Liste häufig gestellter Fragen zu diesem Thema zusammengestellt. Diese Liste wurde in wissenschaftlichen Kreisen verbreitet, mit der Bitte, die Fragen kurz, präzise und auf aktuellem Wissensstand basierend zu beantworten. Danach wurden die Antworten im Rahmen eines offenen „Peer-Review“ Prozesses (Bewertung zur Veröffentlichung vorgeschlagener Artikel durch Experten des entsprechenden Gebietes) überarbeitet, um deren Lesbarkeit und Verständnis ohne den Verlust von wissenschaftlicher Genauigkeit sicherzustellen. Die Reaktion der Wissenschaftler war überwältigend, insgesamt haben 27 Wissenschaftler von 19 Institutionen aus 5 Ländern zu diesem Prozess beigetragen.

Wir hoffen, dass sich die Liste häufig gestellter Fragen zum Thema Ozeanversauerung als nützlich erweisen wird und der Öffentlichkeit mehr Klarheit verschafft. Jeder Leser ist herzlich eingeladen Kommentare an Sarah Cooley zu schicken (scooley@whoi.edu). Die Liste wird dann regelmäßig mit den eingehenden Kommentaren und Anmerkungen aktualisiert www.whoi.edu/OCB-OA/FAQs und www.epocaproject.eu/index.php/FAQ.html.

Joan Kleypas und Richard Feely (OCB), Jean-Pierre Gattuso (EPOCA) und Carol Turley (UK

Der Name „Ozeanversauerung“

Der Ozean ist weder sauer, noch sagen Modellberechnungen voraus, dass er jemals sauer werden wird. Warum spricht man dennoch von Ozeanversauerung?

Die Versauerung der Ozeane bezieht sich auf den Prozess der Abnahme des Meerwasser pH-Wertes (gleichbedeutend mit der Erhöhung der Wasserstoffionenkonzentration), da sich zusätzliche Mengen an Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre im Meerwasser lösen. Das eigentliche Wort der „Versauerung“ beschreibt die Abnahme des pH-Wertes von einem jeweiligen Ausgangspunkt bis zu einem jeweiligen Endpunkt auf der pH-Skala. Dieser Begriff wird in vielen wissenschaftlichen Bereichen verwendet (einschließlich der Medizin und den Ernährungswissenschaften), weil er sich auf die Zugabe von Säure zu einer Lösung bezieht, unabhängig vom pH-Wert der Lösung. Obwohl der pH-Wert des Meerwassers größer als 7.0 ist, und somit auf der pH Skala als „basisch“ bezeichnet wird, bewirken die weiter ansteigenden CO₂-Konzentrationen der Atmosphäre, dass der Ozean „saurer“ wird und der pH-Wert weiterhin sinkt. Dabei verhält es sich mit dem pH-Wert ähnlich wie mit der Temperatur: wenn die Lufttemperatur von -40°C bis -29°C (-40°F bis -20°F) steigt, ist es zwar immer noch kalt, aber trotzdem spricht man von "Erwärmung". --- J. Orr, C. L. Sabine, R. Key

Würde denn der Ozean jemals „sauer“ werden, falls sich sämtliches CO₂, das weltweit durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzt wird, im Ozean auflösen würde?

Nein. Die grundlegende Chemie des Carbonatsystems im Ozean, einschließlich der Anwesenheit von Calciumcarbonatmineralien auf dem Meeresboden, die sich langsam auflösen und helfen einen Teil des CO₂ zu neutralisieren, verhindern, dass unsere Ozeane, global betrachtet, versauern. --- C. L. Sabine

Ist Ozeanversauerung lediglich ein anderer Name für Klimawandel?

Nein. Die Versauerung der Ozeane und der Klimawandel haben zwar eine gemeinsame Ursache, und zwar die Erhöhung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre, jedoch umfassen die Auswirkungen des Klimawandels, die in Verbindung mit Veränderungen im Wärmehaushalt der Erde stehen (auf Grund des CO₂-Treibhauseffektes und in geringem Maße als Folge anderer

Klima-reaktiver Gase), zudem die globale Erwärmung sowie weitere Klimaänderungen. Die Versauerung der Ozeane bezieht sich speziell auf die Abnahme des Meerwasser pH-Wertes durch die Absorption von durch den Menschen freigesetztes CO_2 aus der Atmosphäre, und umfasst nicht die Erwärmung der Ozeane. --- *C. L. Sabine*

Die Kohlenstoffchemie des Ozeans und der pH-Wert

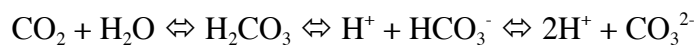
Bildunterschrift: (links) Schematische Darstellung der Carbonatsystemkomponenten im Meerwasser und einige Gleichgewichtsreaktionen, die zwischen ihnen auftreten. Die Gesamtalkalinität des Meerwassers (TA) wird im Allgemeinen als die „überschüssige Base“ oder als die Summe von überschüssigen Protonenakzeptoren definiert (die Ionenkomponenten der Gesamtalkalinität sind in hellblau dargestellt). (rechts) Auflistung der Konzentrationen der Carbonatsystemkomponenten im Meerwasser bei vorindustriellem atmosphärischen CO_2 -Gehalt von 280 ppm (grün) und zum Vergleich bei doppelt so hohem Wert (braun). Die Summe von Kohlensäure, Bicarbonat und Carbonatkonzentrationen ergibt den Gesamtkohlendioxidwert (tCO_2). Die pH-Werte so wie die Sättigungszustände von Aragonit (Ω -Aragonit) sind ebenfalls aufgeführt, die mithilfe der „Mehrbach“ Carbonatsystemkonstanten (Dickson und Millero, 1987, Deep-Sea Research), der KSO_4 Dissoziationskonstante von Dickson (1990, Journal of Chemical Thermodynamics), und der Totalen pH-Skala berechnet wurden.

Wird CO_2 den pH-Wert wirklich so stark reduzieren?

Laut Berechnungen ist der pH-Wert an der Ozeanoberfläche seit vorindustriellen Zeiten bis heute um etwa 0.1 pH-Einheiten gesunken. Da der pH-Wert dem Größenwert von Wasserstoffionen entspricht und die pH-Skala logarithmisch ist, bedeutet jede Minderung des pH-Wertes um eine Einheit den zehnfachen Anstieg der Wasserstoffionenkonzentration. Somit entspricht die Abnahme des pH-Wertes von 0.1 Einheiten ungefähr einer Erhöhung der Wasserstoffionenkonzentration von 26%. Wenn, wie erwartet, weiterhin fossile Brennstoffe genutzt werden, und als Folge der CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre ansteigt, wird der pH-Wert bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um weitere 0.3-0.4 Einheiten sinken und eine Erhöhung der Wasserstoffionenkonzentration im Ozean von 100-150% zur Folge haben (verglichen mit vorindustriellen Zeiten). --- *S. Doney*

Wenn CO₂ mit Wasser reagiert, wird mehr anstatt weniger Carbonat erzeugt. Wie ist es dann möglich, dass der Prozess der Ozeanversauerung die Menge an Carbonationen im Meerwasser verringert?

Dies ist ein Punkt, der allgemein für Verwirrung sorgt, da schrittweise Gleichgewichtsgleichungen, welche das Carbonatsystem des Meerwassers beschreiben, nicht das dynamische, chemische Milieu des Meerwassers erfassen. Es gibt verschiedene Reaktionen, die zwischen Kohlendioxid (CO₂), Wasser (H₂O), Kohlensäure (H₂CO₃), Bicarbonationen (HCO₃⁻), und Carbonationen (CO₃²⁻) ablaufen können. Bei einer der möglichen Reaktionen entstehen Carbonationen und der pH-Wert sinkt:



Bei dem jetzigen pH-Wert im Ozean findet jedoch noch eine weitere Reaktion statt, in der Carbonationen verbraucht werden, und sich der pH-Wert nicht ändert:



Die zweite Gleichung beschreibt die Reaktion, die am häufigsten im neuzeitlichen Ozean auftritt. Da jedoch ebenfalls die Reaktion aus Gleichung 1 stattfindet, kommt es allgemein betrachtet zur Abnahme von Carbonat und des pH-Wertes. --- C. L. Sabine

Angesichts des Salzgehaltes von Meerwasser scheint es nahezu unmöglich, dass der Ozean sauer wird. Wie könnte CO₂ all dieses Salz bewältigen?

Wenn sich Säuren und Basen in Laborversuchen gegenseitig neutralisieren, entstehen Salz und Wasser. Die im Ozean wichtigsten Ionen die das Meerwasser „salzig“ machen sind Natrium, Chlorid und Magnesium. Sie werden dem Meer durch Gesteinsablagerungen zugefügt, und sorgen über viele Jahrtausende für ausgewogene Mengen an positiven und negativen Ionen. Variationen des pH-Wertes im Ozean über relative kurze Zeiträume von Jahrzehnten und Jahrhunderten werden von schwachen Säuren und Basen wie Bicarbonat oder Borat kontrolliert. Von diesen schwachen Säuren und Basen haben die gelösten Formen von Kohlendioxid, bekannt als Kohlensäure, Bicarbonat und Carbonat, den größten Einfluss auf die globale pH-

Wert Schwankungen in den Ozeanen, da sich ihre Konzentrationen im Vergleich zu anderen Ionen im Ozean schneller ändern. --- *C. L. Sabine*

Durch das Schmelzen der Polkappen wird dem Ozean Süßwasser zugefügt. Wird das demzufolge nicht die Versauerung mindern?

Süßwasser, das durch das Schmelzen der Polkappen entsteht, verdünnt die Konzentrationen aller Komponenten des Carbonatsystems im Meerwasser (siehe oben) so wie die Gesamtalkalinität und Salinität (beides beeinflusst den pH-Wert). Als Beispiel: ein Liter "typisches" Meerwasser aus der Arktis (Temperatur: 5°C, Salzgehalt: 35 ppt, Gesamtalkalinität: 2244 Mikromol/kg) hat bei der heutigen atmosphärischen CO₂-Konzentration von 390 ppm einen Gesamtkohlenstoffgehalt von 2100 Mikromol/Liter und einen pH-Wert von 8.04 (Totale Skala, hier und folgend). Fügt man 1 kg Süßwasser zu 1 kg Meerwasser hinzu, dann werden der Salzgehalt, die Alkalinität, und der Kohlenstoffgehalt je um die Hälfte des Ausgangswertes verdünnt und der pH-Wert steigt auf 8.21 an. Da jedoch das Meerwasser nun nicht mehr mit der Atmosphäre im Gleichgewicht steht (es hat jetzt einen Kohlendioxidpartialdruck von 151 ppm während der Kohlendioxidpartialdruck der Atmosphäre 390 ppm ist), wird das Meerwasser solange Kohlendioxid aufnehmen, bis der Kohlendioxidpartialdruck des Meerwassers wieder dem Wert von 390 ppm entspricht. Dabei wird als Folge der pH-Wert auf 7.83 sinken. --- *R. A. Feely, J. Kleypas*

Der Ozean entgast CO₂ als Folge der Ozeanerwärmung. Kann dadurch dem Problem entgegengewirkt werden?

Der CO₂-Gehalt des Oberflächenwassers der Ozeane reagiert sowohl auf Veränderungen im CO₂-Gehalt der Atmosphäre als auch auf Temperaturänderungen. Angenommen die Temperatur im Ozean ändert sich nicht, dann würde eine Verdoppelung der vorindustriellen CO₂-Konzentration (von 280 auf 560 ppm) zu einem Anstieg der gesamten Menge des gelösten Kohlenstoffs in der Meeresoberfläche von etwa 2002 auf 2131 Mikromol/kg Meerwasser führen (unter der Voraussetzung: Salzgehalt: 35 ppt, Temperatur: 15°C und Alkalinität: 2300 Mikromol/kg). Wenn sich über den gleichen Zeitraum der Ozean um 2°C erwärmt, dann würde als Folge weniger Kohlenstoff aufgenommen werden (Anstieg von 2002 auf 2117 Mikromol/kg). Das bedeutet, dass die Erhöhung der Temperatur von 2°C zu einer 10%igen

Senkung der Kohlenstoffaufnahme in Oberflächengewässern führt. Die erwartete Erwärmung der Ozeane wird zudem auch die Ozeanzirkulation verändern und somit ihre Fähigkeit, CO₂ aus der Atmosphäre zu absorbieren, reduzieren. Jedoch wird das überschüssige CO₂ weiterhin in der Atmosphäre verweilen und als Folge werden die Ozeane mehr und mehr versauern. In Bezug auf den pH-Wert heben sich die Auswirkungen des Klimawandels auf die atmosphärische CO₂-Konzentration, CO₂-Löslichkeit und chemische Speziation mehr oder weniger gegenseitig auf. -
-- S. Doney, J. Kleypas

Messungen und Beobachtungen

Wie können wir wissen, wie der Meerwasser pH-Wert in der Vergangenheit war, wenn doch die pH-Wert Skala erst 1909 eingeführt wurde?

Wenn sich Eismassen zu Gletschern aufbauen, werden Luftblasen in dem gefrierenden Eis eingeschlossen. Wissenschaftler haben die CO₂-Konzentration der Luft in diesen Blasen gemessen und einen Datensatz der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen in der jüngsten Vergangenheit erstellt. Da große Teile der CO₂-Konzentrationen der Meeresoberfläche nach wie vor im Gleichgewicht mit den atmosphärischen CO₂-Konzentrationen stehen, können sowohl der Meerwasser CO₂-Gehalt als auch der Meerwasser pH-Wert aus diesen Luftblasen berechnet werden. In der Tat zeigen Datensätze von Eisbohrkernen, dass die atmosphärische CO₂-Konzentration in den letzten 800.000 Jahren nie höher als etwa 280 ppm war, was auf einen durchschnittlichen vorindustriellen pH-Wert des Ozeans von ca. 8.2 schließen lässt. --- J. Bijma

Wie wissen wir, welcher pH-Wert vor zig Millionen von Jahren geherrscht hat?

Wenn Wissenschaftler physikalische oder chemische Parameter (Temperatur oder pH-Wert) für Zeiträume erstellen möchten in denen noch keine Messinstrumente zur Verfügung standen, benutzen sie sogenannte Proxy-Parameter oder „Proxies“. Proxies sind messbare Parameter, die mit gewünschten, aber nicht zu beobachtenden (messbaren) Parametern in Verbindung gebracht werden können. Skelettbildende, marine Organismen zum Beispiel bauen neben Calcium, Kohlenstoff und Sauerstoff in Calciumcarbonat verschiedene andere Elemente in ihre harten Schalen und Skeletten ein. Bei der Analyse der harten Schalen und Skelette dieser Organismen, die in Sedimenten erhalten sind, bieten diese zusätzlichen Elemente wertvolle Informationen über die Umgebungsbedingungen zur Lebenszeit der Tiere. Historische pH-Werte und

Veränderungen im Ozean können mithilfe der Konzentrationen von Bor und dem Verhältnis seiner stabilen Isotope $\delta^{10}\text{B}$ und $\delta^{11}\text{B}$ in marinen Carbonaten ermittelt werden. Zusätzliche geochemische Hinweise und Modellierungen liefern starke Beweise dafür, dass der durchschnittliche pH-Wert im Oberflächenwasser der Ozeane während mehrerer Millionen Jahre nicht viel geringer als etwa 8.2 war. --- *J. Bijma*

In welcher Beziehung stehen die Auswirkungen der Ozeanversauerung mit anderen Auswirkungen, die ebenfalls auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen sind?

In der Tat beeinflussen auch andere Folgen menschlicher Aktivitäten die Chemie des Meerwassers sowie sein Säure-Base Gleichgewicht, jedoch lange nicht in dem Ausmaß, wie es die durch erhöhte atmosphärische CO_2 -Konzentrationen angetriebene Versauerung tut. Saurer Regen, der Schwefel- und Salpetersäure enthält, entsteht ursprünglich durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und fällt schließlich auf den küstennahen Ozean nieder. Die Auswirkungen von saurem Regen auf die Chemie der Meeresoberfläche kann lokal und regional von Bedeutung sein, ist aber global betrachtet vergleichsweise gering; die Gesamtauswirkungen entsprechen nur ein paar Prozent der Änderungen, die durch die steigenden atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen entstehen. Küstengewässer sind außerdem durch überschüssige Nährstoffeinträge, vor allem Stickstoff, aus der Landwirtschaft, durch Dünger und Abwasser beeinflusst. Als Folge dieser chemischen Veränderungen kommt es zu großen Planktonblüten. Wenn diese Blüten schließlich zusammenbrechen und unter die Oberflächenschicht sinken, führt die Atmung von Bakterien zu Sauerstoffverlust, CO_2 steigt an und der pH-Wert sinkt. Einer der wichtigsten Unterschiede ist, dass sich die Ozeanversauerung wahrhaftig auf globaler Ebene auswirkt, weil pH-Wert-sensible und skelettbildende Organismen in jedem Meeresbecken, vom Äquator zu den Polen, davon betroffen sind. Derzeit begrenzen sich die Auswirkungen vor allem auf die oberen 200-500 m des Ozean, doch dringen sie jedes Jahr in größere Tiefen vor. Viele der anderen, auf menschliche Aktivitäten zurückzuführende Auswirkungen sind eher „natürlich“. --- *S. Doney, C. Langdon*

Welche Anzeichen gibt es, die beweisen, dass eine Versauerung der Ozeane tatsächlich stattfindet und auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen ist?

Wissenschaftler haben in den letzten 20 bis 30 Jahren semi-kontinuierliche Aufzeichnungen des

Kohlendioxidpartialdrucks und pH-Wertes des Meerwassers im Pazifischen und im Atlantischen Ozean gesammelt. Diese Datensätze aus der Nähe von Hawaii, Bermuda, und den Kanarischen Inseln veranschaulichen, dass der Kohlendioxidpartialdruck des Meerwassers den Anstieg atmosphärischer CO₂-Konzentrationen widerspiegelt und der pH-Wert deutlich abnimmt. Zusätzliche Messungen des CO₂-Gehaltes im Nord-Pazifik aus den Jahren 1991 und 2006 zeigen dass die Zunahme des Meerwasser CO₂-Gehaltes im Nord-Pazifik in Einklang mit den steigenden atmosphärischen CO₂ Konzentrationen steht. --- C. Turley, J. Kleypas

Geologische Pufferung

Wenn der Abfluss von Gletschern zunimmt und Gesteinsstaub den Ozeanen zugeführt wird, wird das die Ozeane mit Alkalinität versorgen und zu einem gewissen Grade die Ozeanversauerung aufheben?

Der Abtrag von Kontinentalgesteinen bewirkt den Anstieg der Alkalinität des Meerwassers und erhöht dessen Fähigkeit dem sinkenden pH-Wert entgegenzuwirken. Allerdings würde die Neutralisierung sämtlichen CO₂, das auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen ist und in die Ozeane eindringt, auf diese Weise Hunderttausende von Jahren dauern. In Bezug auf die Zeitskala, die für den Menschen von Bedeutung ist (Jahrzehnte bis Jahrhunderte), ist dieser Prozesse daher nicht schnell/effizient genug, um die Ozeanversauerung abzupuffern. --- R. A. Feely, J. Bijma

Da die Meere „saurer“ werden, werden sich mehr Calciumcarbonatmineralien im Wasser auflösen. Könnte dies der Versauerung der Ozeane entgegenwirken?

Tatsächlich bewirkt die Auflösung von Calciumcarbonatmineralien sowohl in der Wassersäule als auch im Sediment dass die Alkalinität des Meerwassers ansteigt. Dies wiederum gleicht den geringen pH-Wert und die verminderte Carbonationenkonzentration, die mit der Versauerung der Meere in Verbindung gebracht werden, aus. Aber genau wie bei der Gesteinsablagerung ist dieser Prozess langsam und es würde Tausende bis Zehntausende von Jahren dauern, bis sämtliches, auf menschliche Aktivitäten zurückzuführendes CO₂ das in die Ozeane eindringt, neutralisiert wird. Über Jahrzehnte und Jahrhunderte gesehen sind diese Prozesse nicht schnell genug, um dem Eindringen von CO₂ in die Ozeane noch entgegenzuwirken zu können, und somit werden die chemischen Veränderungen, die mit der Versauerung der Ozeane in

Verbindung gebracht werden, mehrere Jahrhunderte andauern. --- R. A. Feely

Ozeanversauerung und Photosynthese

Es wird angenommen, dass Photosynthese mit steigenden CO₂-Konzentrationen zunimmt. Korallen enthalten photosynthetische Algen – werden somit Korallen von den steigenden CO₂-Konzentrationen profitieren?

Die Photosynthese von einigen, aber nicht allen Algen steigt, wenn die CO₂-Konzentrationen auf das Niveau ansteigen, welches für das Ende dieses Jahrhunderts vorhergesagt wird (700-800 ppm). Zooxanthellen sind einzellige Algen, die in Korallen leben und gehören zu jenen Algen, deren Photosynthese aufgrund erhöhter CO₂-Konzentrationen nicht wesentlich zunimmt. In der Regel führen Zooxanthellen und Korallen eine ausgewogene Symbiose, in der die Zooxanthellen photosynthetisch gebildeten Kohlenstoff an die Koralle übertragen, was eine außerordentlich wichtige Kohlenstoffquelle für die Korallen und ihre Kalkbildung (Skelettbildung) darstellt. Wenn es den Zooxanthellen in den Korallen „zu gut“ geht und sich ihre Zahl beträchtlich erhöht, dann kann die Kohlenstoffübertragung an die Korallen gestört werden. Selbst wenn die Photosynthese der Zooxanthellen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen ansteigt, bedeutet dies daher nicht zwangsläufig einen Vorteil für die Korallen. Die Mehrzahl bisheriger Versuche zeigt, dass Verkalkungsraten von Korallen abnehmen, wenn sich die CO₂-Konzentrationen erhöhen. Somit ist deutlich, dass der Anstieg von CO₂ die Fähigkeit der Korallen ihre Skelette zu bilden herabsetzt, anstatt sie durch die zunehmende Photosynthese der Zooxanthellen zu schützen. --- C. Langdon, A. Cohen

Wenn Photosynthese mit steigenden CO₂-Konzentrationen zunimmt, würden dann nicht Phytoplankton und Seegräser einen Nutzen daraus ziehen können?

Gemeinschaften von Organismen, die in der Nähe von seichten, ufernahen, vulkanischen CO₂-Ausgasungen auftreten, zeigen, dass bestimmte Mikroalgen, Seetange und Seegräser sehr gut in Bereichen wachsen, in denen sie langfristig hohen CO₂-Konzentrationen ausgesetzt sind. Doch zeigt diese Studie ebenfalls, dass Küstenökosysteme aufgrund der langfristigen Auswirkungen der Ozeanversauerung zerfallen. Die biologische Vielfalt geht verloren: Gruppen von Organismen wie Kalkrotalgen verschwinden allmählich mit sinkendem pH-Wert und werden von invasiven Algen ersetzt. Letztendlich führt die Versauerung der Ozeane dazu, dass gebietsfremde Algen wuchern, und nach und nach die Küstenlebensräume zerstören. --- J. Hall-

Spencer

Eine Zunahme der CO₂-Konzentration im Meerwasser erhöht das Wachstum von photosynthetischen Algen - ist das nicht etwas Positives?

Das Wachstum und die Photosyntheseraten einiger mariner Phytoplankton- und Pflanzenarten könnten sich mit steigendem CO₂-Gehalt erhöhen, aber das ist keineswegs eine allgemeine Regel. Für manche Arten haben die erhöhten CO₂-Konzentrationen und der steigende Säuregehalt entweder negative oder keinerlei Auswirkungen auf ihre Physiologie. Aus diesem Grunde wird es unter Phytoplankton und Pflanzen im Meer „Gewinner“ und „Verlierer“ geben und das wird erhebliche Verschiebungen in der Artenzusammensetzung der Gemeinschaften zur Folge haben. Einige der Experimente, die bisher durchgeführt wurden, zeigen, dass „neue/fremde“ Phytoplanktonarten den sauren Ozean der Zukunft dominieren und dass diese Arten nicht in der Lage sein werden, die produktiven Nahrungsketten aufrecht zu erhalten, auf die sich unsere gesunden Ökosysteme und Fischbestände stützen. --- *D. Hutchins*

Ozeanversauerung und Kalkablagerung

Warum profitieren Tiere in unseren Heimaquarien von CO₂ Zugabe, während im Ozean die Zugabe zur schädlichen Versauerung führt?

Süßwasserfische und -pflanzen sind in der Regel gegenüber niedrigeren pH-Werten und größeren pH-Wert-Schwankungen toleranter als Salzwaterarten, da Süßwasser eine geringere Alkalinität aufweist. Das bedeutet, dass die Chemie des Süßwassers pH-Wert Veränderungen nicht minimieren kann (es hat nicht die „Pufferkapazität“) so wie es die Chemie des Meerwassers tut. Zudem sind natürliche Schwankungen des pH-Wertes in Seen und Flüssen wesentlich größer als im Ozean. Süßwasserorganismen haben spezielle Mechanismen entwickelt, die es ihnen erlauben, gut unter diesen eher „sauren und variablen“ Bedingungen zu leben; Süßwasser-Pflanzen könnten zum Beispiel von höheren CO₂-Konzentrationen profitieren. Korallen und Fische, die in Meerwasseraquarien gehalten werden, benötigen einen beschränkten, schmalen pH-Bereich. Aquarienbesitzer fügen dem Wasser deshalb häufig Carbonathärtemittel zu, um einerseits die Alkalinität zu erhöhen und andererseits den pH-Wert zwischen 8.0 und 8.4 beizubehalten. „Calcium-Reaktoren“ werden Geräte genannt, die CO₂ Gas durch zerkleinertes Calciumcarbonat sprudeln (in der Regel zerkleinerte Korallen), wodurch

Calcium und Carbonationen in das Salzwasser abgegeben werden. Das wiederum sorgt für calciumreiches Wasser mit hoher Alkalinität, das Aquarienkorallen und andere kalkbildende Organismen für ein gesundes Wachstum benötigen. Leider sind solche Reaktoren auf globaler Ebene nicht einsetzbar weil schlichtweg zu große Mengen von zerkleinertem Calciumcarbonat erforderlich wären, um das Problem der Ozeanversauerung zu lösen. --- *H. Findlay, J. Kleypas, M. Holcomb*

In Süßwasser können Schalentiere überleben, obwohl der pH-Wert bis auf 5.0 sinken kann.

Wie kann da sein?

Organismen, die in Süßwasser oder in Salzwasser mit niedrigeren pH-Wert leben, haben adaptive Mechanismen entwickelt, die es ihnen erlauben unter diesen Bedingungen zu überleben. Im Gegensatz dazu sind Schalentiere, die sich in Meerwasser mit einem höheren und weniger variablen pH-Werten entwickelt haben, wesentlich anfälliger für Veränderungen des pH-Wertes. Ein gutes Beispiel hierfür ist die natürliche Verschiebung von marinen zu Süßwasserorganismen an Flussmündungen. Die Schalen der marinen Schnecke *Thais gradata*, die entlang der Flut ausgesetzten Flussmündungen (Ästuaren) lebt, zeigt tendenziell eine höhere Auflösungsgeschwindigkeit am „Süßwasser-Ende“ der Bucht, wo der pH-Wert niedrig und sehr variabel ist, als am „Meerwasser-Ende“, der Bucht, wo pH-Wert höher ist und wesentlich weniger schwankt. --- *H. Findlay*

Warum beeinflusst die Erhöhung der gelösten CO₂-Konzentration im Meerwasser den Schalenaufbau mariner Organismen?

Das Auflösen von CO₂ in Meerwasser führt zu einer Reihe von Veränderungen im Carbonatsystem des Meerwassers: die Konzentrationen von gelöstem CO₂, gesamtem gelöstem anorganischem Kohlenstoff und Bicarbonationen erhöhen sich, während sich der pH-Wert, die Konzentration von Carbonationen und der Sättigungszustand von Calciumcarbonat verringern. Eine oder mehrere dieser Veränderungen könnten den Schalenaufbau mariner Organismen beeinflussen. Die Bildung von Skeletten oder Schalen der meisten marinen Organismen ist ein interner Prozess, bei dem scheinbar Bicarbonat zu Carbonat umgewandelt wird, um schließlich Kalk zu bilden. Da bei dieser Umwandlung Protonen (Wasserstoffionen) erzeugt werden, müssen die Organismen Energie aufbringen, um die Wasserstoffionen in das äußere Milieu

(Meerwasser) abzugeben. Eine Hypothese, warum die Versauerung der Ozeane zu geringerer Verkalkung führen kann (und es gibt mehrere) ist, dass der Organismus mit sinkendem Meerwasser pH-Wert mehr Energie aufbringen muss, um die Protonen, die während des Verkalkungsprozesses entstehen, loszuwerden --- sie müssen ganz einfach gegen ein steileren Gradienten ankämpfen. Dies erklärt, warum viele kalkbildende Organismen niedrigere Verkalkungsraten aufweisen, wenn sie zusätzlichem physiologischem Stress ausgesetzt sind (z. B. Nahrungsmangel), denn durch den zusätzlichen Stress bleibt den Organismen weniger Energie für die Verkalkung. Physiologische Aspekte, wie zum Beispiel die Veränderungen der Atmungsrate eines Organismus als Folge der Ozeanversauerung, können zudem indirekt die Schalenbildung beeinflussen. Das wiederum kann Auswirkungen auf die Energiebilanz haben und damit die Fähigkeit des Organismus, Schalenmaterial zu produzieren, verändern. Während einige Organismen ungeachtet von der Ozeanversauerung ihre Schalen normal aufbauen könnten, ist es jedoch möglich, dass sich die Teile der Schale, die dem Meerwasser ausgesetzt sind, rascher auflösen, sodass der Organismus letztendlich mehr Energie für die Instandhaltung der Schale braucht als für die Fortpflanzung oder andere Aktivitäten seines Lebens. --- *H. Findlay, A. Cohen, J. Kleypas*

Wissenschaftler haben gezeigt, dass Hummerschalen (und Schalen anderer Tiere, die uns als Nahrung dienen) dicker werden, wenn sie in Wasser mit erhöhten CO₂-Konzentrationen leben. Warum sollten wir uns somit wegen der Ozeanversauerung Sorgen machen?

Mindestens eine experimentelle Studie zeigt, dass die Schalenmasse mehrerer Krebstiere, einschließlich Hummer, die für 60 Tage unter erhöhten CO₂-Konzentrationen in Kultur gehalten wurden, zunahm. Da der Aufbau der Schale Energie erfordert, tritt der Anstieg der Schalenmasse mit großer Wahrscheinlichkeit dann auf, wenn die Energiebedürfnisse für andere Funktionen wie z.B. Wachstum und Reproduktion heruntergeschraubt sind. Hummer und andere Krustentiere bauen ihre Schalen aus Calciumcarbonat und Chitin auf, jedoch in einem anderen Verfahren als es von anderen marinen Organismen bekannt ist. Ihre Schale wächst nicht ein ganzes Leben lang, sondern wird in regelmäßigen Abständen abgeworfen und es wird vermutet, dass sie viele der Mineralien aus ihrem alten Skelett behalten und für den Aufbau des neuen Skeletts nutzen. Energie- und Mineralhaushalte wurden in der oben genannten Studie nicht berücksichtigt, weshalb bislang unbekannt ist, wie sich die Ozeanversauerung auf die

allgemeine Gesundheit und Lebensdauer dieser Organismen auswirkt. --- A. Cohen, H. Findlay

Individuen und Ökosysteme

CO₂ ist ein normales Produkt der Atmung (Respiration). Tiere atmen dauernd ein und aus - wie kann CO₂ dennoch giftig sein?

Genau wie im Meerwasser reduziert CO₂, das der Respiration entstammt, den pH Wert innerhalb der Zellen. Organismen haben daher Mechanismen entwickelt um CO₂ zu puffern, zu transportieren und aus der Zelle zu entfernen, sobald es produziert wird. Die Versauerung der Ozeane vermindert die CO₂-Differenz zwischen der Körperinnen- und Außenseite eines Tieres und verhindert damit die Entfernung von CO₂ aus dem Körper, was zur Übersäuerung des Körpers führt (respiratorische Azidose). („Übersäuerung“ ist analog zur „Versauerung der Ozeane“, da Körperflüssigkeiten im Normalzustand leicht basisch sind). Respiratorische Azidose kann, unter anderem, zu einer Verminderung des Stoffwechsels und der Aktivität eines Organismus führen. Hinzu kommt, dass viele Zellfunktionen pH- sensibel sind und daher auf respiratorische Azidose negativ reagieren könnten. Respiratorische Proteine (z.B. Hämoglobin) im Blut zum Beispiel binden Sauerstoff bei hohem pH-Wert und geben ihn bei niedrigem pH-Wert ab. Dies ermöglicht unter anderem die Aufnahme von Sauerstoff an Kiemen und die Abgabe an die Zellen, wo der pH-Wert durch CO₂ aus dem Stoffwechsel reduziert ist. Viele Organismen können respiratorische Azidose kompensieren indem sie den Ionenausgleich im Körper verändern. Allerdings ist bislang noch nicht bekannt ob die Verschiebung des Ionenausgleichs langfristig aufrechterhalten werden kann. --- B. Seibel

Wenn einige kalkbildende Arten ein Gebiet verlassen, werden sich dann nicht dort andere Organismen und das Ökosystem anpassen?

Die Geschwindigkeit, mit der die oberen Schichten der Meere durch anthropogene Aktivitäten versauern, ist ungefähr hundert mal höher als es marine Ökosysteme weltweit über zehn Millionen von Jahren erlebt haben und Ökosysteme werden darauf verschieden reagieren. In manchen Ökosystemen, wie zum Beispiel Korallenriffen, bilden kalkbildende Lebewesen die Grundarchitektur des Systems. Würden Korallen verschwinden, könnte als Folge das gesamte Ökosystem verschwinden. Für andere Ökosysteme, in denen Kalkbildner eine weniger wichtige

Rolle spielen, sind die Folgen des Verlustes kalbildender Arten jedoch weniger eindeutig: auf starke Veränderungen in der Meerwasserchemie, wie zum Beispiel der heutigen Versauerung der Meere, reagieren Lebewesen auf eine von drei Arten: Akklimatisation (individuelle physiologische Anpassung an veränderte Umweltbedingungen), evolutionäre Anpassung oder Extinktion (Aussterben). Falls sich ein Grossteil der Arten schnell akklimatisiert, bleibt die Artenvielfalt und Funktion mariner Ökosysteme weitgehend unverändert. Evolutionäre Anpassung hingegen ist an Generationszeiten gebunden. Das bedeutet, dass langlebige Arten mit einer späten Geschlechtsreife weniger Gelegenheit haben werden Nachkommen zu produzieren, die resistent gegen die sich rasch ändernden Umweltbedingungen sind. Aber auch Arten mit einer kürzeren Generationszeit könnten Schwierigkeiten haben sich evolutionär anzupassen: An den Grenzen von Regionen mit vorteilhaften Wassertemperaturen und Wasserchemie haben Korallen zum Beispiel schon seit Millionen von Jahren versucht, sich an niedrigere Carbonationenkonzentrationen zu gewöhnen, konnten sich jedoch gegen Algen und andere Nicht-Kalkschalenbildner nicht durchsetzen. Aus diesem Grund erscheint es als unwahrscheinlich, dass Korallen sich innerhalb weniger Jahrzehnte erfolgreich an neue Wassertemperaturen und Wasserchemie anpassen können. Wenn es durch die Versauerung der Ozeane zu großen Verlagerungen im Vorkommen von Arten mit Schlüsselpositionen in Nahrungsnetzen oder zu signifikanten Aussterberaten kommt, sind wichtige Veränderungen in der Funktion von Ökosystemen zu erwarten – d.h. in den Energie- und Stoffflüssen von Primärproduzenten, wie zum Beispiel Plankton, an Räuber, die an der Spitze der Nahrungspyramide stehen, wie etwa Fische und Säugetiere.

Ökosysteme sind komplexe Netzwerke von Wechselbeziehungen zwischen biologischen Organismen und ihrer Umwelt und es ist schwierig alle ökologischen Folgen vorauszusagen, die durch Änderungen in den einzelnen Verbindungsgliedern bewirkt werden könnten. Wir wissen von Studien an Orten in der Nähe von seichten, ufernahen, vulkanischen CO₂-Ausgasungen, dass sich die Versauerung der Meere auf verschiedene Arten unterschiedlich auswirkt und dass sich dort die Artenzusammensetzung verändert. Die Folgen davon sind eine Verminderung der Artenvielfalt und eine Veränderung der Funktion des Ökosystems. Wir Menschen sind von einer ganzen Reihe von Ökosystemdienstleistungen des Meeres abhängig, wie zum Beispiel der Nahrungsgewinnung durch Fischerei, dem Einkommen durch Tourismus und Freizeitaktivitäten sowie dem Sauerstoff- und Nährstoffrecycling durch biogeochemische Prozesse. Durch die

Versauerung der Ozeane könnten alle diese Dienstleistungen verändert und in vielen Fällen zerstört werden. Stellen wir uns zum Beispiel die wirtschaftlichen Auswirkungen des Verschwindens von Seeigeln aus der Japanischen Fischerei vor oder den Rückgang von Larven kommerziell wichtiger Fischarten. Zudem wird der Rückgang oder das Verschwinden von kalkbildenden Lebewesen (1) die Meerwasserchemie, (2) andere kalkbildende- und nicht kalkbildende Organismen und (3) den Kohlenstoffspeicher der Erde (das „Gestein“, das Kalkbildner produzieren fällt auf den Meeresboden und bildet dort massive Kalkablagerungen, die damit Kohlenstoff in geologische Strukturen einschließen) beeinflussen. Genau wie in einem vernachlässigten Aquarium, in dem Fische und Schalentiere durch Algen ersetzt werden, können sich Ökosysteme an Veränderungen möglicherweise anpassen, aber sie wären dann vielleicht von Arten bevölkert, die für den Menschen weniger nützlich oder wünschenswert sind. In solchen Ökosystemen wären die traditionellen Ressourcen und Dienstleistungen dann entweder nicht verfügbar, anders als vor der Veränderung, oder nicht berechenbar. --- *D. Iglesias-Rodriguez, S. Doney, S. Widdicombe, J. Barry, K. Caldeira, J. Hall-Spencer*

Wird die Versauerung der Ozeane alles Leben im Meer vernichten?

Nein. Allerdings erwarten viele Wissenschaftler, dass die Versauerung der Ozeane zu grundlegenden Veränderung in marinen Ökosystemen führen wird. Diese Vorhersage basiert zum Grossteil auf Ereignissen aus der Erdgeschichte: vor Millionen von Jahren fanden in marinen Ökosystemen als Folge von „Versauerungsereignissen“ rasche Veränderungen statt und viele Arten starben aus (siehe auch „Erdgeschichte“ weiter unten im Text). Heute sind einige Arten, und die Ökosysteme, die sie erhalten, von der Meeresversauerung bedroht, insbesondere in Verbindung mit anderen Veränderungen des Klimas, wie der Erwärmung der Meere. Beispiele dafür sind Korallen, Tiefseekorallen und schwimmende Schnecken (Flügelschnecken). Diese Arten spielen eine Schlüsselrolle in den Ozeanen, entweder weil sie dreidimensionale Strukturen formen, die den Lebensraum für eine große Anzahl anderer Arten bilden, oder weil sie eine Schlüsselposition in der Nahrungskette einnehmen. Manche Arten, die Kalkstrukturen wie zum Beispiel Korallenriffe bilden, haben auch für Menschen eine Schlüsselfunktion: als Nahrungsquelle, schützende Küstenlinien oder Touristenattraktion. Beweise für die ökologischen Effekte der Meeresversauerung kann man schon heute finden, und zwar im

Bereich sogenannter „Champagner Standorte“, an denen unterseeische CO₂-Ausgasungen von Vulkanen Meerwasser ansäuern und kleine CO₂-Blasen durch die Wassersäule aufsteigen. Um die Insel Ischia in Italien zum Beispiel herrscht an solchen Stellen ein Säuregrad, der dem weltweit erwarteten des Jahres 2100 entspricht, und die Artenvielfalt ist dort um 30 Prozent reduziert. --- *J.-P. Gattuso, J. Hall-Spencer*

Werden sich die Folgen von Erwärmung und Versauerung der Ozeane auf Meereslebewesen gegenseitig ausbalancieren?

Im Prinzip könnte die Erwärmung der Ozeane für den Biomineralisationsprozess von Calciumcarbonat von Vorteil sein, da sich die Menge von gefällttem Calciumcarbonat bei höheren Temperaturen erhöht – allerdings nur bis zum einem gewissen Schwellenwert. Organismen sind aber daran angepasst, in einem begrenzten Temperaturbereich zu leben und gedeihen außerhalb dieses Bereichs weniger gut. In vielen Gebieten der Ozeane sind Organismen (sowohl kalkbildende als auch nicht-kalkbildende) schon heute Temperaturen ausgesetzt, welche die Obergrenze ihres Existenzbereichs darstellen. Erste Experimente mit Krabben und Fischen, die CO₂-Werten ausgesetzt wurden, die jenen entsprechen, wenn CO₂-Emissionen weiterhin ansteigen, haben gezeigt, dass sich ihre Toleranz gegenüber extremen Temperaturen vermindert. Des Weiteren haben Studien an Korallen auch gezeigt, dass CO₂ die Temperaturempfindlichkeit dieser Organismen steigert indem es die Wahrscheinlichkeit von Korallenbleicheereignissen erhöht, die durch Erwärmung hervorgerufen werden. --- *H.-O. Pörtner*

Ist die Versauerung der Ozeane für adulte (geschlechtsreife) Organismen ungefährlich, wenn sie die Auswirkungen in ihren empfindlichen Jugendstadien überleben?

Die Geschlechtszellen (Gameten), Eier und verschiedenen Larven- und Entwicklungsstadien (juvenil, adult) vieler typischer Meeresorganismen können von der Versauerung der Meere unterschiedlich betroffen sein, da ihre Mechanismen zur Stressbewältigung und ökologischen Toleranzen variieren. In manchen Fällen mögen die frühen Lebensphasen stressanfälliger sein, in anderen wiederum die adulten. Um alle Auswirkungen auf ein Lebewesen zu verstehen und besonders anfällige Lebensphasen zu hervorzuheben, ist es deshalb notwendig, Experimente mit allen Lebensphasen eines Organismus durchzuführen. Zudem ist es wichtig, chronische

Auswirkungen auf Fortpflanzung und Überleben zu bedenken. Wissenschaftler nehmen an, dass frühe Lebensphasen (Gameten, Larven und Juvenile) generell empfindlicher auf die Versauerung der Meere reagieren als Adulte. Wenn weniger junge Organismen bis zum Adultstadium überleben, führt das zu einer Verkleinerung von Populationen. Dauerhafter Stress limitiert im Allgemeinen den Erfolg eines Organismus – zum Beispiel wachsen gestresste Organismen langsamer als ungestresste, gestresste Räuber haben einen geringeren Jagderfolg und gestresste Beute kann Jägern schlechter entkommen. Im Endeffekt führt dieser Stress zu einer Verringerung der Überlebensrate und darunter leiden dann Populationsgrößen. Stress, der durch die Versauerung der Ozeane hervorgerufen wird, mag zwar die typischen täglichen Aktivitäten adulter Organismen nicht beeinflussen, wird aber im Endeffekt ihr Wachstum und ihre Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigen. Verringerte Fortpflanzungsfähigkeit wiederum führt zu einer Verminderung von Populationsgrößen. Die Versauerung der Meere kann in jeder Lebensphase dazu führen, dass Populationen weniger wachsen oder sich von Verlusten aufgrund von Störungen oder Stress schlechter erholen. --- *J. Barry, H. Findlay*

Versauerung der Ozeane im Verlauf der Erdgeschichte

Warum würden Korallen aufgrund der Versauerung der Ozeane aussterben, wo doch Korallenarten im Laufe der Erdgeschichte schon andere Veränderungen der Meerwasserchemie überlebt haben?

Die Gefährlichkeit der derzeitigen und zukünftigen Versauerung der Ozeane liegt sowohl an der Geschwindigkeit und Größenordnung des Anstiegs, als auch an der Höhe des vorausgesagten CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre, sollten wir weiterhin CO₂ ausstoßen wie bisher. Zurzeit steigt die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre jährlich um circa 2 ppm; seit Beginn der industriellen Revolution gab es schon eine Zunahme von mehr als 100 ppm. In der Übergangszeit vom Ende der letzten Eiszeit zur jetzigen Warmperiode stieg die Konzentration um 80 ppm über einen Zeitraum von 10 000 Jahren. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeit des jetzigen Anstiegs der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hundert mal höher ist als die der meisten Veränderungen, die sich im Verlauf der Erdgeschichte ereignet haben. Mit Ausnahme zu Zeiten von Massenaussterben gibt es in der geologischen Dokumentation keinen Beweis für Anstiegsraten des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre, die so hoch oder sogar höher waren als die heutigen. Sogar extreme Veränderung in der Wasserchemie wie zum Beispiel während des

Paläozän/Eozän-Temperaturmaximums vor 55 Millionen Jahren, als sich Carbonatminerale im Grossteil der tiefen und mitteltiefen Meeresschichten auflösten, ereigneten sich wahrscheinlich über mehrere tausend Jahre hinweg.

Korallen haben tatsächlich mehrere Aussterbeereignisse im Laufe der Erdgeschichte überlebt, allerdings dauerte es Millionen von Jahren, bis sie sich davon erholten – und sogar noch länger, bis sie wieder in der Lage waren Riffe zu bilden. Die frühesten Korallen entstanden während des Ordoviziums, vor mehr als 400 Millionen Jahren. Sie gehörten zu den Ordnungen Tabulata („Bödenkorallen“) und Rugosa („Runzelkorallen“) und unterschieden sich in großem Maße von den heute lebenden Arten (moderne Korallen gehören zur Ordnung der Scleractinia oder Steinkorallen und haben sich wahrscheinlich unabhängig von Bödenkorallen und Runzelkorallen entwickelt). Riffsysteme wurden im Ordovizium hauptsächlich von Schwämmen und nicht von Korallen gebildet. Bödenkorallen und Runzelkorallen starben während des Massenaussterbens an der Perm-Trias-Grenze vor 251 Millionen Jahren aus. Danach entwickelten sich andere Korallengruppen, die dann während der Kreidezeit besonders gut gediehen. Die größten Riffe wurden in der Kreidezeit von Muscheln gebildet. Der Grossteil der riffbildenden Muscheln starb (zusammen mit den Dinosauriern) während des Massenaussterbens an der Kreide-Tertiär-Grenze vor 65 Millionen Jahren aus. Obwohl zu dieser Zeit auch Korallenriffe verschwanden, überlebte ungefähr die Hälfte aller Korallenarten, aber es dauerte Millionen von Jahren bis sich Riffe so weit erholten, dass wieder weitverbreitet waren. Im Allgemeinen kann sich das Leben im Meer durch evolutionäre Anpassung und die Entwicklung neuer Arten von Massenaussterben erholen, es dauert allerdings annähernd zehn Millionen Jahre bis die gleiche Artenvielfalt erreicht wird, die vor dem Aussterben geherrscht hat. --- J. Barry, D. Schmidt, K. Caldeira

Wie unterscheidet sich die heutige Veränderung der Chemie des Meerwassers von denen in früheren Erdzeitaltern?

Die gegenwärtigen Bedingungen unterscheiden sich von früheren hauptsächlich dadurch, dass die Geschwindigkeit, mit der sich der CO₂-Gehalt der Atmosphäre verändert, viel höher ist als die der geologischen Prozesse, welche die Versauerung mildern. Wenn der CO₂-Gehalt langsam über mehrere hundert tausend Jahre steigt, wie das im Ordovizium aufgrund von vulkanischer und plattentektonischer Aktivität der Fall war, hat CO₂, das vom Meerwasser aufgenommen

wird, genug Zeit sich mit dem Wasser gründlich von der Oberfläche bis zum Meeresboden zu vermischen. Durch die Verteilung einer großen Menge CO_2 auf eine relative große Wassermenge ändert sich deren pH-Wert nur geringfügig. Parallel dazu, während die CO_2 -Konzentration in der Tiefsee über mehrere tausend Jahre hinweg ansteigt, beginnen sich dort carbonathaltige Sedimente aufzulösen. Die durch die Auflösung entstandenen Carbonationen neutralisieren einen Teil des Säuregehaltes des Meerwassers und minimieren dadurch zusätzlich die Abnahme des pH-Wertes. Frühere Ozeane enthielten auch höhere Konzentrationen an Calcium- und Magnesiumionen, die dabei halfen die Calciumcarbonatmineralien in tierischen Skeletten zu stabilisieren.

Gegenwärtig steigt der CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre viel schneller an, als sich das Wasser in den Ozeanen durchmischt. Zu Zeiten solch hoher CO_2 -Freisetzungen während einer relativ „kurzen“ Zeitspanne (d.h. weniger als 10 000 Jahre) sind Sedimente mit der Regulierung der Wasserchemie überlastet, was dazu führt, dass sowohl der pH-Wert als auch die Carbonatsättigung sinken. Obwohl die Menge an CO_2 , die in den letzten 200 Jahren in die Ozeane eingedrungen ist, viel geringer ist, als die, die während des Ordoviziums aufgenommen wurde, ist die heutige CO_2 -Konzentration in der Oberflächenschicht der Ozeane um vieles höher. Das führt zu einer rascheren Abnahme des pH-Wertes in dieser Schicht als jemals zuvor in der Erdgeschichte. Sowohl die Geschwindigkeit als auch die Größenordnung der Abnahme des pH-Wertes stellen für Organismen ein Problem dar, die sich in Ozeanen entwickelt haben, die bisher nur langsamere, kleinere Veränderungen durchgemacht haben. --- C. Langdon, A. Ridgwell, R. Zeebe, D. Schmidt

Wissenschaftliche Methoden

Experimente mit Organismen sind häufig unrealistisch, wenn Wissenschaftler zur Veränderung des pH-Wertes Mineralsäuren anstatt gasförmiges CO_2 verwenden.

Wenn Meerwasser mit Hilfe von Mineralsäuren verändert und dabei der gleiche Anteil Natriumhydrogencarbonat zugegeben wird, so simuliert das auf perfekte Weise die Änderungen in der Meerwasserchemie, die durch die Aufnahme von CO_2 hervorgerufen werden. Sogar wenn die Versauerung nur durch Mineralsäuren, ohne Zugabe von Natriumhydrogencarbonat (oder Carbonat), simuliert wird, ist das so produzierte Meerwasser in Bezug auf den pH-Wert, CO_2 -

Partialdruck, Carbonationenkonzentration und Carbonatsättigung kaum von Meerwasser zu unterscheiden, das mit CO₂ begast wurde. Die Konzentration von Bicarbonat ist in CO₂ begasten Experimenten zwar höher als in Mineralsäureexperimenten, steigt aber mit beiden Methoden an. Tatsächlich wurden in Experimenten keine Unterschiede zwischen der Reaktion von kalbildenden Lebewesen beobachtet, die „Mineralsäure-behandeltem“ oder „CO₂-belüftetem“ Meerwasser ausgesetzt waren.. --- *U. Riebesell*

Sogar Wissenschaftler geben zu, dass es in Bezug auf den Klimawandel Unsicherheiten gibt. Wie gewiss ist die Versauerung der Ozeane?

Es gibt keinen Zweifel daran, dass sich die Meerwasserchemie aufgrund der erhöhten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre verändert, und dass die Verbrennung von fossilen Brennstoffen und die Abholzung der Wälder die Grundursachen dafür sind. Weniger gewiss sind jedoch die möglichen biologischen Auswirkungen dieser Veränderung. Das liegt in erster Linie daran, dass die Empfindlichkeit gegenüber der veränderten Meerwasserchemie in verschiedenen Gruppen mariner Lebewesen eine große Bandbreite aufweist. Es gibt in der wissenschaftlichen Gemeinschaft einen breiten Konsensus, dass die Versauerung der Ozeane stattfindet und dass sie, zu sehr hoher Wahrscheinlichkeit, signifikante Auswirkungen – manche positiv und manche negativ – auf eine große Anzahl mariner Lebewesen haben wird. --- *S. Doney*

„Beweise“ für die Versauerung der Meere sind widersprüchlich, das bedeutet, dass sich nicht einmal die Wissenschaftler einig sind.

Es gibt keinerlei Zwiespältigkeit in den Daten, welche die Wasserchemie betreffen und die belegen, dass die Versauerung der Ozeane stattfindet. Daten von biologischen Experimenten zeigen hingegen, dass verschiedene Organismen unterschiedlich auf die Veränderung der Meerwasserchemie reagieren. Es scheint manchmal seltsam, dass selbst Experimente mit ein und derselben Tier- oder Pflanzenart zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen. Dies zeigt, dass die Reaktion eines Lebewesens auf die Versauerung des Meeres nicht nur von seinen Eigenschaften, sondern auch von den Umweltbedingungen abhängt, denen es während seines Lebens ausgesetzt war. Letzteres kann dazu führen, dass Mitglieder derselben Art, die jedoch aus verschiedenen Regionen, Populationen oder genetischen Linien stammen, in Experimenten

unterschiedlich reagieren. Ergebnisse von solchen Experimenten sollten nicht als miteinander im Widerspruch stehend angesehen werden, sondern viel mehr als Einblicke in die natürliche Variabilität, die zwischen Populationen existiert. Nur wenn wir diese Variabilität messen und verstehen, werden wir besser voraussagen können, welche Arten, Gemeinschaften und Ökosysteme von der Versauerung der Ozeane am meisten bedroht sind. --- *S. Widdicombe*

Könnten die in Experimenten beobachteten Auswirkungen der Versauerung der Ozeane nicht daraus resultieren, dass Organismen einfach direkt in Meerwasser mit CO₂-Konzentrationen gegeben wurden, die eigentlich erst nach Jahrzehnten oder Jahrhunderten erreicht werden, und damit praktisch einer Schockbehandlung ausgesetzt wurden?

In Experimenten werden Tiere (und andere Organismen) normalerweise nicht direkt in CO₂-angereichertes Meerwasser gegeben sondern in Meerwasser, das langsam und mit sorgfältig geregelten Gasmischungen ins Gleichgewicht gebracht wird. Es ist zwar unmöglich Experimente durchzuführen, die exakt die Geschwindigkeit der anthropogenen CO₂-Anreicherung in der Atmosphäre und den Ozeanen simulieren, jedoch sind die CO₂-Konzentrationen, die in Experimenten angewendet werden, weit geringer als solche, die einen Schock auslösen könnten. Nichtsdestotrotz könnten diese Konzentrationen physiologische Vorgänge stören (Säure-Basen Regelmechanismen, Entwicklung von Larven, Wachstum), über relativ kurze Zeit jedoch in eher geringem Ausmaß. Aus diesem Grund ist es notwendig, Langzeit-Experimente durchzuführen um herauszufinden, ob solche Konzentrationen schädlich sind und zum Tod von Organismen führen. Über lange Zeiträume hinweg kann selbst eine geringe Verminderung des Gesundheitszustandes einzelner Tiere eine ganze Art beeinträchtigen, zum Beispiel wenn Arten innerhalb eines Ökosystems miteinander in Konkurrenz stehen oder wenn sie zusätzlichen Stress auslösenden Faktoren, wie etwa extremen Temperaturen, ausgesetzt sind. --- *H.-O. Pörtner*

Geo-Engineering (technische Eingriffe in geochemische oder biogeochemische Kreisläufe) und Minderung der Umweltauswirkungen

Wenn wir mehr Aquakultur betreiben und mehr Schalentiere züchten, werden ihre Kalkschalen nicht dazu beitragen Kohlendioxid einzuschließen (wie Bäume)?

Durch den Kalzifizierungsvorgang wird zwar Kohlenstoff aufgenommen, das führt jedoch zu einer Veränderung im Kohlenstoffsystem des Meerwassers, die eine Verminderung des pH-Wertes und eine *Zunahme* statt eine Beseitigung von CO₂ zur Folge hat. Viele Organismen wandeln Bicarbonat in Carbonat um, das sie zum Bau ihrer Schalen verwenden. Dieser Vorgang setzt Wasserstoffionen frei, welche die Versauerung verstärken. Während des Zeitraums, an dem wir interessiert sind, ist ein Grossteil der Korallenriffe zum Beispiel eher eine geringfügige CO₂-Quelle für die Atmosphäre als eine Kohlenstoffs Senke. Von einem „Ökosystem-Blickwinkel“ aus betrachtet kann selbst die bestgemeinte Aquakultur durch Veränderung von Küstenlandschaften, vermehrte Verschmutzung und Keimbelastung des Meerwassers und die Freisetzung genetisch veränderter oder gebietsfremder Arten ungewollt Schaden anrichten. Jegliche Aktivität, die das Ziel hat die Versauerung der Meere zu mildern, sollte daher in einem breiten Kontext betrachtet werden um zu verhindern, dass eine Umweltbelastung durch eine andere ersetzt wird. --- *A. Cohen, S. Widdicombe*

Können Geoengineering-Lösungen für den Klimawandel auch der Versauerung der Meere helfen?

Die Mehrheit der vorgeschlagenen „Geoengineering-Ansätze“ zur Einschränkung des Klimawandels würden lediglich eine symptomatische Entlastung bieten, jedoch ohne die Wurzel des Problems anzugehen – überschüssiges CO₂ in der Atmosphäre. Die meisten „Geoengineering-Vorschläge“ beschäftigen sich zwar mit den Klimakonsequenzen unserer CO₂-Emissionen, nicht aber mit ihren chemischen Konsequenzen. So hätte zum Beispiel eine angestrebte Kühlung der Erde durch die Reflexion von zusätzlichem Sonnenlicht ins All kaum direkte Auswirkungen auf die Meerwasserchemie und würde die Versauerung der Meere daher nicht deutlich verringern.

Einige Ansätze schlagen andererseits vor, die Veränderung in der Wasserchemie durch die Zugabe von chemischen Verbindungen ins Meerwasser zu reduzieren, welche Säuren neutralisieren würden. Allerdings bräuchte es eine viel größere Menge solcher Verbindungen um die Versauerung der Meere rückgängig zu machen, als die Menge an CO₂, die wir in die Atmosphäre ausstoßen. Die zusätzliche Infrastruktur für den Abbau und die Verarbeitung der Chemikalien, die für diesen Ansatz benötigt würde, hätte eine Energiebilanz, die so hoch wäre,

wie unser gesamter heutiger Energiebedarf. Es erscheint daher vernünftiger, solch einen Aufwand und die Geldmittel dafür einzusetzen, unsere Energieversorgung von einer begrenzten Quelle fossiler Brennstoffe weg- und zur Nutzung von erneuerbaren und unbegrenzten Energiequellen hinzuführen. Dies würde auch eine weitere Zufuhr und Ausbreitung von CO₂ in Atmosphäre und Ozeanen verhindern, und somit müssten wir uns über die Neutralisierung der Auswirkungen keine Gedanken machen. --- *K. Caldeira*

Würde eine Obergrenze von 350 oder 400 ppm atmosphärischen CO₂-Gehaltes die Versauerung der Meere stoppen?

Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre liegt heute schon bei 390 ppm und steigt pro Jahr um circa 2 ppm. Ohne dramatische Rückgänge der CO₂-Emissionen wird die Konzentration weiter ansteigen. Die Mehrheit der Emissions-Prognosen für die nahe Zukunft sagt einen Anstieg (statt eines Rückgangs) in der Zuwachsrate des atmosphärischen CO₂-Gehaltes voraus. Um das Problem der Versauerung der Meere in den Griff zu bekommen ist der erste Schritt daher die Stabilisierung und schlussendliche Reduzierung von CO₂-Emissionen. Die höchsten CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre werden mit ziemlicher Sicherheit weit über 400 ppm liegen, weil wir den Emissionsanstieg innerhalb der nächsten fünf Jahre nicht stoppen werden. Die Auswirkungen auf das Leben im Meer unter diesen Höchstkonzentrationen könnten beträchtlich sein. Auf längere Sicht mag es möglich sein, den CO₂-Gehalt der Atmosphäre mit Hilfe natürlicher und künstlicher Aufnahmemechanismen zu verringern. Die Meerwasserchemie ist reversibel und eine Rückkehr zu 350 – 400 ppm würde den pH-Wert und die Carbonatsättigung ungefähr auf ihr heutiges Niveau zurückführen. Allerdings haben Studien gezeigt, dass selbst die derzeitigen Bedingungen für manche Organismen schädlich sind und es ist auch nicht klar, ob zukünftige biologische Folgen von CO₂-Höchstkonzentrationen reversibel sind. Selbst wenn wir die CO₂-Emissionen stabilisieren, würde atmosphärisches CO₂ aus fossilen Brennstoffen während der nächsten Jahrhunderte weiterhin in die Tiefe der Ozeane eindringen, wo es negative Auswirkungen auf Tiefseeorganismen wie zum Beispiel Tiefseekorallen haben kann. --
- *S. Doney*

Entwicklung von Richtlinien und Prozesse der Entscheidungsfindung

Ist es nicht besser die Ozeane zu opfern und sie weiter CO₂ aufnehmen zu lassen und damit das Klima zu puffern?

Die Versauerung der Ozeane und der Klimawandel sind zwei Seiten derselben Medaille. Beide sind direkte Folgen der anthropogenen CO₂-Emissionen und können nicht voneinander getrennt werden. Durch die derzeitige Aufnahme von circa einem Viertel der anthropogenen CO₂-Emissionen fungieren Ozeane tatsächlich als Puffer gegen die steigenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen. Diese „Dienstleistung“ reduziert zwar den Klimawandel, verhindert ihn aber nicht. Auf die Dauer, über zehntausende von Jahren hinweg, wird zwar der Grossteil (80 – 90%) der anthropogenen CO₂-Emissionen in den Ozeanen enden, das schützt allerdings unser Klima in der Zwischenzeit nicht vor globaler Erwärmung. Es ist auch wichtig zu betonen, dass die Folgen, welche die erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die Ozeane haben, weitreichende Auswirkungen auf die Funktion aller Ökosysteme haben werden. Die Ozeane spielen in diversen biogeochemischen Kreisläufen der Erde eine wesentliche Rolle – nicht nur in der Steuerung von CO₂, sondern auch in der Produktion von Sauerstoff, dem Kreislauf von Stickstoff und anderen wichtigen Nährstoffen und in der Produktion verschiedener Gase, die unter anderem die Bildung von Wolken beeinflussen. Viele Arten nutzen sowohl terrestrische als auch marine Lebensräume und gesunde Meere bilden die Existenzgrundlage vieler Menschen. Die Ozeane sind ein fixer, vernetzter Bestandteil des Systems unserer Erde und können nicht als separate Einheit erachtet werden. --- *U. Riebesell, J. Kleypas*

Ist es zu spät um noch irgendetwas zu tun?

Es liegt innerhalb unserer technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten, unsere Energie- und Transportsysteme und unsere Landnutzungspraktiken so zu verändern, dass CO₂-Emissionen bis zur Mitte dieses Jahrhunderts zum Grossteil aus der Wirtschaft verbannt werden können. Die Kosten dafür wären schätzungsweise gering - etwa 2% des Welt-Bruttoinlandsprodukts, aber bisher hat es sich für unsere Gesellschaft als schwierig erwiesen, sich für die Durchführung dieser Veränderung zu entscheiden. --- *K. Caldeira*

Wenn die Versauerung der Ozeane doch ein so ernsthaftes Problem ist, warum ist es nicht Bestandteil der Verhandlungen der Vertragsstaaten (COP) über Klimaschutz innerhalb der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC)?

Obwohl Wissenschaftler schon seit Jahrzehnten wussten, dass aufgrund des erhöhten CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre die Ozeane versauern würden, war man sich der Konsequenzen dieser Versauerung für das Leben im Meer bis vor etwa zehn Jahren nicht bewusst. Zu dieser Zeit fanden Wissenschaftler heraus, dass die Versauerung der Ozeane die Skelett- und Schalenbildung vieler mariner Lebewesen beeinträchtigt. Seitdem wurden noch viele andere Folgen der Versauerung und ihre Auswirkungen auf eine große Anzahl mariner Organismen und Prozesse identifiziert. Da der wissenschaftliche Prozess auf exakten Versuchsprotokollen, „Peer-Reviews“ (Bewertung zur Veröffentlichung vorgeschlagener Artikel durch Experten des entsprechenden Gebietes) und der Publikation der Ergebnisse durch einen Wissenschaftsverlag basiert, braucht es eine gewisse Zeit, bis neue Ergebnisse von der wissenschaftlichen Gemeinschaft verifiziert und akzeptiert werden. Im Jahr 2007 gab es allerdings für die Versauerung der Ozeane schon genügend Beweise, sodass sie in der Zusammenfassung für Entscheidungsträger des Vierten Sachstandsberichts des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) der Vereinten Nation in folgendem Statement dargelegt wurden: „Es ist zu erwarten, dass sich die fortschreitende Versauerung der Ozeane aufgrund des steigenden atmosphärischen CO₂-Gehaltes negativ auf marine, schalenbildende Lebewesen (z.B. Korallen) und die von ihnen abhängigen Arten auswirkt“. Die Versauerung der Meere und ihre Auswirkungen sind jetzt so gut dokumentiert, dass sie weitestgehend von der wissenschaftlichen Gemeinschaft anerkannt werden und der Fünfte Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen sich ernsthaft mit dem Thema befassen wird. Tatsächlich war die Versauerung der Meere auch eines der Hauptthemen von Nebenveranstaltungen während der UN-Klimakonferenz in Kopenhagen in 2009, wie zum Beispiel dem „Tag der Ozeane“ („Oceans Day“), wenngleich gezielte Überlegungen zum Thema Ozeane im zentralen Abschlussdokument der Konferenz kaum bis gar keine Erwähnung fanden. --- *J. Kleypas, C. Turley*

***Warum ist es so wichtig, die Versauerung der Ozeane und ihre Auswirkungen zu erforschen?
Und was können Wissenschaftler tun?***

Im Vergleich zu terrestrischen Systemen ist sind die Ozeane und ihre Ökosysteme sehr wenig untersucht. Mit den jüngsten technischen Fortschritten vermehrt sich unser Wissen zwar schnell, doch haben wir immer noch viel zu lernen. Damit Entscheidungsträger fundierte

Entscheidungen treffen können, müssen Wissenschaftler ihnen die bestmöglichen Informationen geben. Dazu braucht es die Forschung. Jeder muss begreifen, dass das Einholen und die Verteilung dieser Erkenntnisse einen großen Arbeitsaufwand erfordert und dass klare, offene Kommunikation zwischen Wissenschaftlern, Entscheidungsträgern und Bürgern von entscheidender Bedeutung ist.

Wissenschaftler haben die Frage, ob die Versauerung der Meere real ist, mit ja beantwortet. Jetzt sind wir mit folgenden Fragen konfrontiert: „Wie schlimm wird es?“ und „Was kann dagegen getan werden?“ Die Mehrheit der Wissenschaftler stimmt darin überein, dass eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen die beste Antwort auf die zweite Frage ist. Die Frage nach dem Ausmaß ist die wichtigste und am schwersten zu beantwortende, weil wir uns sehr genau bewusst sind, dass der CO₂-Gehalt der Atmosphäre in absehbarer Zukunft weiter ansteigen wird. Viele Wissenschaftler konzentrieren sich jetzt darauf, welche CO₂-Konzentration als „gefährlich“ für den Planeten und die menschliche Gesellschaft betrachtet werden sollen. Die Beantwortung der Frage, was getan werden kann, hat sich von „was kann gegen die Ursache des Problems unternommen werden“ hin zu „wie kann man mit seinen Folgen umgehen“ verschoben. Im Wesentlichen suchen wir eine Antwort auf die Frage „wie werden zukünftige Ökosysteme aussehen und welche Dienstleistungen werden sie für den Planeten und die Menschheit erbringen?“. Das ist eine riesige Herausforderung. Viele dieser Fragen beweisen, dass die Versauerung der Ozeane ein einfaches Problem mit komplizierten Folgen ist. --- *J. Kleypas, C. Turley, R. Key*

Wissenschaftler, die zum diesem Dokument beigetragen oder bei der Revision geholfen haben

Jim Barry, Senior Scientist, Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA

Jelle Bijma, Biogeochemist, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Germany

Ken Caldeira, Senior Scientist, Carnegie Institution for Science, USA

Anne Cohen, Research Specialist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Sarah Cooley, Postdoctoral Investigator, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Scott Doney, Senior Scientist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

Richard A. Feely, Senior Scientist, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA

Helen Findlay, Lord Kingsland Fellow, Plymouth Marine Laboratory, UK

Jean-Pierre Gattuso, Senior Scientist, Centre National de la Recherche Scientifique and Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France

Jason Hall-Spencer, Marine Biology Lecturer, University of Plymouth, UK

Michael Holcomb, Postdoctoral Research Associate, Centre Scientifique de Monaco, Monaco

David Hutchins, Professor of Marine Environmental Biology, University of Southern California, USA

Debora Iglesias-Rodriguez, Lecturer, National Oceanography Centre of the University of Southampton, UK

Robert Key, Research Oceanographer, Princeton University, USA

Joan Kleypas, Scientist III, National Center for Atmospheric Research, USA

Chris Langdon, Associate Professor, University of Miami, USA

Daniel McCorkle, Associate Scientist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA

James Orr, Senior Scientist, Laboratory for the Sciences of Climate and Environment, France

Hans-Otto Pörtner, Professor, Alfred Wegener Institute, Germany

Ulf Riebesell, Professor, Leibniz Institute of Marine Sciences IFM-GEOMAR, Germany

Andy Ridgwell, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Christopher L. Sabine, Supervisory Oceanographer, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA

Daniela Schmidt, Senior Research Fellow, University of Bristol, UK

Brad Seibel, Assistant Professor of Biological Sciences, University of Rhode Island, USA

Carol Turley, Senior Scientist, Plymouth Marine Laboratory, UK

Steve Widdicombe, Benthic Ecologist, Plymouth Marine Laboratory, UK

Richard Zeebe, Associate Professor, University of Hawaii at Manoa, USA

27 Wissenschaftler, 20 Institutionen, 5 Länder

Dokument aus dem Englischen übersetzt von Anna McIntyre-Wressnig (Woods Hole Oceanographic Institution) und Daniela Böttjer (University of Hawaii)