

Auf den Punkt gebracht

Ein aktueller Blick auf das globale Problem der Ozeanversauerung für alle, die mehr wissen wollen

In diesem Heft beantworten wir einige wichtige Fragen, die sich viele Menschen zurzeit über Ozeanversauerung stellen. Wir erläutern, wie sicher die Aussagen sind, die die internationale Wissenschaftsgemeinschaft aktuell über das treffen kann, was zurzeit in den Ozeanen passiert. Wir diskutieren, wie sich der Ozean durch die zukünftig erhöhten CO₂ – Konzentrationen verändern könnte. Und wir untersuchen die Konsequenzen, die diese Entwicklung für uns alle haben kann.

Die vorliegende Broschüre ist die Fortsetzung des international gefragten Heftes „Ozeanversauerung: Die Fakten“, das wir im Winter 2009 anlässlich der UN Klimakonferenz in Kopenhagen in englischer, französischer, spanischer, chinesischer und arabischer Sprache veröffentlicht haben. Die Broschüre ist etwas fachsprachlicher gehalten, da sie wichtige Erkenntnisse der Wissenschaft darstellt und häufig gestellte Fragen erörtert.

Indem wir kritische Themen auf den Punkt bringen und sie leichter verständlich machen, hoffen wir, nicht nur eine breite Öffentlichkeit besser über Ozeanversauerung zu informieren. Wir möchten die Menschen auch in die Lage zu versetzen, sich gemeinschaftlich, zielbewusst und mit größerem Nachdruck für die Lösung eines der größten Umweltprobleme einzusetzen, mit dem die gegenwärtige und die nachfolgende Generation konfrontiert sein wird.

Zwei Jahre nach der Erklärung von Monaco

Vor zwei Jahren war ich Gastgeber eines Treffens von mehr als 150 führenden Meereswissenschaftlern aus 26 Ländern. Organisiert wurde dieses Treffen von der „Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC)“, dem „Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR)“, der Regierung von Monaco und von meiner Stiftung. In einem gemeinsamen Aufruf appellierten die anwesenden Wissenschaftler an Entscheidungsträger, sich umgehend für die Reduktion von Kohlendioxidemissionen einzusetzen. Die Teilnehmer drängten auf eine starke Reduzierung, damit weitreichende und schwerwiegende Schäden an den marinen Ökosystemen durch die Ozeanversauerung noch abgewendet werden können. Diese Warnung wurde zum Kern der Erklärung von Monaco, die ich mit großer Freude voll und ganz unterstützte.

Seitdem haben Forscher auf der ganzen Welt wichtige Arbeiten über Ozeanversauerung durchgeführt. Einige Ergebnisse stellten frühere Vorhersagen über die Folgen der Ozeanversauerung in Frage. Doch das meiste, was wir seit der Erklärung von Monaco herausgefunden haben, verstärkt deutlich die Besorgnis über die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Konsequenzen, die unsere Kohlendioxidemissionen für den Ozean und damit auch für uns haben werden.

Ich freue mich sehr darüber, dass meine Stiftung diese Broschüre fördern kann. Die Welt der Wissenschaft hat sich ein weiteres Mal zusammengeschlossen – diesmal gemeinsam mit der „Ocean Acidification Reference User Group“, einem internationalen Komitee aus Vertretern der Forschung, der Wirtschaft, des Umweltschutzes und der Öffentlichkeit – um sich eines neuen Problems anzunehmen: dem Problem der Verunsicherung und der Desinformation über Ozeanversauerung.

Ich bin überzeugt, dass diese Broschüre mit ihren Erklärungen und Antworten auf neu auftauchende Fragen helfen wird, den Weg für Entscheidungen frei zu machen und Hürden zu überwinden, die derzeit noch einem zügigeren Fortschritt im Umgang mit dem Problem der Ozeanversauerung im Wege stehen.

S.D. Fürst Albert II von Monaco



Photo © Palais Princier

Der Hintergrund

Seit dem Ende der ersten industriellen Revolution im 19. Jahrhundert wurden durch die ausgiebige Verbrennung fossiler Energieträger, die Entwaldung und die Zementherstellung 440 Milliarden Tonnen CO_2 in die Atmosphäre entlassen (die Hälfte davon in den vergangenen 30 Jahren). Diese massive Freisetzung von bis dahin „eingelagertem“ Kohlenstoff kurbelt den natürlichen Treibhauseffekt an und gefährdet die Stabilität des Klimas auf unserem Planeten. Zu unserem Glück haben der Ozean und die Vegetation mehr als die Hälfte dieses zusätzlichen CO_2 aufgenommen und so das Tempo und das Ausmaß der Auswirkungen des Klimawandels bisher gedämpft – dies allerdings mit anderen Folgen, vor allem für den Ozean.

Das „andere CO_2 -Problem“

Wenn sich das von Menschen in die Atmosphäre entlassene CO_2 im Meerwasser löst, laufen verschiedene chemische Prozesse ab. Sie werden unter dem Begriff „Ozeanversauerung“ zusammengefasst – und sind außerdem als das „andere CO_2 -Problem“ bekannt.

Das Phänomen der Ozeanversauerung ist erst seit kurzem bekannt – und doch können seine Folgen genauso verheerend sein wie die des vom Klimawandel verursachten globalen Temperaturanstiegs. Während der Klimawandel schwer zu fassen ist, lässt sich die Versauerung des Ozeans messen und vorausberechnen. Aktuelle Studien zeigen, dass die Meeresoberfläche das CO_2 zurzeit 100 mal schneller aufnimmt – und damit auch die Ozeanversauerung 100 mal schneller vorantreibt – als vor 20.000 Jahren am Ende der letzten Eiszeit – dem letzten sprunghaften Anstieg von CO_2 .

Ansicht eines Riffs aus Kaltwasserkorallen in 220 Metern Wassertiefe, aufgenommen auf einer Tauchfahrt mit dem Forschungstauchboot JAGO.

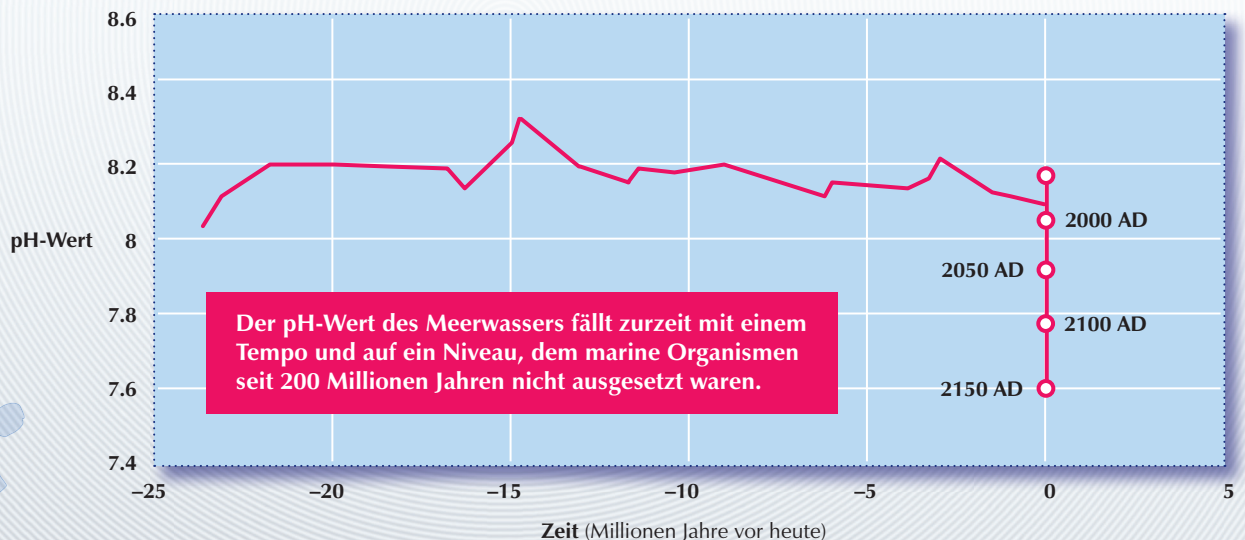


Photo © Karen Hismann, IFM-GEOMAR

Die Ozeane versauern schnell

Veränderungen im pH-Wert des Meerwassers während der letzten 25 Millionen Jahre

Quelle: nach Turley et al. in *Avoiding Dangerous Climate Change* (2006).



Verwirrung auflösen, Klarheit schaffen

Außerhalb der Wissenschaftsgemeinschaft wurde die Ozeanversauerung erstmals als wichtiges Thema wahrgenommen, als die britische Wissenschaftlervereinigung der „Royal Society“ im Jahr 2005 ihren Report „Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide“ veröffentlichte. Wissenschaftliche Artikel berichteten erstmals in den 1970er Jahren über das Phänomen, doch erst ungefähr zehn Jahre vor dem Report der Royal Society gab es Studien zu dem Thema. Seit 2005 wurden national und von der EU geförderte Forschungsprojekte zu diesem Thema eingerichtet und obwohl noch viele Fragen unbeantwortet sind, besteht Einigkeit darüber, dass Ozeanversauerung stattfindet und dass sie eine Bedrohung für Lebewesen und Ökosysteme im Meer darstellt. Das Statement des „Inter-Academy Panel on International Issues“ zur Ozeanversauerung erklärt beispielsweise, dass die Ozeanversauerung selbst dann tiefgreifende Folgen für viele marine Systeme haben wird, wenn sich der atmosphärische CO₂ Gehalt bei 450 ppmv¹ einpendelt. Eine umfassende und schnelle Reduzierung

der weltweiten CO₂-Emissionen um mindestens 50 Prozent bis 2050 werden daher als notwendig erachtet.

Eine der größten Herausforderungen in der Verbreitung der Erkenntnisse über die Ozeanversauerung ist die Tatsache, dass viele Menschen die Wissenschaft für komplex und schwer verständlich halten – ein Problem das schnell gelöst werden muss. Dies ist entscheidend, damit wir uns mit gemeinsamer Anstrengung und dem nötigen Nachdruck dafür einsetzen können, unsere CO₂-Emissionen zu reduzieren und mögliche Konsequenzen der Ozeanversauerung zu begrenzen. Um diesen Prozess zu unterstützen, haben sich im Winter 2009 im Anschluss an die UN Klimakonferenz in Kopenhagen 27 führende Wissenschaftler von 19 Instituten aus fünf Ländern zusammengetan, um Informationen und Antworten auf die Fragen zu liefern, die jetzt über Ozeanversauerung gestellt werden.² Diese wissenschaftliche Analyse und Diskussion stellte die Basis für die vorliegende Broschüre dar.

Der antarktische Ozean ist eine der Regionen, in denen sich die Veränderungen im pH-Wert des Meerwassers am schnellsten vollziehen.



Photo © John M. Baxter

Selbst, wenn sich das atmosphärische CO₂ bei 450 ppmv einpendelt, kann die Ozeanversauerung tiefgreifende Folgen für viele marine Systeme haben.

1. ppmv steht für „parts per million by volume“. Ein Teil pro Million an Volumen ist genauso groß wie ein Volumen eines bestimmten Gases, das in einer Million Volumen Luft gelöst ist.

2. Dies ist die Arbeit des amerikanischen Programms „Ocean Carbon and Biogeochemistry (OCB; www.us-ocb.org)“, das vom „European Project on Ocean Acidification (EPOCA; www.epoca-project.eu)“, dem britischen „Ocean Acidification Research Programme (www.oceanacidification.org.uk)“ und dem deutschen Biological Impacts of Ocean Acidification (BIOACID; <http://www.bioacid.de/>) unterstützt wird. Führende Forscher aus dem Bereich der Ozeanversauerung erarbeiteten Antworten auf 39 häufig gestellte Fragen (FAQs), die anschließend in einem offenen Begutachtungsverfahren geprüft wurden.

Wichtige laufende Studien

EUROPÄISCHE UNION

Die europäische Kommission unterstützt das „European Project on Ocean Acidification“ (Europäisches Projekt zur Ozeanversauerung; EPOCA), das dieses Phänomen und dessen Konsequenzen im Rahmen einer multinationalen Initiative erforscht und 31 Partnerinstitutionen aus zehn Europäischen Ländern vereinigt. Ziel der EPOCA-Forschung ist es, Ozeanversauerung und deren Auswirkungen auf marine Organismen und Ökosysteme zu untersuchen, die Risiken einer fortgesetzten Versauerung zu identifizieren und zu verstehen, wie diese Effekte das System Erde beeinflussen werden. Das vor kurzem gestartete Projekt „Mediterranean Sea Acidification under changing climate“ (Versauerung des Mittelmeeres im Klimawandel; MedSeA) wird die Versauerung des Mittelmeeres ins Visier nehmen.

DEUTSCHLAND

Im Projekt „Biological Impacts of Ocean Acidification“ (Biologische Auswirkungen von Ozeanversauerung; BIOACID) arbeiten 18 deutsche Forschungseinrichtungen zusammen. Es wird seit September 2009 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in einer dreijährigen Startphase gefördert. Das Hauptaugenmerk von BIOACID, das eng mit EPOCA und dem britischen Programm zu Ozeanversauerung kooperiert, liegt auf den Konsequenzen für die marinen Ökosysteme in ihrer gesamten Bandbreite und insbesondere auf den Folgen für die Ressourcen der Meere und mögliche biogeochemische Rückkopplungen auf das Klimasystem.

CHINA

Das Ministerium für Wissenschaft und Technologie und die „National Science Foundation of China“ (NSFC) haben damit begonnen, die Erforschung der Ozeanversauerung zu unterstützen. Das neue, auf fünf Jahre angelegte Projekt CHOICE-C befasst sich mit Themen rund um CO₂-Anstieg und Ozeanversauerung in chinesischen Randmeeren. Es handelt sich um ein Gemeinschaftsprojekt von sieben großen Institutionen und verfügt über eine Summe von 34 Millionen RMB. Die NSFC unterstützt die Erforschung der Ozeanversauerung seit 2006. Auf nationaler Ebene laufen aktuell mehrere Arbeiten, die die Auswirkungen von Ozeanversauerung auf kalkbildende Organismen untersuchen.

REPUBLIK KOREA (Südkorea)

Die „Korea Science and Engineering Foundation“ (KOSEF) unterstützt das für fünf Jahre geplante „Korea Mesocosm Project“, mit dessen Hilfe die Effekte steigender Temperaturen und CO₂ Gehalte auf natürliche Phytoplankton-Gemeinschaften untersucht werden. Fünf koreanische Labore sind beteiligt.

JAPAN

Fünf Programme finanzieren in Japan Arbeiten zur Ozeanversauerung. Das japanische Umweltministerium unterstützt Forschungsprogramme, die zukünftige Auswirkungen der Ozeanversauerung auf verschiedene marine Lebewesen untersuchen. Das Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Sport und Kultur und JAMSTEC (Japan Agency for Marine Science and TEchnology – Japanische Behörde für marine Wissenschaften und Technologie) unterstützen die Erforschung der Ozeanversauerung ebenfalls, etwa die Modellierungen mit dem Supercomputer „Earth Simulator“, der Bedingungen im Ozean der Zukunft vorausberechnet.

GROSSBRITANNIEN

Zwischen 2004 und 2007 wurde eine Studie zu Auswirkungen von CO₂ auf die marine Umwelt durchgeführt (IMCO₂; Implication for the Marine Environment), getragen von den britischen Ministerien für Umwelt, Nahrung und Landwirtschaft (DEFRA) sowie für Handel und Industrie (DTI). Im Frühjahr 2010 startete Großbritannien ein fünfjähriges, 12 Millionen britische Pfund umfassendes Programm, das die Veränderungen in marinen Ökosystemen als Folge der Ozeanversauerung untersuchen soll. Die Kosten teilen sich das Natural Environment Research Council (NERC) mit dem DEFRA und dem Ministerium für Energie um Klimawandel (DECC). An dem Programm, das mit BIOACID und EPOCA kooperiert, sind 21 britische Forschungseinrichtungen beteiligt.

VEREINIGTE STAATEN

Im März 2009 unterzeichnete Präsident Obama den Federal Ocean Acidification Research and Monitoring Act (FOARAM). Das Gesetz im US Public Law 111-11 sieht für die nächsten Jahre Zuwendungen in Höhe von mehreren Millionen Dollar für die Erforschung der Ozeanversauerung vor. In Übereinstimmung mit dem Gesetz entwickeln die National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), die National Science Foundation (NSF) und andere staatliche Einrichtungen gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Ozeanversauerung des Ocean Research and Resources Advisory Panel (ORRAP) ein nationales Programm zur Erforschung der Ozeanversauerung. Seit 2010 sammelt die institutionsübergreifende Interagency Working Group on Ocean Acidification die Beiträge aller Beteiligten, um einen nationalen Plan zur Beobachtung und Erforschung der Ozeanversauerung, zur Bewertung ihrer Folgen und zur Entwicklung von Schutz-Strategien zu erstellen. Dieser Plan soll im März 2011 im Kongress präsentiert werden. Mehrere Behörden haben bereits mit der Förderung von Forschungsvorhaben, Überwachungsprogrammen und Öffentlichkeitsarbeit begonnen.

AUSTRALIEN

Australische Studien zur Ozeanversauerung konzentrieren sich auf die Antarktis und Australasien. Das Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre – ein Zusammenschluss der Australian Antarctic Division (AAD), der Universität Tasmanien, der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), des australischen Ministeriums für Klimawandel und Energieeffizienz (DCCEE), des neuseeländischen National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA) und des Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) – finanziert die Erforschung des Südlichen Ozeans einschließlich der Veränderungen in der Chemie des Meerwassers und die Reaktionen der Lebewelt.

Für die Tropen haben CSIRO, die amerikanische National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), das japanische National Institute for Environmental Studies (NIES) und die Universität Queensland ein Beobachtungs- und Modellierungsprogramm rund um das Great Barrier Reef und den Südpazifik gestartet. Auch das Australian Institute of Marine Science (AIMS) und verschiedene Universitäten (Australian National University, University of Queensland, University of Sydney, James Cook University) beschäftigen sich mit dem äußerst verletzlichen Riff.

Die Fakten

Viele Menschen, die zum ersten Mal vom Phänomen der Ozeanversauerung hören, stellen sich zwei Fragen: Was ist Ozeanversauerung? Findet sie tatsächlich statt?

Die Gründe für eine solche Reaktion sind in der mangelnden Kenntnis über den Ozean zu suchen, in widersprüchlichen Aussagen darüber, ob der Klimawandel existiert und in der Überraschung, dass es neben dieser Bedrohung, die uns jetzt gerade beschäftigt, noch ein zweites großes Thema gibt.

Daher glauben die meisten Menschen, dass Ozeanversauerung, was immer dies ist, genauso real oder genauso unwirklich wie der Klimawandel sein kann – wahrscheinlich sogar nichts großartig anderes ist als dieser. So bleibt ihnen verborgen, dass bereits Klarheit über die Existenz und die Grundlagen der Ozeanversauerung besteht – während viele Aspekte des Klimawandels noch mit Unsicherheiten behaftet sind.

Was ist Ozeanversauerung?

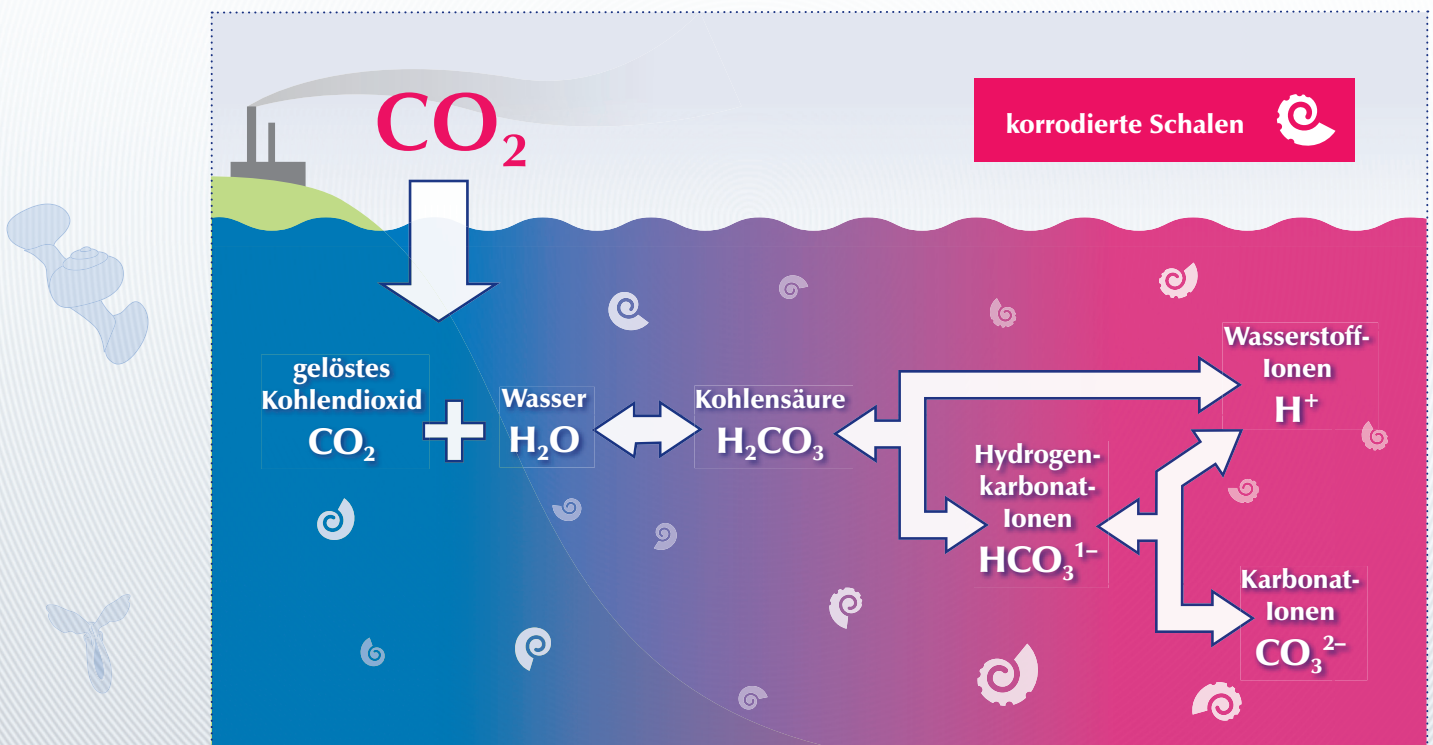
Die Zunahme an CO_2 in der Atmosphäre führt dazu, dass das Wasser der Ozeane saurer wird. Dieser Vorgang wird als Ozeanversauerung bezeichnet. Er tritt auf, wenn CO_2 mit Wasser reagiert und Kohlensäure bildet. Je schneller der Anteil an CO_2 in der Atmosphäre wächst, desto schneller vollzieht sich auch die Versauerung des Ozeans.

Karbonat und Säuregrad verstehen

Es gibt einen großen Unterschied zwischen der Ozeanversauerung und dem Klimawandel. Mit „Klimawandel“ ist eine ganze Reihe an Veränderungen gemeint, die der Mensch auslöst, indem er natürliche Prozesse in einer Art und Weise beeinflusst, die sich zum Teil bereits genau vorhersagen und zum Teil erst sehr vage umreißen lassen. Ozeanversauerung ist die Reaktion des Meeres auf vom Wasser absorbiertes CO_2 . Der Begriff fasst mehrere Abläufe zusammen, die auftreten, wenn CO_2 mit Seewasser reagiert. Zwei Reaktionen sind dabei besonders wichtig. Erstens: die Entstehung von Kohlensäure und die anschließende Freisetzung von Wasserstoffionen:



Die Verbrennung fossiler Energieträger führt zu einer Zunahme von CO_2 in der Atmosphäre. Der Ozean nimmt das CO_2 auf und wird dadurch saurer. Quelle: University of Maryland.



Die pH-Skala

Die pH-Skala ist ein Maßstab, der angibt, wie sauer oder basisch (alkalisch) eine Flüssigkeit ist. Sie wurde 1909 entwickelt und ist ein logarithmischer Index für die Konzentration von Wasserstoff-Ionen in einer wässrigen Lösung. Die Skala steht auf dem Kopf, so dass die pH-Werte fallen, wenn die Menge der Wasserstoff-Ionen wächst. Reines Wasser hat einen pH-Wert von 7, niedrigere Werte werden als sauer bezeichnet, höhere als basisch. Eine Lösung mit pH-Wert 4 ist zehnmal saurer als eine mit pH-Wert 5 und hundertmal saurer als eine mit pH-Wert 6. Meerwasser hat zurzeit einen pH-Wert von etwa 8,1 und gilt darum als schwache Base. Obwohl die pH-Skala normalerweise Werte zwischen 0 und 14 angibt, sind niedrigere und höhere Werte theoretisch möglich.

Die oben dargestellte Reaktion und die Freisetzung von Wasserstoff-Ionen steigern den Säuregrad und reduzieren den pH-Wert (siehe oben stehender Kasten). Daneben tritt eine zweite Reaktion zwischen Karbonat-Ionen, CO_2 und Wasser auf, bei der Hydrogenkarbonat-Ionen entstehen:



Der gemeinsame Effekt dieser beiden Reaktionen steigert nicht nur den Säuregrad, sondern sorgt auch dafür, dass weniger Karbonat-Ionen verfügbar sind. Diese werden zur Kalkbildung benötigt, also der Produktion und dem Wachstum von Kalkschalen und Kalkskeletten. Eine Reduktion der Karbonat-Ionen hat große biologische Bedeutung, weil sie die Geschwindigkeit beeinflusst, mit der marine Organismen – etwa Korallen, Muscheln, Schnecken, Seeigel und einige Algen – ihre Kalkschalen und Skelette aufbauen. Bei niedrigen pH-Werten (höherem Säuregrad) sind weniger Karbonat-Ionen verfügbar, und der Kalkbildungsprozess wird eingeschränkt oder sogar verhindert. Diese Folge der Ozeanversauerung kann darum katastrophale Konsequenzen für das Leben im Ozean und damit für viele Arten haben, die auch wirtschaftliche Bedeutung besitzen.

Das Konzept der Versauerung

Der Ozean hat zurzeit einen pH-Wert über 7,0 und ist darum basisch. Es ist sogar chemisch fast unmöglich, dass er komplett sauer wird. Warum sprechen wir dann von Ozeanversauerung? Weil dies die Richtung ist, in der die Entwicklung verläuft, der Trend unabhängig vom Ausgangspunkt. Derselbe Begriff wird auch in anderen Zusammenhängen verwendet, etwa bei der Weinproduktion, in der Blutchemie oder in der Bodenwissenschaft. Ein Vergleich ließe sich zu den Begriffen ziehen, mit denen wir Temperaturänderungen beschreiben: Ein Anstieg von 0°C auf 5°C ist für die meisten von uns noch immer kalt – und dennoch sprechen wir von einer „Erwärmung“.

Viele Faktoren können die grundlegenden chemischen Reaktionen zwischen CO_2 und Meerwasser beeinflussen und neben der Ozeanversauerung zusätzliche Folgen hervorrufen. Beispielsweise kann saurer Regen,

Experiment zur Auswirkung von Ozeanversauerung und –Erwärmung auf Kalkalgen.



Photo ©Sophie Martin (CNRS)

der Schwefel- und Salpetersäure enthält, die aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern stammen, auf die Küstengebiete fallen. Saurer Regen kann einen pH-Wert zwischen 1 und 6 haben. Seine Auswirkungen auf die Chemie der Ozeanoberfläche können lokal und regional beträchtlich sein – global gesehen sind sie jedoch vernachlässigbar. Küstengewässer können auch unter einer Überversorgung mit Nährstoffen leiden – vor allem unter dem Stickstoff aus Landwirtschaft und Abwässern. Die daraus resultierende Überdüngung führt zur explosionsartigen Vermehrung von Phytoplankton („Planktonblüten“). Wenn diese Blüten absterben und zum Meeresboden sinken, werden sie von Bakterien zersetzt. Durch die Atmung der Bakterien fällt der Sauerstoffgehalt im Meerwasser, der CO_2 -Gehalt steigt und führt zu einer lokalen Versauerung.

0	Batteriesäure
1	Salzsäure
2	Zitronensaft
3	Bier, Essig
4	Wein, Tomaten
5	Schwarzer Kaffee
6	Urin, Milch
7	Reines Wasser, Blut
8	Meerwasser
9	Seifenlauge
10	Magnesiamilch
11	Haushalts-Ammoniak
12	Haushalts-Bleichmittel
13	Ofenreiniger
14	Natronlauge

Wie sicher sind wir, dass Ozeanversauerung tatsächlich stattfindet?

Ein sehr hoher Grad an Gewissheit

Es ist sicher, dass sich die Chemie des Seewassers aufgrund des wachsenden CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre ändert und dass menschliches Handeln die Ursache dafür ist.

Den deutlichsten Beweis liefern detaillierte Messungen in vielen Teilen der Welt – beispielsweise die seit 20 Jahren laufenden Aufzeichnungen vor der Hawaiianischen Küste, die unten dargestellt sind. Auch wenn es eine deutliche saisonale Variabilität gibt, ist ein eindeutiger Anstieg des CO_2 und ein rückläufiger pH-Wert in der oberen Schicht des Ozeans klar erkennbar. Diese Trends sind eng an die Veränderungen im atmosphärischen CO_2 gekoppelt. Auf der logarithmischen pH-Skala ist ein Absinken des pH-Werts um 0,1 Einheiten seit der Zeit vor der Industrialisierung abzulesen. Dies erscheint wegen der logarithmischen Darstellung gering, entspricht aber in Wirklichkeit einem Anstieg der Wasserstoff-Ionen um 30 Prozent.

Computermodelle, die den derzeitigen anthropogenen CO_2 -Ausstoß berücksichtigen, simulieren den Abfall des pH-Werts und des Karbonat-Gehalts sehr genau.

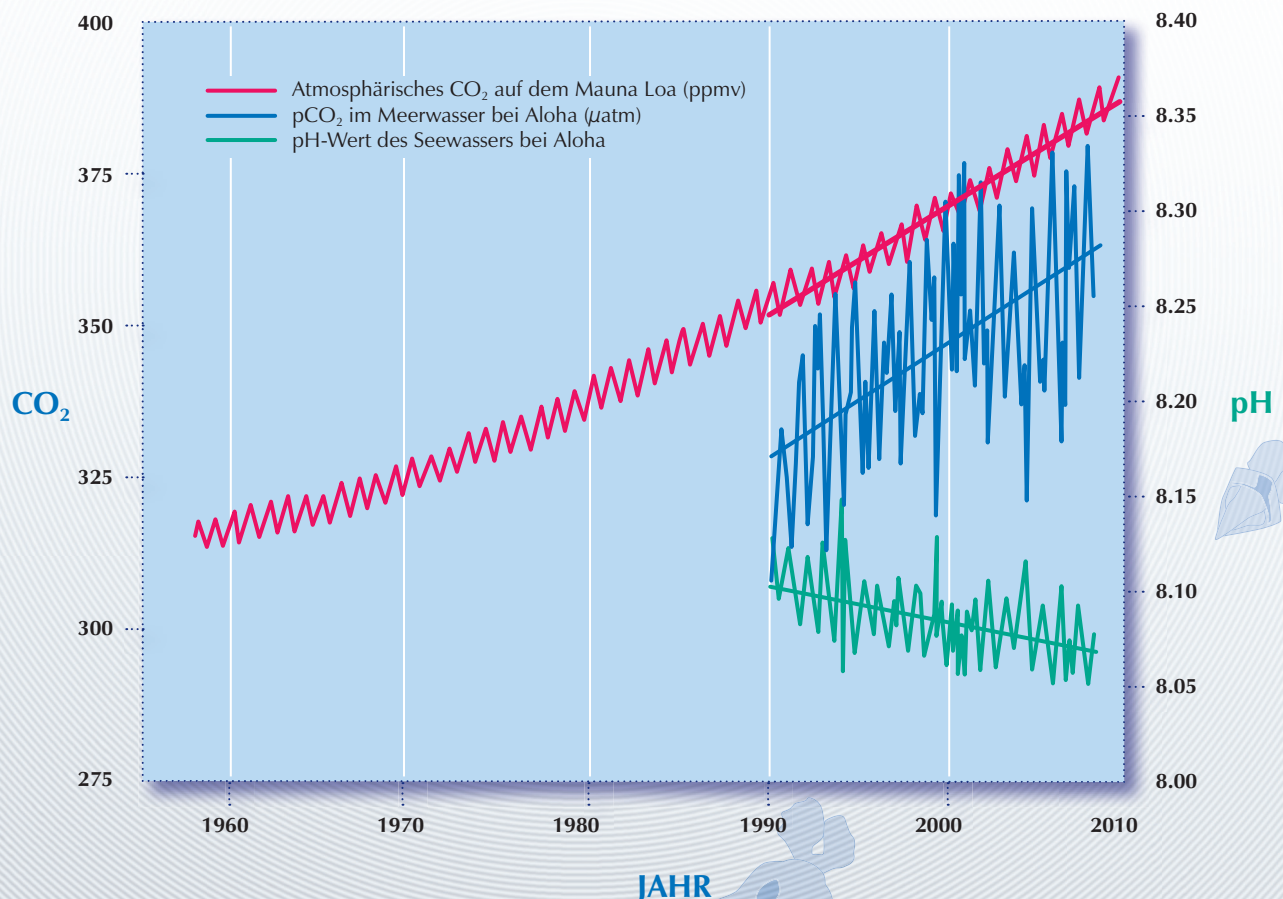


Photo © Christopher Sabine

Eine verankerte Messboje der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) im Pazifik. Sie misst den CO_2 -Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre.

Zeitreisenaufzeichnung von atmosphärischem CO_2 auf dem Mauna Loa sowie pH-Wert und pCO_2 (Kohlendioxidpartialdruck) im Oberflächenwasser an der Station Aloha im Pazifischen Ozean.

Quelle: nach Feely et al., *Oceanography* (2009).



Verschiedene Ozeane, unterschiedliche Raten

Ozeanversauerung betrifft alle Meere. Sie wird jedoch in einigen Teilen der Welt schneller ablaufen als in anderen. Je nach Temperatur und Strömungsmustern werden auch die Folgen variieren. Die Karbonatsättigung im Meerwasser, die derzeit hoch genug ist, damit Kalkstrukturen wie Schalen und Skelette erhalten bleiben („übersättigte“ Bedingungen), kann so weit absinken, dass diese soliden Gebilde anfangen, sich aufzulösen („untersättigte“ Bedingungen). Modellbasierte Vorhersagen zeigen, dass der Arktische Ozean diese chemische Schwelle als erstes überschreiten wird, so dass der Karbonatwert im Wasser dort von übersättigt zu untersättigt wechselt.

Wenn der atmosphärische und ozeanische CO₂-Gehalt weiter im derzeitigen Maße ansteigt, werden etwa zehn Prozent des Arktischen Ozeans diese Schwelle bis 2018 überschritten haben. Bis 2050 wird die Hälfte betroffen sein. Bis 2100 würden voraussichtlich im gesamten Arktischen Ozean Bedingungen herrschen, unter denen sich ungeschützte Kalkstrukturen auflösen.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich die Chemie des Seewassers aufgrund des wachsenden CO₂-Gehalts in der Atmosphäre ändert und dass menschliches Handeln die Ursache dafür darstellt.



Photo © Ulf Riebsell, IfM-GEOMAR

Mitglieder des Projekts EPOCA arbeiten während eines CO₂-Experiments in der Arktis vor der Küste von Spitzbergen an einem Mesokosmos.



Photo © Jean-Pierre Cattaneo

Mesokosmen-Experimente sind unabdingbar, um die Folgen der Ozeanversauerung für die Lebensgemeinschaften und Ökosysteme besser zu verstehen.

Mit dem Community Climate System Modell 3.1 (CCSM3) des National Center for Atmospheric Research berechnete mittlere pH-Werte an der Meeresoberfläche für die Jahre 1875, 1995, 2050 und 2095.

Quelle: nach Feely et al., *Oceanography* (2009).

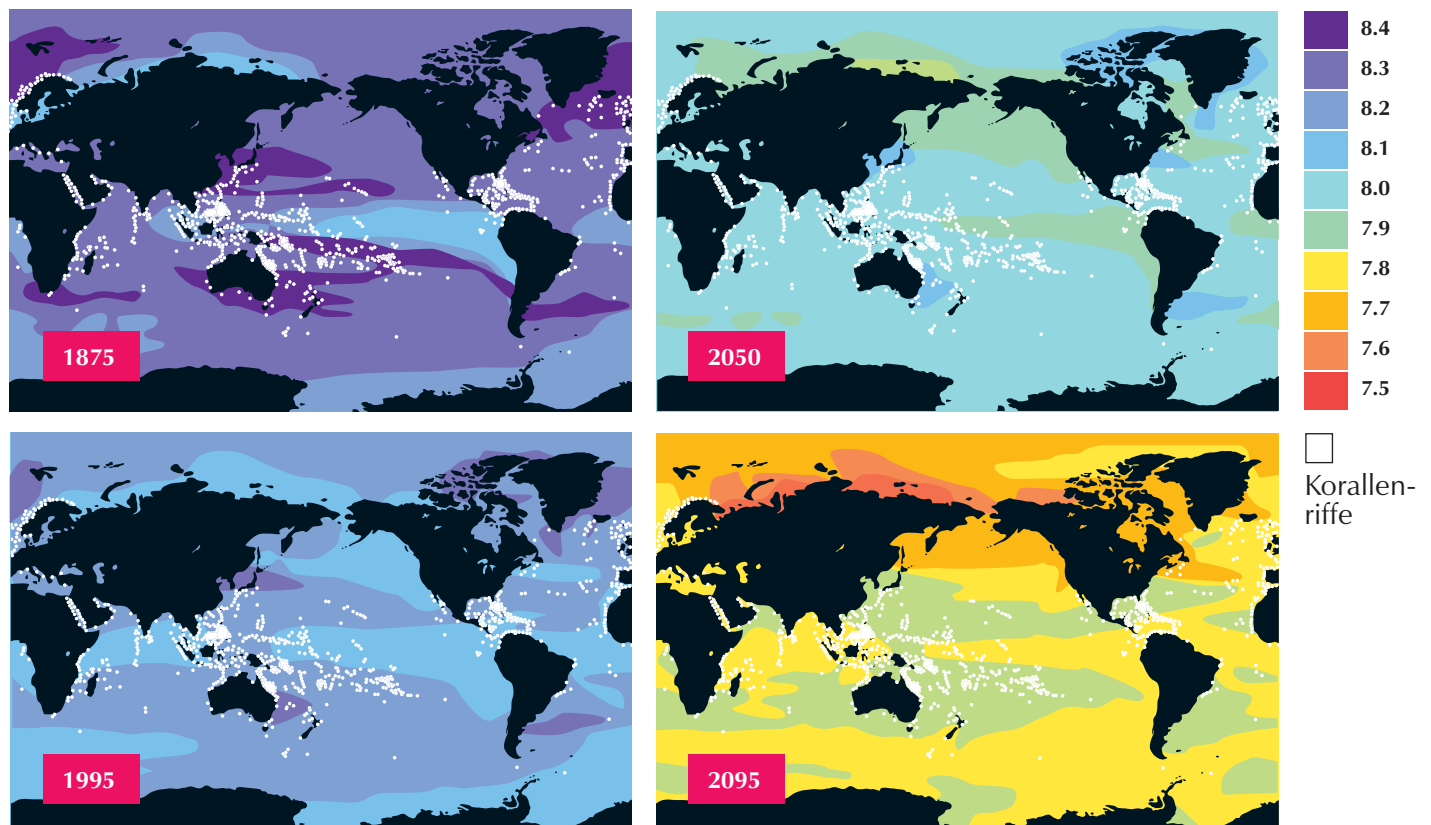


Photo © MNCRS/NH

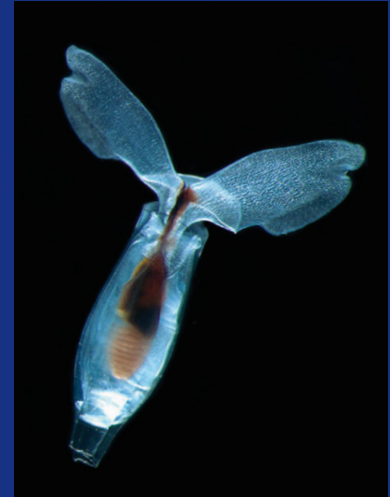


Die Schale des gemeinen Seeigels *Echinus esculentus* ist aus Kalzit.

Kalzit und Aragonit

Kalzit und Aragonit sind zwei Arten von Kalk. Kalzit ist die mineralische Form, die in den Schalen von mikroskopisch kleinen Kalkalgen und Kammerlingen, einigen Korallen, Seeigeln, Seesternen, Muscheln und Schnecken zu finden ist. Es ist relativ schwer auflösbar.

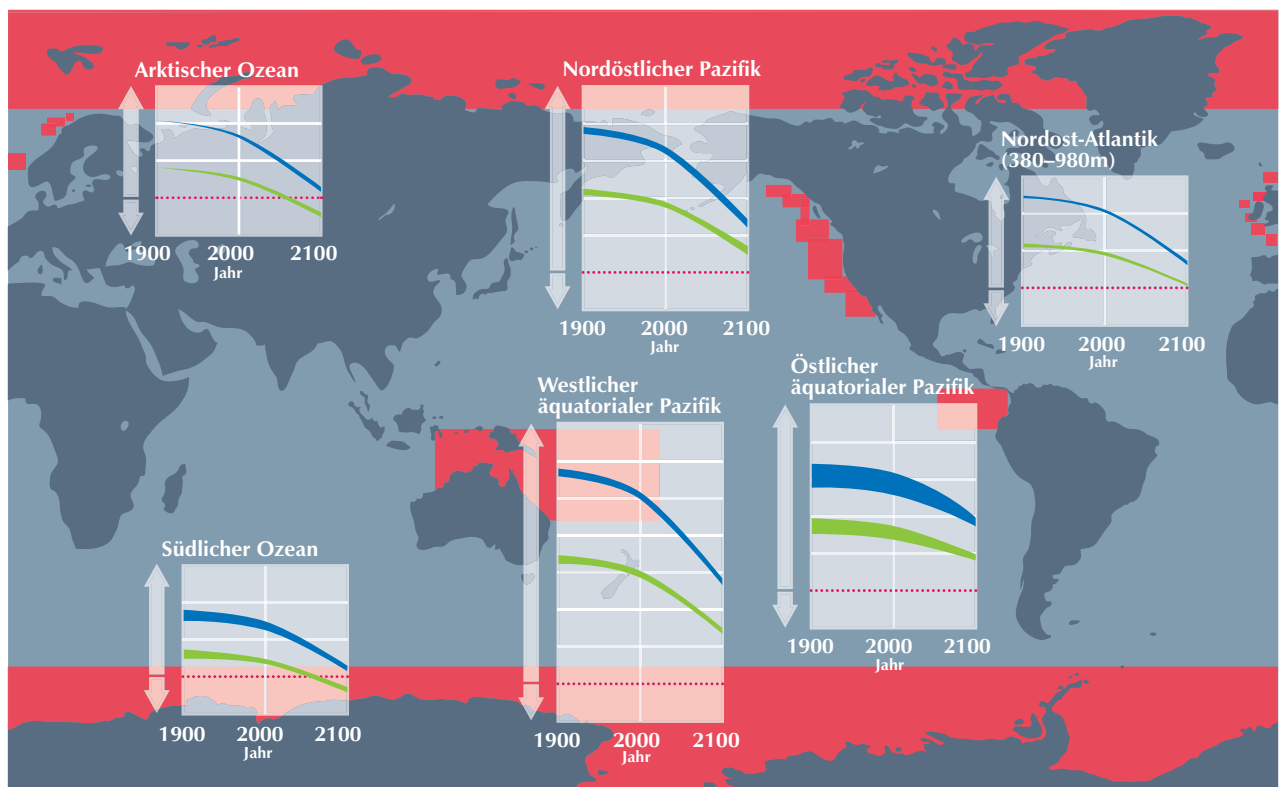
Aragonit ist dagegen eine leichter lösliche Form von Kalk. Es ist in den meisten Korallen, den meisten Weichtieren, einschließlich der frei schwimmenden Flügelschnecken, sowie in einigen Algen zu finden.



Die Schale der Flügelschnecke *Cuvierina columnella* ist aus Aragonit.

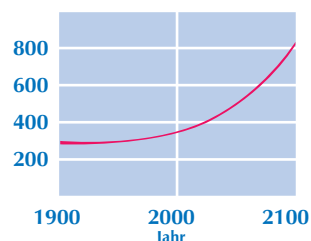
Photo © Hopcroft/UAF/COML

Geschätzte vergangene sowie für die Zukunft prognostizierte Veränderungen in der Ozeanchemie, die auf einer „Business as usual“-Annahme basieren – der Fortsetzung der CO₂-Emissionen wie bisher. Die sechs Graphen zeigen die Karbonat-Sättigung für die rot markierten Regionen – Werte über der rot-punktierten Linie zeigen übersättigte, die darunter unterschüttigte Bedingungen für Kalzit und Aragonit. Die Breite der Sättigungslinie illustriert saisonale Schwankungen. Der globale Durchschnitt von atmosphärischem CO₂, pH-Wert sowie Kalzit- und Aragonit-Sättigung werden im unteren Abschnitt gezeigt. Quelle: Turley et al., *Marine Pollution Bulletin* (2010).

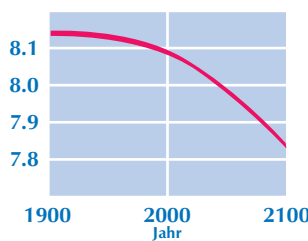


— Kalzit
— Aragonit

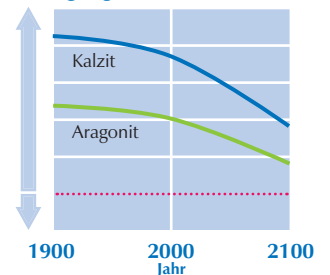
Atmosphärisches
pCO₂ (µatm)



pH-Wert an der
Ozeanoberfläche (SWS)

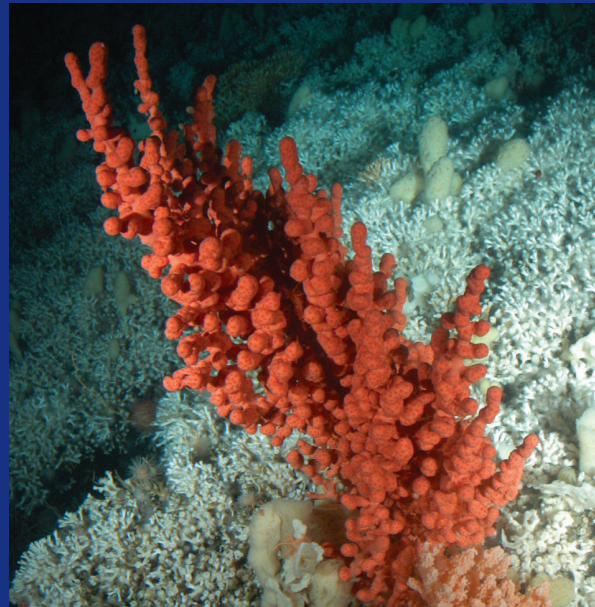


Sättigung an der Oberfläche



Sättigungshorizonte

Das kalte Ozeanwasser aus den tieferen Schichten ist natürlicherweise mit Karbonationen übersättigt und greift darum die Schalen der meisten kalkbildenden Organismen an. Das Oberflächenwasser ist übersättigt mit Karbonationen und zersetzt die Gehäuse nicht. Der Sättigungshorizont ist das Tiefenniveau, unter dem Kalk aufgelöst wird. Diejenigen Organismen, die unterhalb dieser Grenze überleben können, haben spezielle Mechanismen ausgebildet, um ihre Kalkschalen zu schützen. Weil Ozeanversauerung dazu führt, dass der Sättigungshorizont in der Wassersäule nach oben wandert, werden sich immer mehr kalkbildende Organismen in der übersättigten Schicht wiederfinden, in der ihre Schalen gefährdet sind. Der Sättigungshorizont für Kalzit liegt unterhalb dessen für Aragonit, aber beide sind seit dem 19. Jahrhundert zwischen 50 und 200 Metern näher an die Meeresoberfläche gerückt.



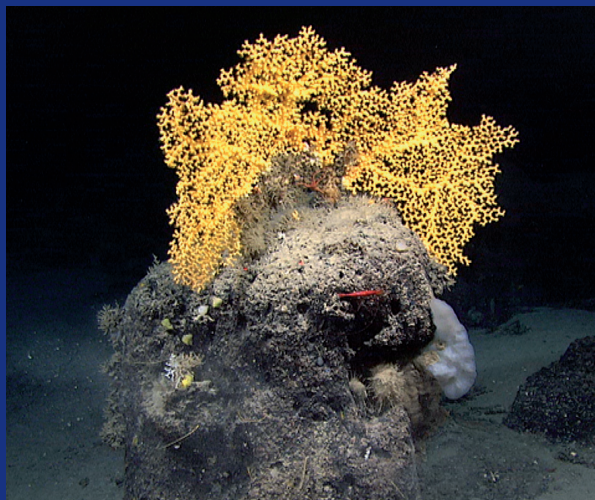
Steinkorallen wie *Lophelia pertusa* (weiße Koralle) baut ihr Skelett aus Aragonit. Sie ist besonders von dem aufsteigenden Sättigungshorizont betroffen. Gorgonien bzw. Hornkorallen (rote Koralle) bauen ihre Skelette aus Kalzit.

Ozeanversauerung und das kurz- und langfristige Schicksal des Kohlenstoffs im System

Auf langen Zeitskalen (mehr als 100.000 Jahre) gibt es eine natürliche Balance zwischen der Aufnahme und der Freisetzung von CO_2 auf der Erde. Das von Vulkanen produzierte CO_2 – der größten natürlichen CO_2 -Quelle – wird bei der Photosynthese der Pflanzen oder bei der Verwitterung von Gestein an Land aufgenommen. Allerdings dauert die Verwitterung zehntausende von Jahren. Sie wird also nicht das von der Menschheit in die Atmosphäre entlassene CO_2 schnell genug ausgleichen können.

Auf kürzeren Zeitskalen (einige 1.000 Jahre) kommt dem Ozean eine stabilisierende Rolle zu. Er verbindet den Kohlenstoffzyklus des Ozeans mit dem karbonatreichen Sediment. Dieser Prozess ist als Karbonat-Kompensation bekannt.

Die oberen Schichten des Ozeans sind meistens übersättigt mit Kalk, so dass nur wenig Auflösung stattfindet. In der Tiefe, die übersättigt ist, wird Karbonat jedoch leicht aufgelöst. Die Grenze zwischen diesen beiden Bereichen wird Lysokline genannt – die Tiefe, in der die Auflösung gerade beginnt. Kalk in Form von Schalen toter Organismen sinkt zum Meeresboden hinab. Im flacheren Wasser wird der Großteil davon im Sediment für Millionen von Jahren deponiert. Dort, wo Schalen unterhalb der Lysokline sinken, wird der Kalk gelöst.

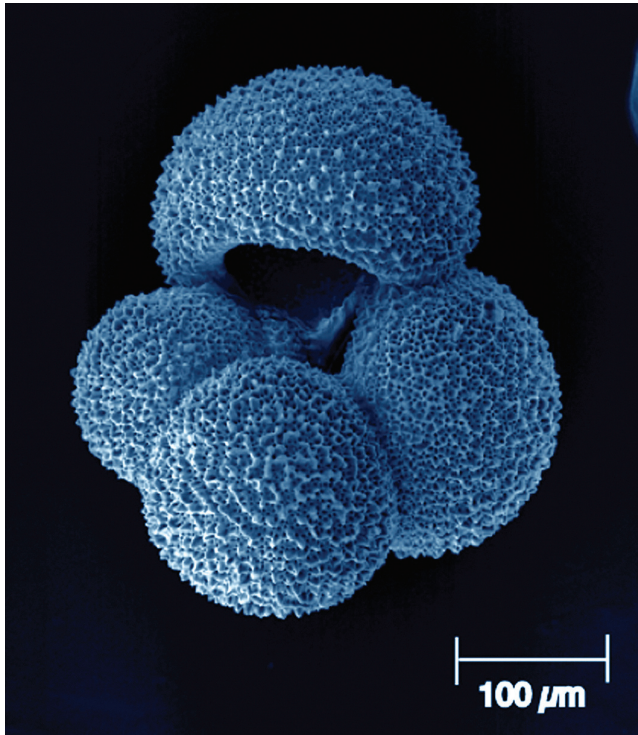


Sedimente am Meeresboden können als Senke für Kalzium-Karbonat fungieren.

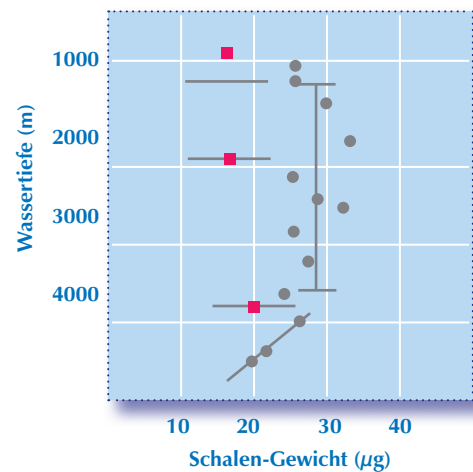
Da derzeit große Mengen von atmosphärischem CO_2 in den Ozean gelangen, entsteht ein Ungleichgewicht in Bezug auf die Lysokline. Wenn der pH-Wert des Ozeans fällt, verlagert sich die Lysokline in Richtung Meeresoberfläche. So wird eine wachsende Anzahl der im Sediment eingelagerten Schalen übersättigten Bedingungen ausgesetzt und aufgelöst. Die Kalklösung erhöht die Pufferung des Meerwassers, wirkt also der Ozeanversauerung entgegen. Dieser Prozess ist allerdings sehr langsam und beginnt erst nach einigen tausend Jahren zu wirken.

Die mit einer Sinkstofffalle aus dem sub-antarktischen Wasser geborgene planktische Foraminifere *Globigerina bulloides* stellt ihre Hülle aus Kalzit her.

Photo © Andrew Moy



Tatsache, dass die CO₂-Emissionen weiter steigen, gibt der Gewichtsverlust bei den Schalen von Foraminiferen wie *Globigerina bulloides* und anderen polaren Planktonarten wie Pteropoden, deren Schalen aus dem leichter löslichen Aragonit bestehen, Anlass zur Besorgnis. Denn Pteropoden spielen eine besonders wichtige Rolle im Nahrungsnetz der Antarktis. Einerseits sind sie Futter für viele Organismen einschließlich der Fische. Andererseits dienen ihre Schalen nach ihrem Tod als Ballast für das Absinken von organischem Kohlenstoff. Somit entziehen sie der Atmosphäre Kohlenstoff und transportieren diesen in die Tiefe, wo er langfristig gespeichert wird.



Höhere Breiten, leichteres Plankton?

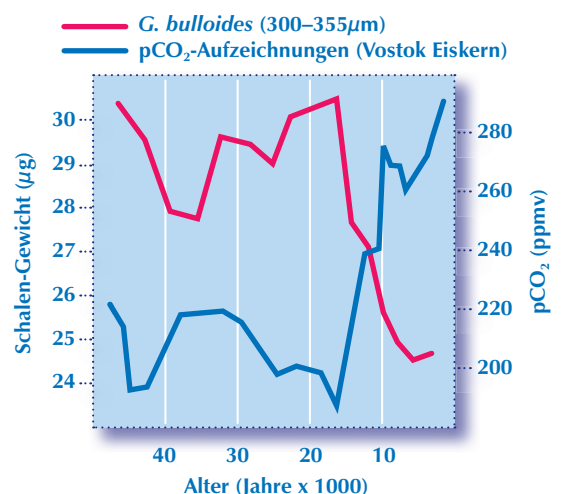
Die Untersättigung von Aragonit – also der chemische Zustand, in dem die Auflösung beginnt – wird Vorausberechnungen zufolge im Südpolarmeer zwischen 2030 und 2070 einsetzen. Laborexperimente und Beobachtungen vor Ort lassen vermuten, dass bereits zuvor aufgrund des sinkenden Karbonatgehalts im Meerwasser viele Organismen es zunehmend schwieriger haben werden, ihre Schalen aufzubauen oder zu verstärken. Proben aus dem Südpolarmeer zeigen sogar, dass die Schalen der heutigen planktischen Foraminiferen bereits 30 bis 35 Prozent leichter als die ihrer prä-industriellen Vorfahren sind. Angesichts der

Das durchschnittliche Gewicht der Schalen von *Globigerina bulloides* (300–355 μm), die in verschiedenen Wassertiefen oberhalb des Sättigungshorizonts von Kalzit gesammelt wurden (rote Kästchen), ist geringer als das der aus Sedimentproben aus prä-industrieller Zeit gewonnenen Schalen (graue Kästchen).

Quelle: Nach Moy et al., Nature Geoscience (2009).

Diese lebende Pteropode *Limacina helicina antarctica* wurde auf der Expedition des Collaborative East Antarctic Marine Census (CEAMARC) während des Internationalen Polarjahres 2008 vom Forschungsschiff Umitaka Maru aus geborgen.

Photo © Hopcroft/ UAF/COML



Das Gewicht der Schalen von *Globigerina bulloides* war am größten, als der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre am geringsten war (vor ca. 18.000 Jahren). Heute, da der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre am höchsten ist, ist das Gewicht am geringsten.

Quelle: Nach Moy et al., Nature Geoscience (2009).

An der Westküste Amerikas zeigt der Auftrieb von untersättigtem Tiefenwasser bereits Folgen.



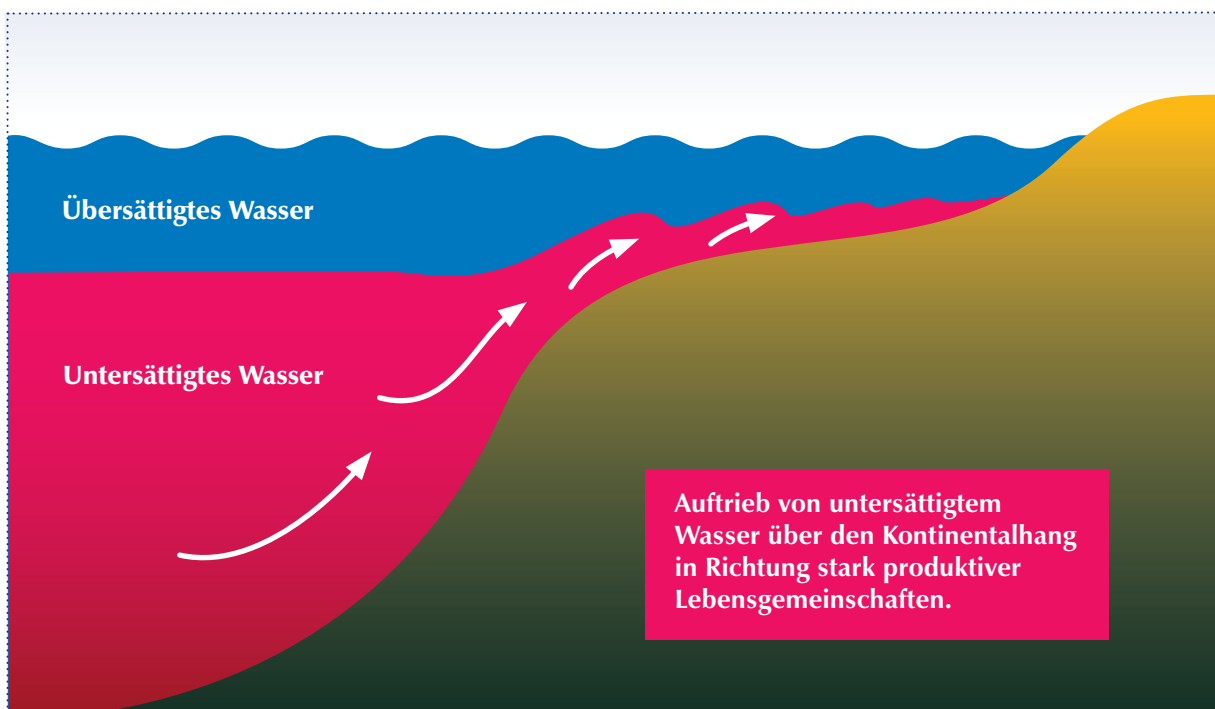
Die Probleme des Ozeans kommen an die Oberfläche

In den Küstenregionen transportieren regelmäßige Aufwärtsströmungen Wassermassen aus dem tiefen Ozean in Richtung der Kontinentalhänge und der Uferregionen. Hierdurch gelangen die produktiven Ökosysteme der oberen Schichten in Kontakt mit kälterem Wasser, das mehr Nährstoffe, aber auch mehr CO₂ enthält. Weil mit der Ozeanversauerung die obere, übersättigte Wasserschicht

flacher wird, führt der natürliche Auftrieb immer häufiger dazu, dass untersättigtes Wasser auf die Küsten zufließt. Die Schalen der marinen Organismen, die in den Küstenregionen leben, sind nicht an dieses Phänomen gewöhnt – sie könnten unter periodisch wiederkehrenden Veränderungen dieser Art leiden. An der Westküste Nordamerikas kommen diese Aufwärtsströmungen von untersättigtem Wasser bereits vor. Schon bald können andere Regionen mit vergleichbaren hydrographischen Bedingungen betroffen sein.

Der saisonale Einfluss von untersättigtem Wasser, wie er bereits an der Westküste Nordamerikas stattfindet, kann ernstzunehmende Folgen für die Fischerei oder die Austernzucht haben.

Quelle: nach Carol Turley based on Feely et al., *Science* (2008).



Aus der Vergangenheit lernen

Die Chemie der Weltmeere ist nicht immer konstant gewesen. Schon in frühester Vergangenheit gab es Perioden mit höherem Säuregrad. So stellt sich die Frage: Was können wir aus diesen frühen Versauerungsereignissen lernen? Können wir diese Kenntnisse dazu nutzen, die Gefahr, die aus der gegenwärtigen Ozeanversauerung erwächst, besser einzuschätzen?

Was können wir aus früheren Perioden der Ozeanversauerung lernen?

In der jüngsten Vergangenheit der Erde war das Säure-Basen-Gleichgewicht des Ozeans relativ konstant. Dieses Wissen stammt aus dem Gletschereis der Polargebiete und aus Ablagerungen im Sediment der Tiefsee, aus denen sich der pH-Wert vergangener Epochen rekonstruieren lässt.

In Gletschereis eingeschlossene Luftblasen liefern wichtige Daten über die Verhältnisse in der Atmosphäre in der Vergangenheit.



Photo © Ulf Riebesell, IFM-GEOMAR

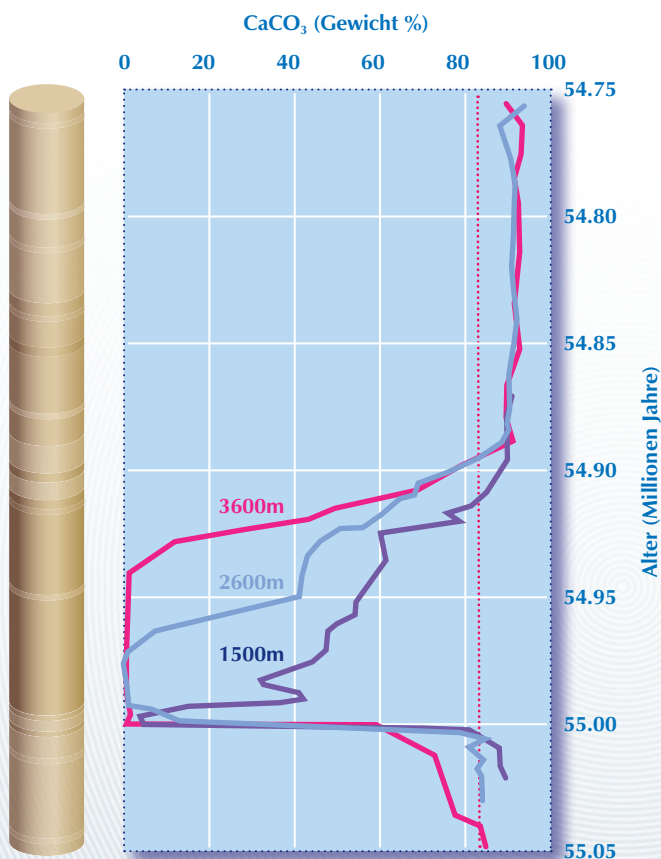
Die Vergangenheit aus dem Eis

Luftblasen, die in den Eisschichten eingeschlossen sind, liefern Informationen über die atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen zur Zeit der Eisbildung. Hieraus kann der pH-Wert des Meerwassers berechnet werden. Bohrkern, die dem Eis entnommen wurden, können wie Jahresringe im Holz gelesen werden: Die oberen Schichten spiegeln die jüngsten Verhältnisse wider, während tiefe Eisschichten vor sehr viel längerer Zeit abgelagert wurden. Diese Daten aus Eiskernen zeigen, dass über die letzten 800.000 Jahre, bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts, die CO_2 -Konzentrationen nie höher als 280 ppmv lagen. Dies entspricht einem pH-Wert des Meerwassers von 8,2. Heutige CO_2 -Konzentrationen der Atmosphäre liegen bei ungefähr 390 ppmv und der pH-Wert des Meerwassers der oberen Schichten beträgt jetzt 8,1.

Nur entfernte Ähnlichkeiten

Noch weiter zurück in der Vergangenheit muss es plötzliche Ereignisse und ausgedehnte Phasen gegeben haben, in denen der pH-Wert des Ozeans sogar niedriger als heute war. Inwieweit können uns diese frühzeitlichen Ereignisse Informationen über die Zustände liefern, denen wir heute gegenüber stehen? Der am häufigsten diskutierte Fall ereignete sich vor 55 Millionen Jahren während des Neozoikums (des Paläozän-Eozän Temperatur-Maximums (PETM)). Während dieses für die Erdgeschichte dramatischen Ereignisses stiegen die globalen Temperaturen in weniger als 10.000 Jahren um ungefähr 6°C , begleitet von einem entsprechenden Anstieg des Meeresspiegels nach der Erwärmung des Ozeans. Die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre stieg an und bewirkte, dass die Schicht des mit Kalzium-Karbonat gesättigten Wassers sehr viel flacher wurde. Das Ereignis war möglicherweise mit einer durch die Erwärmung bedingten Freisetzung von Methan aus den Sedimenten verbunden, welches sich durch Oxidation in CO_2 umwandelte und zur Ozeanversauerung führte.

Diese Periode könnte uns Hinweise darauf geben, was zukünftig auf uns zukommt. Viele benthische (am Meeresboden lebende) kalkbildende Tiefseeeorganismen sind zwar damals ausgestorben, aber einige an der Oberfläche der Ozeane lebenden Arten haben die Bedingungen vor 55 Millionen Jahren überlebt. Daher wird vielfach die Meinung vertreten, dass diese auch in



Tiefsee-Bohrkerne vom Südatlantik für verschiedene erdgeschichtliche Tiefen zeigen, wie sich der Kalzitsättigungshorizont zur Zeit des PETM in nur wenigen tausend Jahren um mehr als 2 km verflacht, und dann ungefähr 100.000 Jahre braucht, um wieder auf das Vor-PETM-Niveau zu gelangen. Dieses Ereignis trug möglicherweise zum Massensterben von benthischen Foraminiferen zu dieser Zeit bei.

Quelle: nach Zachos et al., Science (2005).

der Lage sein sollten, die derzeitige Ozeanversauerung problemlos zu überleben. Jedoch wird hier der entscheidende und fundamentale Unterschied zwischen PETM und der heutigen Zeit außer Acht gelassen: Die beiden Ereignisse weisen völlig unterschiedliche Zeitskalen auf. Während sich die derzeitige Ozeanversauerung innerhalb von wenigen Jahrhunderten vollzieht, zog sich die damaligen Ozeanversauerung vermutlich über ca. 10.000 Jahre hin.

Der große Unterschied

Es gibt eine triftige Erklärung dafür, dass sich die derzeitige Situation so deutlich von der damaligen unterscheidet: und zwar die Diskrepanz zwischen der hohen Geschwindigkeit der CO_2 -Konzentrationserhöhung in der Atmosphäre einerseits, sowie andererseits der niedrigen Geschwindigkeit der geologischen Prozesse, die der Atmosphäre das CO_2 entziehen. Somit gibt es einen ganz entscheidenden Unterschied zwischen der heutigen Situation und den Ereignissen in der Vergangenheit: Bei allen vergangenen Ereignissen von Ozeanversauerung in den letzten 65 Millionen Jahre, bedingt durch vulkanische Aktivität, verlief der CO_2 -Anstieg langsam über tausende von Jahren, in einigen Fällen sogar über hunderttausend Jahre. Der Ozean hatte ausreichend Zeit, einen vollständigen tausendjährigen Strömungszyklus zu vollenden, in dem das Oberflächenwasser eine gesamte Tiefenzirkulation durchlaufen konnte. Das Resultat war, dass sich das Karbonatsediment des Meeresbodens zu lösen begann und Karbonationen freigesetzt wurden, die einen Teil der Übersäuerung neutralisierten. Außerdem besaß das Meerwasser vor Millionen von Jahren viel höhere Kalzium- und Magnesiumkonzentrationen als heute. Diese Mineralien tragen dazu bei, die Kalzium-Karbonat-Mineralien in den Skeletten von marinen Tieren zu stabilisieren, so dass diese damals besser in der Lage waren, die übersäuerten Bedingungen zu vertragen als heutzutage.

In der heutigen Situation steigen die CO_2 -Konzentrationen in kürzerer Zeit als die Durchmischung des tiefen Ozeans. Dadurch sind diese Prozesse nicht länger aufeinander abgestimmt. Das Resultat ist, dass sich der Großteil des CO_2 in einer Schicht nahe der Meeresoberfläche ansammelt. Ungefähr 50% des ausgestoßenen CO_2 befinden sich in den oberen 10% des Ozeans. Es würde

Kann uns die Vergangenheit Hinweise auf die Zukunft geben?

Bei dem Vergleich der heutigen Situation mit derjenigen vor vielen Millionen Jahren, als der Ozean ebenfalls übersäuert war, stellt man fest, dass die derzeitige Versauerung wesentlich schneller und in stärkerem Ausmaß geschieht als das, was man aus den fossilen Daten ersehen kann. Es wird zum Beispiel geschätzt, dass sich die heutige Ozeanversauerung zehnmal schneller vollzieht als diejenige, die dem „großen Aussterben“ vor 55 Millionen Jahren während des Paläozän-Eozän Temperatur-Maximums vorausging, der stärksten Ozeanversauerung seit dem Aussterben der Dinosaurier. Sedimentbohrkerne aus dem Meeresboden des Südost-Atlantiks zeigen dort eine dramatische Veränderung in der Zusammensetzung des Sediments, bedingt durch die Auflösung von Karbonat-Organismen, durch die nur roter Ton zurückblieb. Dies war das Ergebnis eines erhöhten Säuregrads, der zum Aussterben vieler Tiefseeorganismen mit Kalkschalen bzw. Kalkskeletten führte.

ungefähr 1.000 Jahre dauern bis die Sedimente beginnen, die Chemie des Meerwassers zu regulieren und der Versauerung entgegenzuwirken. Somit sinken derzeit sowohl der pH-Wert als auch die Menge der verfügbaren Karbonationen im Ozean.

Zehnmal schneller

Während der Erdgeschichte hat sich das Leben im Meer von einer ganzen Reihe plötzlicher Aussterbeepisoden durch die Anpassung und Evolution neuer Arten erholt. Allerdings erstrecken sich die Zeitskalen vom Aussterben bis zur Neuansiedlung von Arten über Millionen von Jahre und nicht nur über einige Jahrhunderte. Die anthropogene Ozeanversauerung wirkt weitaus schneller auf den Ozean, als dieser in der Lage ist, mithilfe seinen natürlichen Regulationsmechanismen darauf zu reagieren. Die derzeitige Rate der Ozeanversauerung ist zehnmal höher als sie jemals zuvor seit dem Aussterben der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren gewesen ist.

Korallenriffe, wie hier bei den Seychellen, bieten eine erstaunliche Lebensvielfalt, doch sie könnten schon 2050 ernsthaft geschädigt sein, wenn die Ozeanversauerung in der derzeitigen Geschwindigkeit voranschreitet.



Photo © Jolker Tannhäuser

Die derzeitige Ozeanversauerung schreitet 10mal schneller voran als jene, die dem Aussterben vieler mariner Lebensformen vor 55 Millionen Jahren vorausgegangen war.

Können wir das künftige Ausmaß der Ozeanversauerung vorhersagen?

Es ist unausweichlich, dass die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre vom jetzigen Niveau von 391 ppmv weiterhin ansteigen wird und dies wird auch weiterhin den pH-Wert des Oberflächenwassers der Ozeane reduzieren. Jedoch sind sowohl die Geschwindigkeit als auch das Ausmaß des zukünftigen Anstiegs nur schwierig vorauszusagen, weil beide Werte davon abhängen, ob und in welchem Umfang wir in der Lage sind, unsere CO_2 -Emissionen zukünftig zu reduzieren. Wenn der Anstieg von CO_2 in der Atmosphäre ungebremst anhält, werden die Konzentrationen möglicherweise bis zum Ende des 21. Jahrhunderts 800 ppmv erreicht haben und der pH-Wert des Ozeans wird um weitere 0,3 – 0,4 Einheiten gesunken sein, was einem Anstieg des Säuregrads um weitere 150-200% entspricht.

Nicht so sicher ist man sich hingegen bei den biologischen Folgen der Ozeanversauerung, denn bislang haben wir mit solchen Veränderungen noch keine Erfahrungen gemacht. Außerdem scheinen die unterschiedlichen Gruppen von Meeresorganismen unterschiedlich sensibel auf die sich ändernde Meerwasserchemie zu reagieren.

Lebenslanger Einfluss

Bei vielen marinen Lebewesen werden die Gameten sowie die Larven-, Jugend- und Erwachsenenstadien auf unterschiedliche Weise von der Ozeanversauerung betroffen sein; es ist daher wichtig, mögliche Auswirkung auf den gesamten Lebenszyklus in Betracht zu ziehen. Erste Studien zeigen, dass die frühen Stadien (Gameten, Larven und Jugendstadien) empfindlicher auf die Ozeanversauerung reagieren. Grundsätzlich führt Stress

Bergen eines Schleppnetzes zum Fang von Flügelschnecken in der Antarktis.



Photo © John M. Baxter

zu einer Verminderung der Leistungsfähigkeit von Organismen, was dazu führen kann, dass sie langsamer wachsen, kleiner bleiben, Räubern schlechter ausweichen können bzw. weniger effektiv beim Beutefang sind. Dort wo Organismen einen höheren energetischen Aufwand betreiben, um der Ozeanversauerung entgegen zu wirken, kann dies zu einer verminderten Reproduktionsrate führen.

Zu den Arten, die durch die Ozeanversauerung bedroht sind, gehören insbesondere tropische Korallen und Kaltwasserkorallen, planktische Kalkalgen und Flügelschnecken, denn die veränderten Bedingungen werden den Aufbau sowie die Erhaltung ihrer Skelette und Schalen beeinträchtigen. Diese Arten spielen eine

Korallen – ein komplexes Thema

Korallen beherbergen in ihrem Gewebe winzige, einzellige Algen, die Zooxanthellen, die durch ihre Photosynthese eine bedeutende Kohlenstoffquelle für die Koralle und den Aufbau ihres Kalkskeletts darstellen. Diese Korallen-Algen-Verbindung ist überaus empfindlich. Wenn die Bedingungen für die Alge zu günstig sind, so dass sie sich übermäßig vermehrt, kann der Transfer von Kohlenstoff zur Koralle unterbrochen werden. Also wäre eine gesteigerte Photosyntheseleistung dieser einzelligen Alge unter der hohen CO_2 -Konzentration nicht unbedingt positiv für ihren Wirt. Auch wenn Studien gezeigt haben, dass die Photosyntheseleistung bei einigen anderen Algenarten bei erhöhten CO_2 -Konzentrationen ansteigt, so zeigt die Photosynthese der Zooxanthellen keinen nachweisbaren Anstieg bei CO_2 -Konzentrationen, wie sie bis zum Ende dieses Jahrhunderts erwartet werden. Andere Experimente haben jedoch gezeigt, dass in den meisten Fällen die Kalkbildungsrate der Korallen bei steigendem CO_2 -Niveau sinkt. Dies lässt vermuten, dass steigende CO_2 -Konzentrationen die Fähigkeit der Korallen zum Bau ihres Kalkskeletts herabsetzen und somit ihre Fähigkeit vermindern, sich selber zu schützen und Stürmen zu widerstehen. Dies bedeutet, dass das Wachstum von Korallenriffen letztendlich geringer sein wird als ihre natürliche Erosion, mit der Folge eines kontinuierlichen Niedergangs der Korallenriffe.



Korallenriffe sind unverzichtbare, jedoch anfällige Ökosysteme, die extrem empfindlich gegenüber Ozeanversauerung sind.

Photo © Dan Laffoley

Die Sache mit dem Hummer

Eine experimentelle Studie hat gezeigt, dass das Gewicht der Schalen verschiedener Schalentiere, darunter auch von Hummern, die über 60 Tage in Kulturen aufgezogen wurden, bei steigender CO_2 -Konzentration zunahm. Eine andere Studie zeigte allerdings, dass das Schalenwachstum von Hummerlarven unter diesen Bedingungen reduziert war. All diese Studien unterstreichen die Notwendigkeit, sowohl den gesamten Lebenszyklus als auch die physiologische Fitness der Organismen zu untersuchen. Ohne weitere Studien wäre es verfrüht zu sagen, dass die Ozeanversauerung Schalentieren nicht schadet. Dafür gibt zwei wichtige Gründe:

Die Herstellung von Kalkschalen benötigt Energie. Jedoch verfügt jeder Organismus nur über ein begrenztes Energiebudget, so dass eine erhöhte Schalenmasse mit hoher Sicherheit Hand in Hand geht mit einem reduzierten Energiebudget für andere Funktionen wie Wachstum und Reproduktion. Da diese Faktoren im Rahmen der Studien nicht erfasst werden konnten, sind die Auswirkungen der Ozeanversauerung auf den allgemeinen Gesundheitszustand und die Lebensdauer dieser Organismen noch unbekannt.

Hummer (und Schalentiere im Allgemeinen) haben einen ganz anderen Schalentyp als Schnecken, Muscheln und Korallen, der sich auch grundsätzlich im Mechanismus des Schalenwachstums unterscheidet. Hummerpanzer sind Exoskelette, die neben Kalzium-Karbonat-Mineralien auch einen hohen Anteil Chitin beinhalten. Sie werden regelmäßig abgeworfen anstatt kontinuierlich zu wachsen. Es wird vermutet, dass Hummer kurz vor der Häutung einen erheblichen Anteil an Mineralien dem alten Panzer entziehen und in ihrem Körper lagern, um sie für den Aufbau des neuen Panzers verwenden zu können.

Derzeit ist noch unklar, ob dieser Unterschied im Wachstumsmechanismus einen Effekt darauf haben wird, wie die Hummer auf die Ozeanversauerung reagieren werden.



Hummer.

Koralline Algen wie *Lithothamnion topiiforme* gehören zu den Arten, die besonders empfindlich auf Ozeanversauerung reagieren.



Schlüsselrolle im Ozean, weil sie einerseits wichtiger Bestandteil des marinen Nahrungsnetzes und der biogeochemischen Stoffkreisläufe sind (z.B. die Kalkalgen und Flügelschnecken), und andererseits dreidimensionale Strukturen wie die Korallenriffe aufbauen, die einer beträchtlichen Anzahl von Arten einen Lebensraum bieten und als Küstenschutz fungieren.

Gewinner und Verlierer

Das Wachstum und die Photosyntheseleistung einiger mariner Pflanzen- und Algenarten könnten unter höheren CO_2 -Konzentrationen ansteigen. Für andere dürften höhere CO_2 -Konzentrationen und ein höherer Säuregrad negative oder keine Auswirkungen auf ihre Physiologie haben. Deshalb wird es „Gewinner“ und „Verlierer“ unter den Photosynthese treibenden Organismen im Meer geben. Einige der Experimente deuten darauf hin, dass insbesondere Cyanobakterien (Blaualgen), eine Gruppe unter denen es viele toxische Arten gibt, zu denen gehören könnten, die von der Ozeanversauerung profitieren. Viele Zooplanktonarten vermeiden Cyanobakterien als Nahrungsquelle. Veränderungen der Artengemeinschaft an der Basis der Nahrungskette könnten sich im Ökosystem fortpflanzen und damit auch den Fischereiertrag beeinflussen.

Die Folgen und Tragweite der Ozeanversauerung



Photo © Jason Hall-Spencer

Üppige Seegraswiesen ohne Epiphytenbewuchs gedeihen gut in Seewasser mit natürlich niedrigem pH.

Es ist schwierig, die Auswirkungen der Ozeanversauerung präzise vorauszusagen, weil es so viele Unbekannte im menschlichen Verhalten und in der Reaktion des Ökosystems Ozean gibt. Jedoch können wir aus der Vergangenheit insoweit lernen, dass wir zukünftige Entwicklungen zumindest grob abschätzen können. Außerdem liefern Gebiete des Ozeans mit natürlich erhöhtem Säuregrad wertvolle Informationen.

Lebensgemeinschaften, die in CO₂-Ausgasungen von Kaltwasservulkanen am Meeresboden vorkommen (also nicht bei den extrem heißen Tiefseevulkanen) und die pH-Werten ausgesetzt sind, die niedriger sind, als die für die nächsten Jahrzehnte vorausgesagten, zeigen, dass bestimmte Arten von Mikroalgen, Seetang und Seegras sehr gut in solcher Umgebung gedeihen. Jedoch ist im Vergleich zu benachbarten Gebieten ohne CO₂-Ausgasungen die Artenvielfalt reduziert. Außerdem ist offensichtlich, dass sich unter diesen Bedingungen Kalkschalen auflösen.

Könnten sich die Lebewesen nicht einfach an die Ozeanversauerung gewöhnen?

Bei weiterhin sinkenden pH-Werten und Karbonat-Niveaus ist zu erwarten, dass es sowohl „Gewinner“ als auch „Verlierer“ im Ökosystem des Ozeans geben wird. Aber es wird unabwendbar, dass sich die marinen Lebensgemeinschaften verändern werden. Zu den Tieren und Pflanzen, die höchstwahrscheinlich als erstes

Prognosen für die atmosphärische CO₂-Konzentration und den mittleren globalen pH-Wert an der Meeresoberfläche im Vergleich zu vorindustriellen Niveaus in verschiedenen IPCC 2007 Emissionsszenarien. Diese weisen auf einige experimentell bestimmte biologische Einflüsse hin und auf die Jahre, in denen zum ersten Mal eine lokal begrenzte, saisonale Aragonit-Untersättigung auftreten wird. Quelle: nach Turley et al., *Marine Pollution Bulletin* (2010).

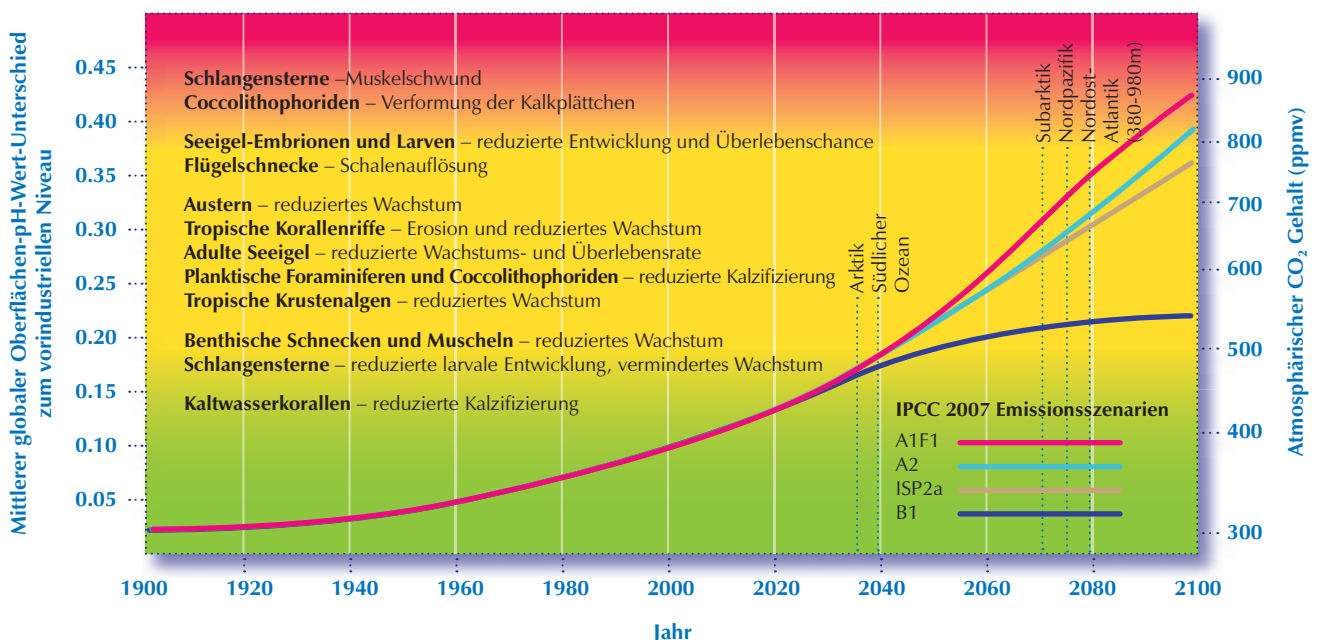




Photo © Jason Hall-Spencer

Wenn die pH- und Karbonat-Niveaus weiterhin sinken, wird es sowohl „Gewinner“ als auch „Verlierer“ geben – aber ein Wandel ist unabwendbar.

Solche Lebensgemeinschaften, wie hier am Meeresboden im Mittelmeer mit Blasen aus vulkanischen CO₂-Ausgasungen, sind ein ideales natürliches Labor, um die Ozeanversauerung zu erforschen.

in Mitleidenschaft gezogen werden, gehören jene mit Kalkschalen oder einem Kalkskelett. Organismen haben jeweils nur eine von drei Möglichkeiten, auf schädliche Veränderungen in ihrer Umwelt zu reagieren: sie können sich daran gewöhnen (akklimatisieren), sich anpassen (adaptieren), oder aussterben.



Natürliche Labore mit hoher CO₂-Konzentration

Alle Lebewesen besitzen die Fähigkeit, sich anzupassen bzw. veränderte Umweltbedingungen in einem gewissen Maße zu tolerieren. Damit verbunden ist oftmals

verminderte Konkurrenzfähigkeit. Denn die Fähigkeit eines Lebewesens, lebenswichtige Funktionen aufrecht zu erhalten, hängt von seinem begrenzten Energiebudget ab. Wenn ein Lebewesen mehr Energie für den Aufbau und den Erhalt seiner schützenden Schale oder seines stützenden Skeletts aufbringen muss, wird es weniger Energie für andere lebenswichtige Funktionen, wie Reproduktion und Wachstum, zur Verfügung haben. Ebenso wird auch ein Lebewesen ohne Kalkschale in einem Ozean mit hoher CO₂-Konzentration und niedrigem pH-Wert mehr Energie für das Atmen und für Ausscheidungsprozesse benötigen und weniger Energie für die Futtersuche oder andere wichtige und lebensnotwendige Aktivitäten zur Verfügung haben.



Ernsthaft geschädigte Napfschneckenschale aus einem Gebiet mit natürlich hoher CO₂-Konzentration.

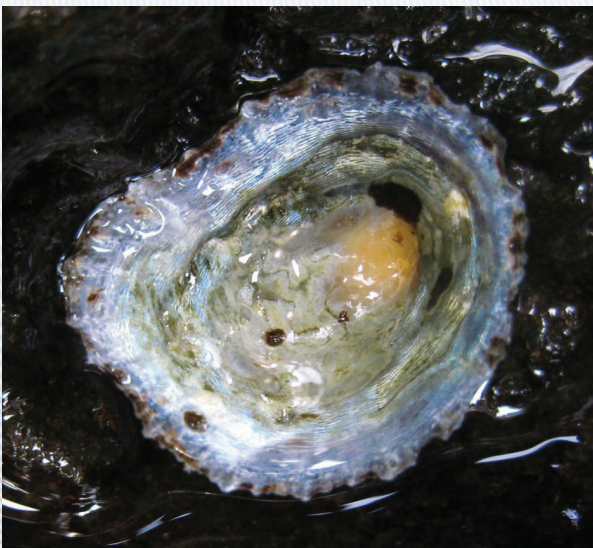
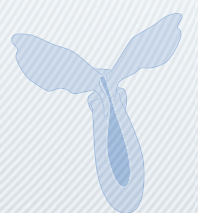


Photo © Jason Hall-Spencer

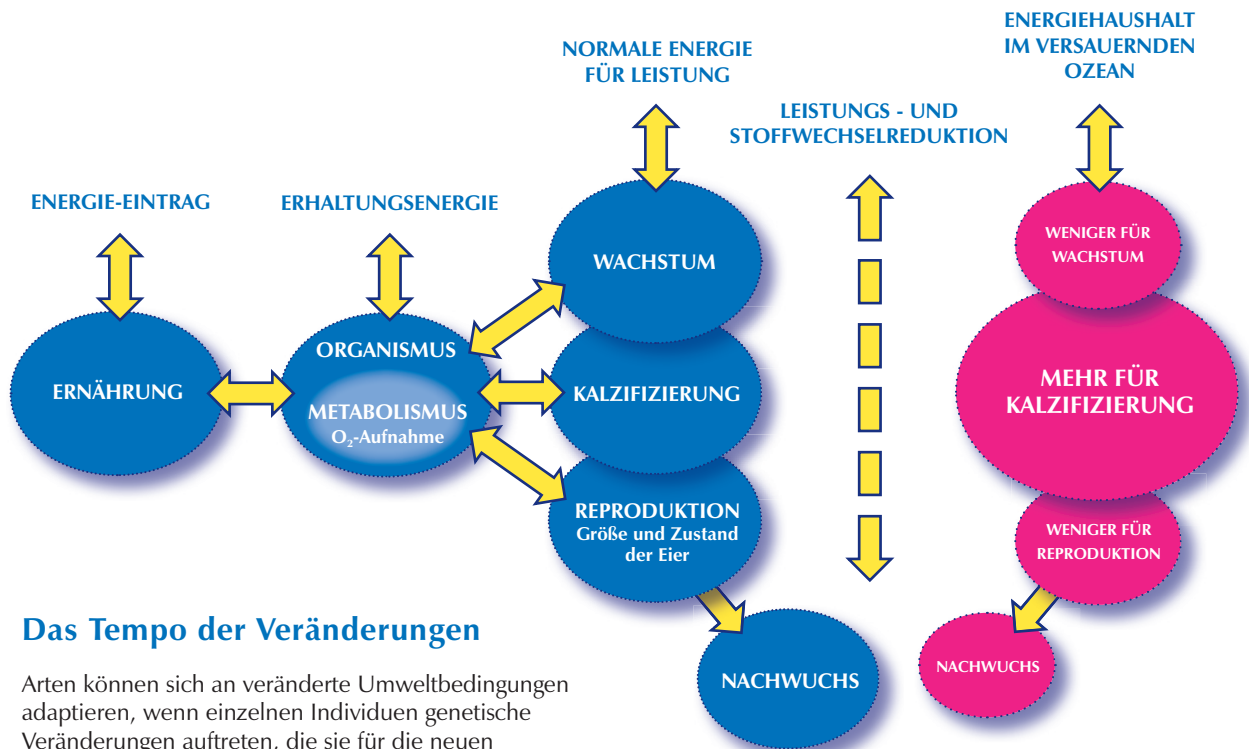
Korallenpolypen, die in ein Gebiet mit natürlich niedrigem pH überführt worden sind, zeigen eine Erosion ihres Kalkskeletts.



Photo © Jason Hall-Spencer



Zentrale Lebensprozesse – in wie weit wird die Ozeanversauerung die Physiologie der Lebewesen beeinträchtigen? Quelle: nach Carol Turley.



Das Tempo der Veränderungen

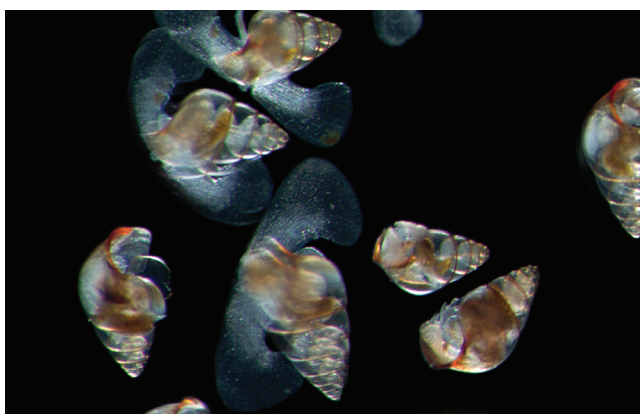
Arten können sich an veränderte Umweltbedingungen adaptieren, wenn einzelnen Individuen genetische Veränderungen auftreten, die sie für die neuen Bedingungen besser geeignet machen. Arten mit einer kurzen individuellen Lebensdauer können schneller auf plötzliche Veränderungen der Umweltbedingungen reagieren, weil ihre Generationszeiten kürzer sind und somit jede neue Generation nur einer geringfügigen Veränderung ausgesetzt ist, und weil die Anzahl der Individuen, die für die neuen Bedingungen nützliche Variationen ausbilden können, größer ist. Im Vergleich dazu haben Arten mit einer langen individuellen Lebensdauer weitaus geringere Fähigkeiten, sich schnell an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Jedoch zeigen die bereits beobachteten Veränderungen im Schalengewicht von Flügelschnecken, die einen Lebenszyklus von nur einem Jahr haben, dass die derzeitige Geschwindigkeit der Veränderungen im pH des Ozeans selbst für diese relativ kurzlebigen Organismen zu hoch ist, um sich anpassen zu können. Doch weitere Untersuchungen sind erforderlich, um diese Ergebnisse zu bestätigen. Frühere erdgeschichtliche Versauerungsereignisse werden oft mit dem Aussterben vieler Arten in Verbindung gebracht. Obgleich die Ursachen solcher Perioden des Aussterbens meist sehr komplex sind, ist es bemerkenswert, dass die Erholungszeiten nach solchen Perioden hunderttausende, bei Massenaussterben sogar bis zu Millionen von Jahren dauerten.

Ein Wettlauf ums Überleben?

Die Schlüsselfrage ist nicht, ob sich das Leben im Ozean an die Ozeanversauerung anpassen und weiterentwickeln wird, sondern ob es in der Lage sein wird, dies schnell genug zu tun angesichts der rasanten Geschwindigkeit, in der die Ozeanversauerung voranschreitet. Außerdem ist es fraglich, ob die neuen Lebensgemeinschaften denselben Nutzen und Ertrag erbringen werden wie die heute existierenden.

Die Auswirkungen der Ozeanversauerung werden schrittweise mit der Rate der Versauerung zunehmen, auch wenn sie im Moment noch gering erscheinen. Darüber hinaus gibt es noch eine Verzögerung zwischen der CO₂-Emission und dem Erreichen eines Gleichgewichts zwischen Ozean und Atmosphäre. Selbst wenn die Emissionen reduziert würden und der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration sich verlangsamt, würde der pH-Wert des Ozeans weiter sinken. Eine massive Reduzierung der CO₂-Emissionen ist also essenziell, um die Ozeanversauerung in vertretbaren Grenzen zu halten.

Die tropische Flügelschnecke *Limacina bulimoides*.



Mit den Veränderungen Schritt halten

Aus dem derzeitigen Verteilungsmuster von Korallenriffen lässt sich eine Beziehung zum Aragonitsättigungszustand des Ozeans erkennen und dass die Korallen bisher mit den natürlichen Veränderungen der Umweltbedingungen Schritt halten konnten. Allerdings ist es fraglich, ob sie in der Lage sein werden, sich an die zunehmend schneller eintretenden Umweltveränderungen anzupassen, so wie sie für die nächsten Jahrzehnte vorausgesagt werden.

Unsere Chancen im Fokus

Würde die Senkung der CO₂-Emissionen etwas bewirken?

Das CO₂-Niveau in der Atmosphäre ist über die letzten 250 Jahre um fast 40% von 280 ppmv auf den heutigen Wert von 391 ppmv angestiegen und erhöht sich aktuell jährlich um ungefähr 2 ppmv. Die Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration wurde abgemildert, da der Ozean einen Teil des CO₂ aufgenommen hat. Ohne diesen Service des Ozeans wäre das CO₂-Niveau in der Atmosphäre bereits auf fast 460 ppmv angestiegen und der Klimawandel heute schon deutlich stärker ausgeprägt.

Die Nutzung fossiler Brennstoffe fördert den Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration.

Photo ©Bec Thomas Photography 2006-2007/Marine PhotoBank



Auf lange Sicht noch umkehrbar

Obwohl bereits Veränderungen in der Chemie des Meerwassers, hervorgerufen durch die Aufnahme von atmosphärischem CO₂, sowie Auswirkungen davon auf das marine Ökosystem zu beobachten sind, so sind diese Veränderungen auf lange Sicht umkehrbar. Dies würde jedoch eine signifikante Reduzierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration voraussetzen. Der einzig realistische Weg dahin besteht darin, die CO₂-Emissionen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, die Herstellung von Zement und die Abholzung der Wälder drastisch zu reduzieren.

Der Höchstwert für die atmosphärische CO₂-Konzentration wird auf weit über 400 ppmv vorhergesagt. Die Auswirkungen auf den ozeanischen pH-Wert werden noch andauern, auch wenn das atmosphärische CO₂-Niveau schon lange gesenkt worden ist. Denn das CO₂, das durch das Oberflächenwasser des Ozeans absorbiert worden ist, wird sich weiterhin noch einige Jahrhunderte lang durch die Tiefenzirkulation in die tiefen Wasserschichten des Ozeans hinein ausbreiten.

Es ist noch nicht zu spät

Einige aus der Ozeanversauerung resultierenden Veränderungen sind bereits erkennbar und weitere werden voraussichtlich noch folgen, auch wenn sofortige Maßnahmen ergriffen werden, um die Emissionen zu begrenzen und die atmosphärische CO₂-Konzentration in den nächsten Jahren erheblich zu reduzieren. Es ist jedoch noch nicht zu spät, alle Hebel in Bewegung zu setzen, um drohende Risiken zu minimieren. Die technischen und ökonomischen Möglichkeiten, die CO₂-Emissionen signifikant zu senken, sind vorhanden, wenn wir nur dazu bereit sind, sie auch entsprechend



Photo © Johannes Förster



Das Beenden der Abholzung wäre ein Beitrag, den Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration zu reduzieren.



einzusetzen. Je länger wir allerdings mit unserem Handeln zögern, desto größer werden letztendlich die Auswirkungen der Ozeanversauerung sein.

Können wir das Problem der Ozeanversauerung mit Hilfe von Geo-Technologie lösen?

Das Konzept der Geo-Technologie beruht auf der bewussten Manipulation des Erdsystems. Die meisten bislang vorgeschlagenen Geo-Technologie-Ansätze zielen darauf ab, die Symptome des Klimawandels zu lindern, ohne den Kern der Ursache – den Überschuss an CO_2 in der Atmosphäre – zu beheben. Daher befassen sich solche Ansätze auch nicht mit den chemischen Konsequenzen der CO_2 -Emissionen. So sind z.B. Strategien, die Erde durch das Reflektieren von Sonnenlicht ins Weltall abzukühlen, ungeeignet, der Ozeanversauerung entgegen zu wirken.

Die Entwicklung mariner erneuerbarer Energie-Technologien ist unerlässlich, um die CO_2 -Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe zu senken.

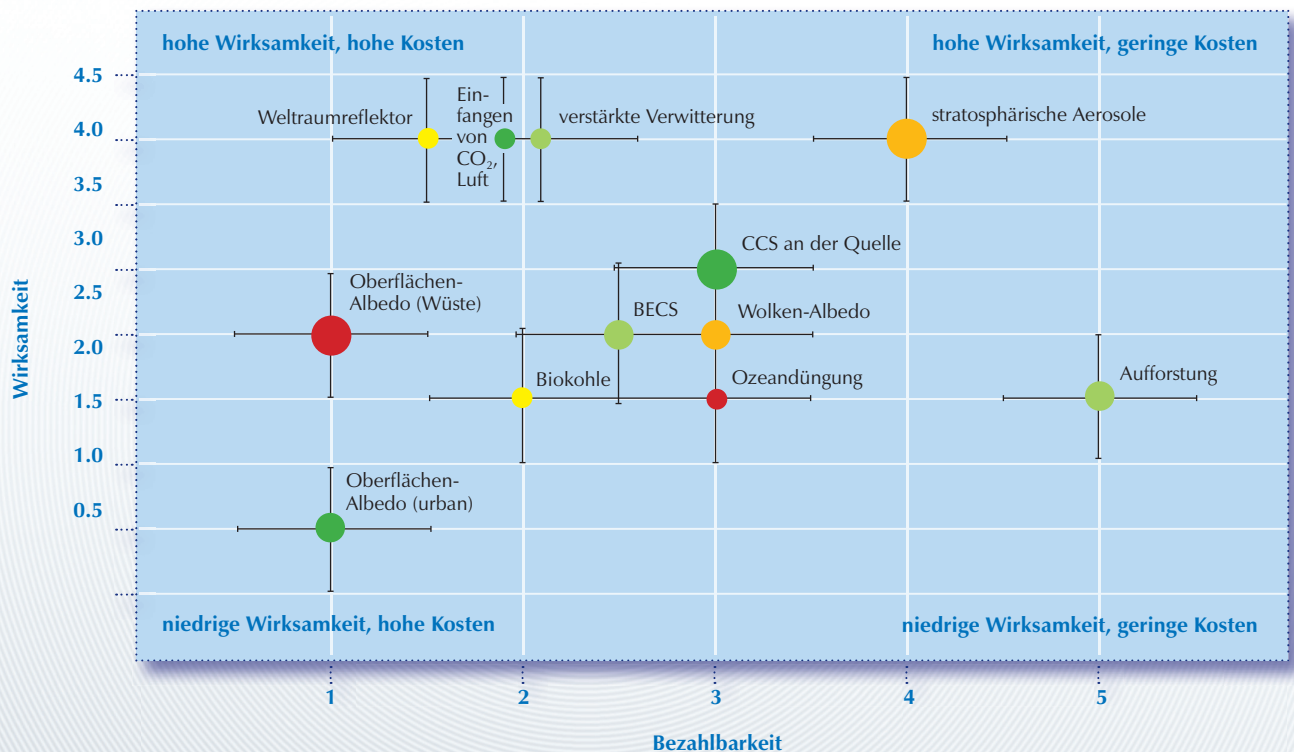


Photo © John M. Baxter

Unbekannte Konsequenzen

Gegenwärtig gibt es nur wenige Geo-Technologie Optionen gegen den Klimawandel, die einerseits effektiv und andererseits auch bezahlbar sind. Darunter würde nur das Einfangen und Einlagern von Kohlenstoff (CCS - carbon capture and storage) einen Einfluss auf das atmosphärische CO_2 -Niveau haben. In der Grafik repräsentieren die grünen Punkte sichere Optionen, die gelben bis roten zunehmend risikoreichere Optionen. Die Größe der Punkte gibt Auskunft über die zeitliche Dimension: großer Punkt, wenn die Maßnahme zügig durchführbar und effektiv ist, kleiner Punkt, wenn sie es nicht ist. Die schwarzen Striche sind ein Maß für die Unsicherheit hinsichtlich der zu erwartenden Kosten (horizontal) und der Wirksamkeit (vertikal).

Quelle: nach The Royal Society *Geoengineering the Climate* (2009).



Es hat Vorschläge gegeben, die Veränderungen in der Meerwasserchemie durch Zugabe von Substanzen zu verringern, die auf chemischem Wege Säure neutralisieren. Das Hauptproblem dieser Ansätze ist, dass die Menge des Materials, die benötigt würde, extrem groß wäre. Tatsächlich würde diese Menge (in Tonnen) sehr viel größer sein, als die des bereits ausgestoßenen CO₂, und sie würde eine ganz neue Infrastruktur zur Förderung und Verarbeitung benötigen, deren umweltbelastende Konsequenzen nicht voraussehbar wären.

Außerdem wurde vorgeschlagen, Klimawandel und Ozeanversauerung durch Düngung des Ozeans abzumildern. Das Düngen würde das Wachstum des Phytoplanktons anregen, was zur Erhöhung der biologischen Aufnahme von CO₂ im Wasser und damit letztlich aus der Atmosphäre führen würde. Modelle des ozeanischen Kohlenstoffkreislauf sagen voraus, dass bei konstanten CO₂-Emissionen die Düngung des Ozeans zwar einen moderat abmildernden Effekt auf

die Ozeanversauerung nahe der Wasseroberfläche hätte, jedoch zu einer weiteren Versauerung in der Tiefsee führen würde, da die absinkenden organischen Partikel in der Tiefe wieder zu CO₂ abgebaut werden würden. Ausmaß und Dauer des hierfür erforderlichen Einsatzes wären hoch, der Nutzen daraus voraussichtlich gering.

Prävention statt Therapie

Viele Beobachter sind zu dem Schluss gekommen, dass die erforderlichen Ressourcen für den Einsatz von Geo-Technologie-Maßnahmen besser in die Umgestaltung unserer Energiewirtschaft investiert würden - verhindern, dass CO₂ überhaupt erst in unsere Umwelt gelangt, anstatt hinterher die Auswirkungen auf Atmosphäre und Ozean zu bekämpfen.

Die Broschüre online

Laden Sie sich Ihre persönliche Kopie dieses neuen Führers zur Ozeanversauerung herunter und erfahren Sie mehr zu diesem Thema unter: <http://www.epoca-project.eu/index.php/Outreach/RUG/>

Was steckt hinter dem Namen „Ocean Acidification Reference User Group“?

Es ist eine zentrale Herausforderung, sicher zu stellen, dass sich wegweisende wissenschaftliche Projekte und Forschungen, wie zum Thema der Ozeanversauerung, mit den relevanten und dringenden Fragen befassen, und dass die Ergebnisse schnell und auf wirksame Weise in die Hände von politischen Beratern und Entscheidungsträgern gelangen, damit sie zügig umgesetzt werden können. Die „Ocean Acidification Reference User Group“ (RUG) stützt sich auf internationale Erfahrungen bezüglich eines beschleunigten Austauschs an Informationen zwischen Wissenschaftlern und Nutzern.

Die RUG wurde 2008 zur Unterstützung der Arbeit des „European Project on Ocean Acidification“ (EPOCA) gegründet. Heute unterstützt sie auch nationale Projekte zur Ozeanversauerung in Deutschland (BIOACID) und im Vereinigten Königreich (UKOA), mit engen Verbindungen zu ähnlichen Projekten in den USA. Die RUG fasst ein breites Spektrum von Endnutzern zusammen, um die Arbeit führender Wissenschaftler auf dem Gebiet der Ozeanversauerung zu unterstützen, sowie den schnellen Wissensaustausch zu fördern und die wirksame Bereitstellung qualitativ hochwertiger Forschung zu unterstützen.

Die vorliegende Broschüre baut auf die Erfahrungen der RUG auf, gepaart mit dem Wissen führender Wissenschaftler auf dem Gebiet der Ozeanversauerung, um politischen Beratern und Entscheidungsträgern eine Einführung zu diesen äußerst kritischen und dringenden Themen an die Hand zu geben.

Die RUG ist eine Kooperation folgender Institute: Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, BP, Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CNRS), Canadian Tourist Industry Authority, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Climate Central (Princeton University), Conservation International, Department for Food, Environment and Rural Affairs (Defra), Department of Energy and Climate Change (DECC), Directorate of Fisheries (Norway), European Science Foundation (ESF), Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Greenpeace, International Atomic Energy Agency, International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), International Union for the Conservation of Nature (IUCN), Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Leibniz Institute of Marine

Sciences (IFM-GEOMAR), Marine Institute (Ireland), Natural England, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), Plymouth Marine Laboratory (PML), Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Rolls Royce, Royal Institution, Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR), Scottish Natural Heritage (SNH), Shellfish Association of Great Britain (SAGB), Stockholm Resilience Center, The Nature Conservancy, UK Climate Impacts Programme (UKCIP), UNEP World Conservation Monitoring Center, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), The Worldwide Fund for Nature (WWF).

Beobachter

Die Europäische Kommission, die UK Marine Climate Impacts Partnership, die Oak Foundation, Oceana.

Weiterführende Informationen und Kontaktadressen

Weiterführende Informationen zur Arbeit der „Ocean Acidification Reference User Group“ und dem „European Project on Ocean Acidification“ finden Sie auf unserer Internetseite: <http://www.epoca-project.eu/index.php/Outreach/RUG/>

und dem UK – Programm: www.oceanacidification.org.uk

Zu BIOACID siehe unter <http://www.bioacid.de/>

Für weitere Anfragen wenden Sie sich bitte an: policyguide-epoca@obs-vlfr.fr

Quellen und Mitwirkende

Dieses Dokument basiert auf der Zusammenstellung häufig gestellter Fragen zum Thema der Ozeanversauerung (*Frequently Asked Questions about Ocean Acidification*) bei

www.whoi.edu/OCB-OA/FAQs

Die dazugehörigen Antworten geben den aktuellen Stand des wissenschaftlichen Konsenses zu 37 detaillierten Fragestellungen wieder. Die folgenden Wissenschaftler haben zu den Antworten in diesem Dokument beigetragen:

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

Jelle Bijma, Biochemiker, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), Deutschland

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, Director of Research, 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-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), Deutschland

Ulf Riebesell, Professor für Biologische Ozeanografie, Helmholtz Institut für Ozeanforschung (GEOMAR), Kiel, Deutschland

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

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

Daniela Schmidt, Royal Society University 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 and KE Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Steve Widdicombe, Benthic Ecologist, Plymouth Marine Laboratory, UK

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

Qualitätssicherung

Desweiteren danken wir folgenden Wissenschaftlern, die uns speziell bei der Erstellung dieser Broschüre beraten haben:

Jelle Bijma, Biochemiker, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), Deutschland

Humphrey Crick, Principal Specialist - Climate Change, Chief Scientist's Team, Natural England, UK

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

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

Jean-Pierre Gattuso, Director of Research, Centre National de la Recherche Scientifique and Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France

Lina Hansson, EPOCA Project Manager, Laboratoire d'Océanographie, Villefranche-sur-mer, France

Dorothee Herr, Marine Programme Officer, Global Marine Programme, IUCN, Washington, USA

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

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

Ulf Riebesell, Professor für Biologische Ozeanografie, Helmholtz Institut für

Ozeanforschung (GEOMAR), Kiel, Deutschland

Donna Roberts, Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre, Australia

Daniela Schmidt, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Carol Turley, Senior Scientist, Plymouth Marine Laboratory and KE Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Ed Urban, Scientific Committee on Oceanic Research, University of Delaware, USA

Phil Williamson, Science Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Weiterer Dank gilt den folgenden Mitwirkenden an der mehrsprachigen Übersetzung dieser Broschüre:

Ins Arabische: Haifa Abdulhalin, herausgegeben von Nashat Hamidan und überprüft von Khaldoun Alomari.

Ins Chinesische: Vera Shi, Hui Lui, Guang Gao und Kunshan Gao.

Ins Französische: Stéphanie Reynaud, Eric Béraud, François Simard und Jean-Pierre Gattuso.

Ins Spanische: Juancho Movilla, Elisa Fernandez-Guallart, Carles Pelegro und Marta Estrada.

Ins Deutsche: Maike Nicolai und Uta Ohlendiek, redigiert von Michael Meyerhöfer und Ulf Riebesell.

Wir danken allen hier genannten Personen für ihren Beitrag, diese Informationen über den englischen Sprachraum hinaus zu verbreiten.

Bitte zitieren Sie dieses Dokument wie folgt: Ocean Acidification Reference User Group (2010). Ocean Acidification: Questions Answered. Laffoley, D. d'A., and Baxter, J.M. (eds). European Project on Ocean Acidification (EPOCA). 24 pp.

Diese Broschüre wurde mit der finanziellen Unterstützung folgender Institutionen hergestellt: Prince Albert II of Monaco Foundation, Scottish Natural Heritage, Natural England, IUCN, EPOCA, Bundesministerium für Bildung und Forschung, BIOACID und Kieler Exzellenz Cluster 'Ozean der Zukunft', UK Ocean Acidification Research Programme. Sie basiert auf dem Ansatz der „Best Praxis“ für den Informationsaustausch, wie er von der UK Marine Climate Change Impacts Partnership erarbeitet wurde.