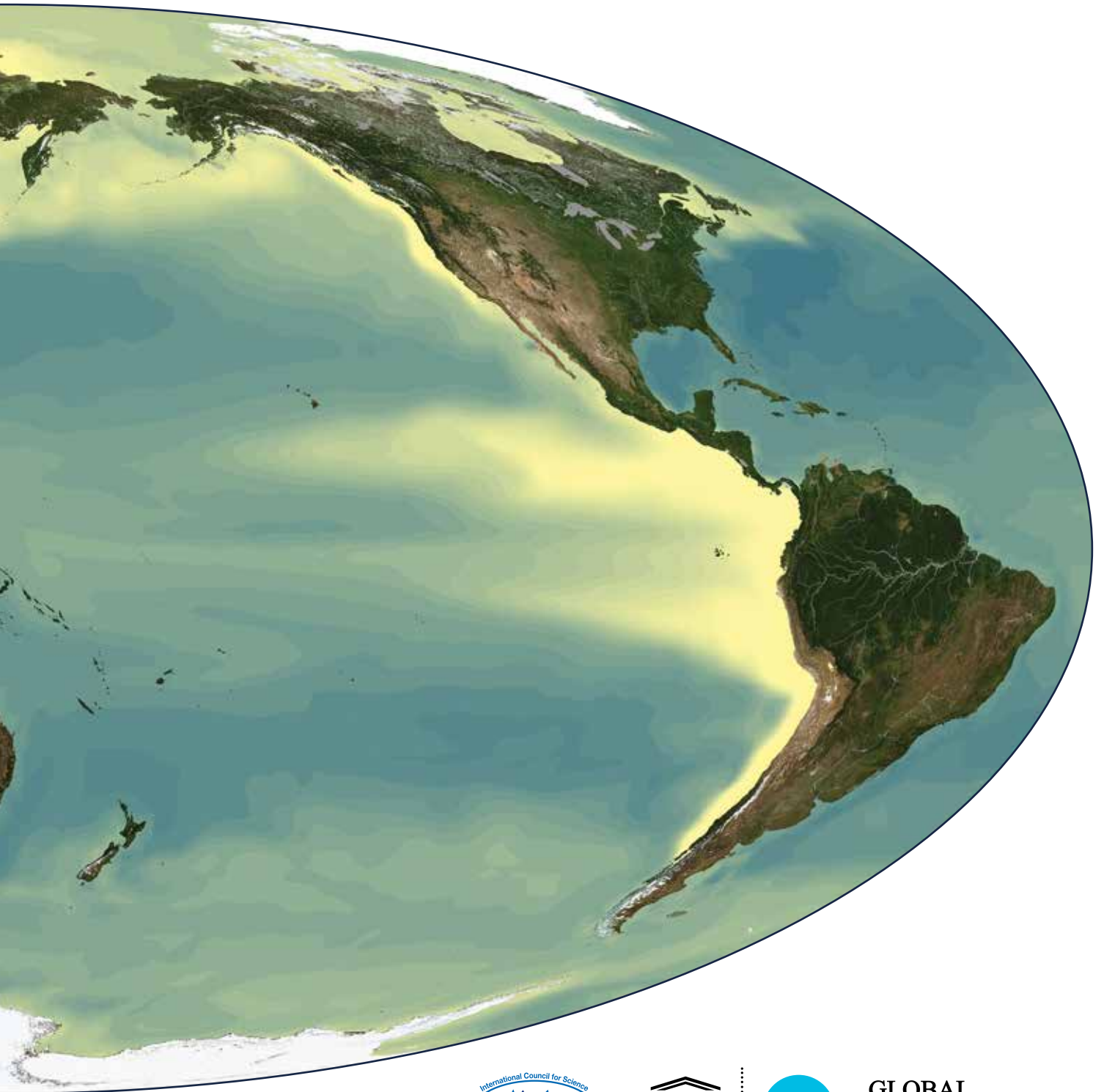


OZEAN- VERSAUERUNG

Zusammenfassung für Entscheidungsträger

Third Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World



**GLOBAL
IGBP** International
Geosphere-Biosphere
Programme
CHANGE

Wissenschaftliche Förderer:

Das **International Geosphere-Biosphere Programme** (IGBP, Internationales Geosphäre-Biosphäre-Programm) entstand 1987, um internationale Forschungsarbeiten auf globaler Ebene und regionale Wechselwirkungen zwischen biologischen, chemischen und physikalischen Prozessen sowie deren Rückkoppelungen mit menschlichen Systemen zu koordinieren. Folgende internationale Kernprojekte des IGBP untersuchen die Ozeanversauerung: Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research (IMBER, Integrierte Forschung zu mariner Biogeochemie und Ökosystemen), Surface Ocean-Lower Atmosphere Study (SOLAS, Untersuchung zur Ozeanoberfläche und der unteren Atmosphäre), Past Global Changes (PAGES, Vergangene globale Veränderungen) und Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ, Land-Ozean-Interaktionen in Küstengebieten).

Die **Intergovernmental Oceanographic Commission** (IOC, Zwischenstaatliche Ozeanographische Kommission) wurde 1960 von der United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO, Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur) als Basis für eine globale Kooperation der Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen in der Erforschung der Ozeane eingerichtet.

Das **Scientific Committee on Oceanic Research** (SCOR, Wissenschaftliches Komitee zur Ozeanforschung) wurde 1957 vom International Council for Science (ICSU, Internationaler Wissenschaftsrat) gegründet. SCOR fördert ebenfalls die internationalen Projekte IMBER und SOLAS.

Zitation:

IGBP, IOC, SCOR (2013). *Ozeanversauerung. Zusammenfassung für Entscheidungsträger – Third Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World*. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm, Schweden.

Herausgeber:

Wendy Broadgate (IGBP), Owen Gaffney (IGBP), Kirsten Isensee (IOC-UNESCO), Ulf Riebesell (GEOMAR), Ed Urban (SCOR) und Luis Valdés (IOC-UNESCO).

Autoren:

Wendy Broadgate, IGBP; **Ulf Riebesell**, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Deutschland; **Claire Armstrong**, Universität i Tromsø, Norwegen; **Peter Brewer**, Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA; **Ken Denman**, University of Victoria, Kanada; **Richard Feely**, Pacific Marine Environmental Laboratory, NOAA, USA; **Kunshan Gao**, Xiamen University, China; **Jean-Pierre Gattuso**, CNRS-UPMC, Laboratoire d'Océanographie, Frankreich; **Kirsten Isensee**, IOC-UNESCO; **Joan Kleypas**, National Center for Atmospheric Research (Climate and Global Dynamics), USA; **Dan Laffoley**, International Union for Conservation of Nature, Schweiz; **James Orr**, Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Frankreich; **Hans-Otto Pörtner**, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), Deutschland; **Carlos Eduardo de Rezende**, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Brasilien; **Daniela Schmidt**, University of Bristol, Großbritannien; **Ed Urban**, SCOR; **Anya Waite**, University of Western Australia; **Luis Valdés**, IOC-UNESCO.

Die Autoren danken den folgenden Personen für Anmerkungen zum Manuskript:

Jim Barry (MBARI), Richard Black (Global Ocean Commission), Luke Brander (Universität van Amsterdam und Hong Kong University of Science and Technology), Sam Dupont (Göteborgs Universität), Jonathan Wentworth (UK Parliamentary Office of Science and Technology) und Wendy Watson-Wright (IOC-UNESCO).

Übersetzung:

Maike Nicolai (GEOMAR)

Infografiken:

Félix Pharand-Deschênes (Globaia), Naomi Lubick (IGBP), Owen Gaffney (IGBP), Wendy Broadgate (IGBP)

Grafik und Produktion:

Hilarie Cutler (IGBP), Naomi Lubick (IGBP)

Titelbild:

pH-Wert des Ozeans im Jahr 2100. Modellierungsdaten von Tatiana Ilyina, Max-Planck-Institut für Meteorologie. Karte: Globaia.

OZEANVERSÄUERUNG

Die Anzahl von Forschungsarbeiten zur Ozeanversauerung steigt rapide. Beim Third Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World (Drittes Symposium über den Ozean in einer Hoch-CO₂-Welt) kamen im September 2012 in Monterey im US-Staat Kalifornien 540 Experten aus 37 Ländern zusammen. Sie diskutierten Ergebnisse der Ozeanversauerungs-Forschung, Einflüsse auf Ökosysteme sowie sozio-ökonomische Folgen und politische Auswirkungen. An der Tagung nahmen mehr als doppelt so viele Wissenschaftler teil wie an der vorangegangenen Veranstaltung vier Jahre zuvor.

Hier präsentieren wir eine Zusammenfassung des Kenntnisstands zur Ozeanversauerung, die auf Forschungsergebnissen basiert, die auf dem Symposium und darüber hinaus vorgestellt wurden.

Infolge menschlicher Aktivitäten wie der Verbrennung fossiler Energieträger steigen der Gehalt an Kohlendioxid (CO₂) in der Atmosphäre und damit der Säuregehalt des Meerwassers. Dieser Prozess wird als Ozeanversauerung bezeichnet. Historisch betrachtet hat der Ozean etwa 30 Prozent allen CO₂ aufgenommen, das Menschen seit Beginn der industriellen Revolution in die Atmosphäre entlassen haben. Dies hat dazu geführt, dass der Säuregrad des Ozeans um 26 Prozent zugenommen hat¹.

Ozeanversauerung verändert Ökosysteme und die Artenvielfalt. Sie kann die Nahrungsmittelsicherheit beeinträchtigen und sorgt dafür, dass der Ozean nur eine begrenzte Menge CO₂ aus menschlichen Emissionen aufnehmen kann. Die ökonomischen Folgen der Ozeanversauerung können erheblich sein.

Größere Risiken können langfristig nur durch eine Reduzierung der CO₂-Emissionen begrenzt werden.



Katharina Fabricius

Zusammenfassung der Ergebnisse

Während der vergangenen 20 Jahre wurde nachgewiesen, dass der pH-Wert der Weltozeane infolge menschlicher CO₂-Emissionen in die Atmosphäre sinkt.

Das Third Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World baut auf dieses Wissen auf.



Katharina Fabricius

- ▶ Der Ozean versauert weiterhin in einer erdgeschichtlich beispiellos hohen Geschwindigkeit. Neueste Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass die Veränderung schneller vonstatten geht als jemals zuvor während der vergangenen 300 Millionen Jahre.
- ▶ Je stärker der Ozean versauert, desto weniger zusätzliches Kohlendioxid kann er aus der Atmosphäre aufnehmen. So verringert sich die Fähigkeit des Ozeans, den Klimawandel abzumildern.
- ▶ In Labor- und Feldstudien wurden artspezifische Auswirkungen von Ozeanversauerung auf Organismen von den Polen bis zu den Tropen beobachtet. Viele Lebewesen zeigen nachteilige Effekte wie eine verminderte Fähigkeit, Schalen und Skelette zu bilden oder zu erhalten, eingeschränktes Wachstum sowie eine reduzierte Überlebensfähigkeit, Bestandsgröße oder Larvenentwicklung. Einige Arten weisen hingegen eine hohe Toleranz gegenüber Ozeanversauerung auf und wieder andere, etwa einige Seegräser, scheinen sogar davon zu profitieren.
- ▶ Innerhalb von Jahrzehnten werden große Teile der polaren Ozeane korrosiv für die ungeschützten Schalen kalkbildender mariner Organismen sein.
- ▶ Veränderungen in der Karbonat-Chemie des tropischen Ozeans könnten das Wachstum von Korallenriffen in den nächsten Dekaden erschweren oder verhindern.
- ▶ Vorhersagen zufolge beeinflussen die weitreichenden Effekte der Ozeanversauerung Nahrungsnetze, Artenvielfalt, Aquakultur und damit die Gesellschaft.
- ▶ Verschiedene Arten können sich unterschiedlich gut auf neue Lebensbedingungen einstellen. Die Ozeanchemie könnte sich so schnell verändern, dass sich viele Arten oder Populationen nicht durch Evolution anpassen können.
- ▶ Eine Vielzahl von Stressoren – Ozeanversauerung, Erwärmung, sinkende Sauerstoffkonzentrationen (Sauerstoffentzug), zunehmende UV-B-Strahlung durch Ozonmangel in der Stratosphäre, Überfischung, Verschmutzung, Überdüngung – und ihre Wechselwirkungen stellen eine wesentliche Herausforderung für marine Ökosysteme dar.
- ▶ Die biogeochemischen Rückwirkungen auf das Klimasystem, die durch Ozeanversauerung entstehen, verstehen wir bislang erst im Ansatz.
- ▶ Vorherzusagen, wie sich ganze Ökosysteme in Reaktion auf steigende CO₂-Werte verändern werden, bleibt eine Herausforderung. Wir wissen allerdings genug, um sagen zu können, dass wir innerhalb unseres Lebens einen Wandel in marinen Ökosystemen erleben werden. Doch wir sind noch nicht in der Lage, verlässliche quantitative Vorhersagen über sozioökonomische Auswirkungen zu treffen.
- ▶ Menschen, die von den Ökosystem-Dienstleistungen des Ozeans abhängen, sind besonders gefährdet und könnten gezwungen sein, sich innerhalb von Jahrzehnten umzustellen oder mit den Folgen der Ozeanversauerung zurechtzukommen. Schalentierfischereien und Aquakulturen könnten in einigen Regionen ihre Produktionsweise anpassen. Der Verlust tropischer Korallenriffe wird nicht nur den Tourismus beeinflussen, sondern auch die Nahrungsmittelsicherheit und den Küstenschutz für einige der ärmsten Völker der Welt.

Schadensminderung und Anpassung

Politische Erwägungen

Ozeanversauerung ist nicht eindeutig durch internationale Verträge erfasst. Abläufe bei den Vereinten Nationen sowie bei internationalen und regionalen Konventionen beginnen, Ozeanversauerung zu berücksichtigen (Londoner Übereinkommen/Protokoll, Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen, Übereinkommen über die biologische Vielfalt und andere). Verhandlungsführer der Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) nehmen regelmäßige wissenschaftliche Gutachten über die Ozeanversauerung entgegen, und das Thema wird im Sachstandsbericht der Zwischenstaatlichen Sachverständigengruppe über Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) behandelt.

Im Juni 2012 hat die Weltkonferenz für Nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen RIO+20 Ozeanversauerung als Bedrohung für ökonomisch und ökologisch wichtige Ökosysteme und menschliches Wohlbefinden anerkannt.

Trotzdem gibt es noch immer keine internationalen Mechanismen oder angemessene Förderung für Studien, die sich insbesondere mit der Schadensminderung oder Anpassung an Ozeanversauerung befassen.

- ▶ Hauptursache für die Ozeanversauerung ist die Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten. Die einzige bekannte realistische Option zur globalen Schadensminderung ist es, den zukünftigen atmosphärischen CO₂-Gehalt zu begrenzen.
- ▶ Ein geeignetes Management der Landnutzung und Landnutzungsänderungen können die Aufnahme von atmosphärischem CO₂ in Vegetation und Böden durch Aktivitäten wie die Wiederherstellung von Feuchtgebieten, die Anpflanzung neuer Wälder und die Wiederaufforstung verbessern.
- ▶ Vorschläge zum Geo-Engineering, die atmosphärisches CO₂ nicht reduzieren – beispielsweise Verfahren, die sich ausschließlich auf die Temperatur konzentrieren (wie Rückstreuung durch Aerosole oder die Reduzierung anderer Treibhausgase als CO₂) – werden die Ozeanversauerung nicht verhindern. Dem Wasser alkalische Mineralien hinzuzufügen, ist nur in sehr kleinem Maßstab in den Küstenregionen effektiv und wirtschaftlich machbar. Zudem sind die Nebenwirkungen für die Umwelt weitgehend unbekannt².
- ▶ Die Auswirkungen anderer Stressoren auf marine Ökosysteme wie höhere Temperaturen und Sauerstoffentzug – ebenfalls mit einem steigenden CO₂-Gehalt verbunden – werden durch die Begrenzung der CO₂-Emissionswerte reduziert.
- ▶ Die Schalentier-Aquakultur ist stark gefährdet. Sie könnte von einer Risikoabschätzung und Analyse von Schadensminderungs- und Anpassungsstrategien profitieren. So kann beispielsweise mit Hilfe einer Überwachung des Meerwassers rund um Muschelfarmen ermittelt werden, wann die Aufnahme von Meerwasser mit einem niedrigeren pH-Wert zu begrenzen ist. Betriebe können verlegt werden, oder Manager können Larvenstadien oder Stämme für die Zucht auswählen, die widerstandsfähiger gegen die Ozeanversauerung sind.
- ▶ Auf lokaler Ebene können die Auswirkungen der Ozeanversauerung auf die Widerstandsfähigkeit der Ökosysteme durch die Minimierung anderer lokaler Stressoren^{3,4,5} eingeschränkt werden:
 - Entwicklung eines nachhaltigen Fischereimanagements wie etwa eine Regulierung der Fänge mit dem Ziel, Überfischung zu reduzieren und die Beifang-Mengen zu verringern. Dort, wo diese Art von Management umgesetzt und durchgesetzt worden ist, hat sie die Widerstandsfähigkeit der Ökosysteme erhalten.
 - Übernahme von nachhaltigen Management-Strategien für Habitate, verstärkter Küstenschutz, reduzierte Sedimentbelastung und Umsetzung der Meeresraumplanung.
 - Einrichtung und Überwachung geschützter Meeresgebiete (Marine Protected Areas, MPAs), welche das Management gefährdeter und hoch empfindlicher Ökosysteme unterstützen und deren Widerstandsfähigkeit gegen multiple Umweltstressoren⁶ verbessern.
 - Überwachung und Regulierung örtlich beschränkter Quellen von Versauerung wie Abflüsse und Verschmutzung durch Düngemittel.
 - Reduktion von Schwefeldioxid- und Stickoxid-Emissionen von Kohlekraftwerken und Schiffsabgasen⁷, die erheblich zur örtlich begrenzten Versauerung beitragen.

OZEANVERSAUERUNG

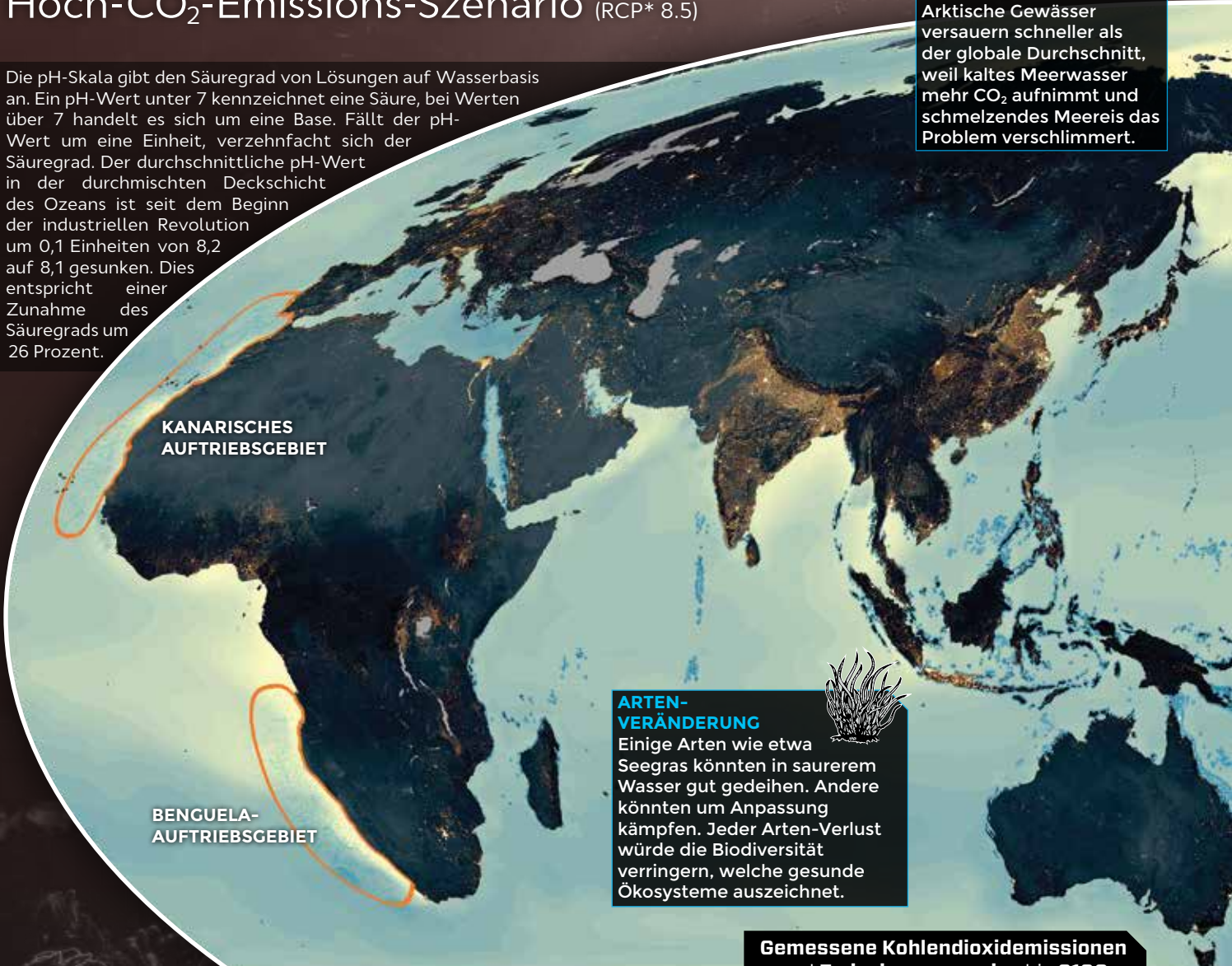
pH-Wert des Ozeans im Jahr 2100

Hoch-CO₂-Emissions-Szenario (RCP* 8.5)

Die pH-Skala gibt den Säuregrad von Lösungen auf Wasserbasis an. Ein pH-Wert unter 7 kennzeichnet eine Säure, bei Werten über 7 handelt es sich um eine Base. Fällt der pH-Wert um eine Einheit, verzehnfacht sich der Säuregrad. Der durchschnittliche pH-Wert in der durchmischten Deckschicht des Ozeans ist seit dem Beginn der industriellen Revolution um 0,1 Einheiten von 8,2 auf 8,1 gesunken. Dies entspricht einer Zunahme des Säuregrads um 26 Prozent.

ARKTIS

Arktische Gewässer versauern schneller als der globale Durchschnitt, weil kaltes Meerwasser mehr CO₂ aufnimmt und schmelzendes Meereis das Problem verschlimmert.

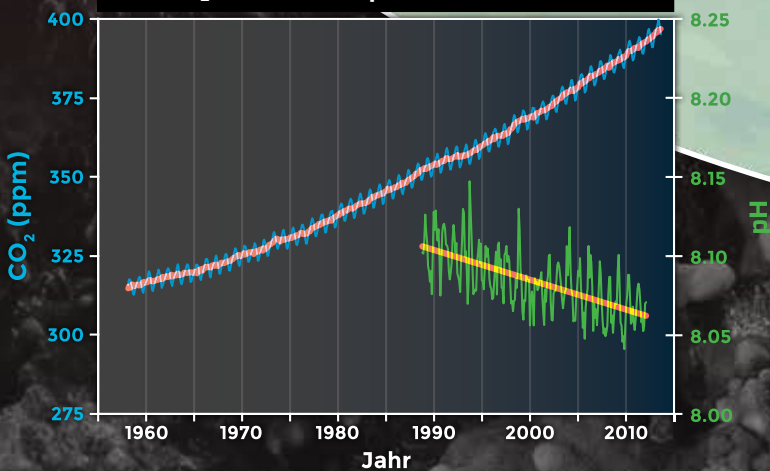


ARTEN-VERÄNDERUNG

Einige Arten wie etwa Seegras könnten in saurerem Wasser gut gedeihen. Andere könnten um Anpassung kämpfen. Jeder Artenverlust würde die Biodiversität verringern, welche gesunde Ökosysteme auszeichnet.

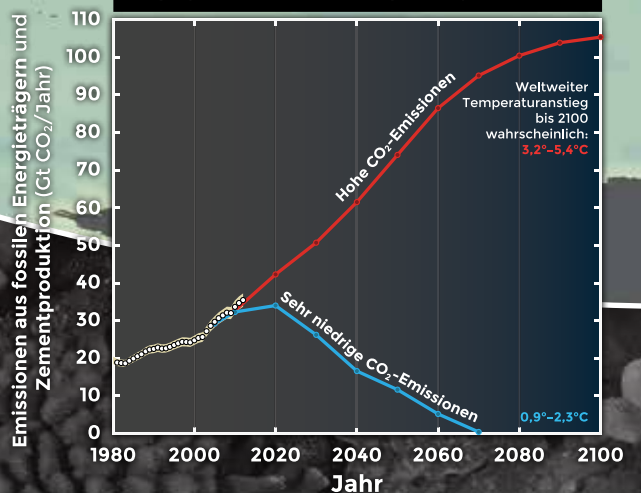


CO₂ in der Atmosphäre und im Ozean



Messungen von CO₂ (parts per million, ppm) in der Atmosphäre und pH-Wert des Meerwassers an der Oberfläche in Mauna Loa und an der hawaiianischen Zeitserienstation Hawaii Ocean Time-series (HOT) Aloha, Hawaii, Nordpazifik.
Quelle: Nach Richard Feeley, NOAA, Peter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends) und Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (<http://scrippsco2.ucsd.edu>)

Gemessene Kohlendioxidemissionen und Emissionsszenarios bis 2100



Globale CO₂-Emissionen (weiß gepunktet, Unsicherheiten in grau) aus der Nutzung fossiler Energieträger folgen dem Pfad hoher Emissionen (rote Linie, RCP* 8.5), der Vorhersagen zufolge zu einer deutlichen weltweiten Erwärmung führt. Umfangreiche und anhaltende Emissionsreduktionen (blaue Linie, RCP* 2.6) sind nötig, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, das Zwei-Grad-Ziel zu erreichen, auf das sich die Politik geeinigt hat. Quelle: Glen Peters und Robbie Andrew, CICERO und das Global Carbon Project, nach Peters et al., 2013 (Referenz 8). Historische Daten vom Carbon Dioxide Information Analysis Center.

* Emissionsszenarios der Zwischenstaatlichen Sachverständigengruppe über Klimaänderungen (IPCC) - Repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCPs)



OZEANVERSAUERUNG IN ZAHLEN

40% Die Zunahme von Kohlendioxid (CO₂) in der Atmosphäre seit dem Beginn der industriellen Revolution.

26% Die Zunahme des Säuregehalts des Ozeans seit prä-industriellen Werten bis heute.

etwa 170% Die erwartete Zunahme des Säuregehalts des Ozeans bis 2100 im Vergleich mit prä-industriellen Werten, falls die hohen CO₂-Emissionen andauern (RCP* 8.5).

x10 Die Versauerung läuft derzeit zehnmals schneller ab als jemals zuvor während der vergangenen 55 Millionen Jahre.

24 Millionen Die Menge an CO₂ in Tonnen, die der Ozean jeden Tag aufnimmt.

STRESS FÜR DEN OZEAN

Ozeanversauerung ist eine der vielen großen Veränderungen, die der Ozean erfährt. Andere sind die Erwärmung des Meerwassers, sinkende Sauerstoff-Konzentrationen, Überfischung und Überdüngung.



KALIFORNISCHES AUFTRIEBSGEBIET

KORALLEN

Sofern die hohen CO₂-Emissionen andauern, erschweren oder verhindern Veränderungen in der Karbonat-Chemie und Erwärmung das Wachstum von Korallenriffen innerhalb von Jahrzehnten. Tropische Korallen sind in blau eingezeichnet.



SCHALENTIERE

Ökonomisch wichtige Mollusken wie Miesmuscheln und Austern reagieren empfindlich auf Ozeanversauerung. Einige Zuchtbetriebe mussten sich bereits an niedrigere pH-Werte natürlichen oder menschlichen Ursprungs anpassen oder umsiedeln.

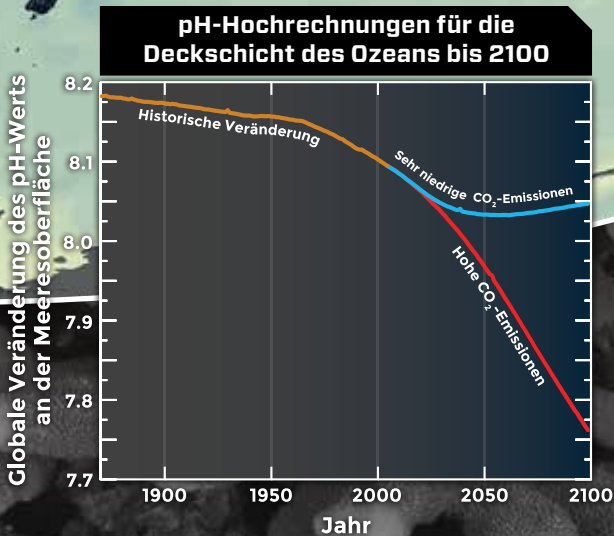


HUMBOLDT-AUFTRIEBSGEBIET

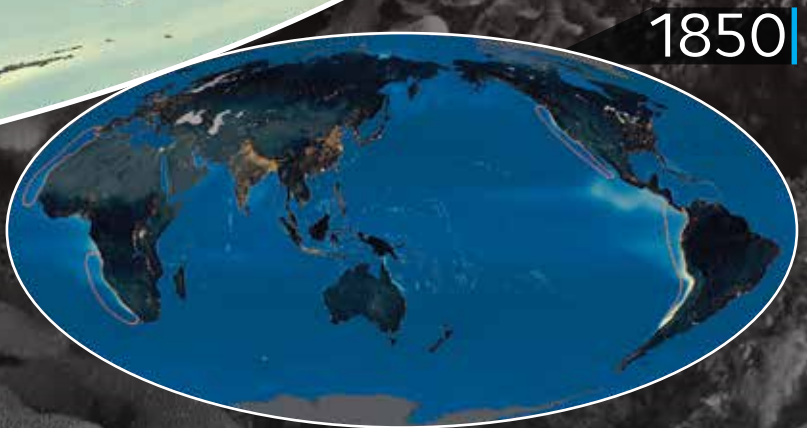
AUFTRIEBSGEBIETE

Große Veränderungen werden für die wirtschaftlich wichtigen Auftriebsgebiete erwartet, deren pH-Werte bereits natürlicherweise niedrig sind. Hier verbinden sich Versauerung, Erwärmung und niedriger Sauerstoffgehalt (vgl. orangefarbene Umrandungen).

2100



Modellrechnung zur globalen Veränderung des pH-Werts an der Meeresoberfläche zwischen 1870 und 2100. Die blaue Linie spiegelt die angenommene Veränderung des pH-Werts auf der Basis sehr niedriger CO₂-Emissionen in die Atmosphäre (RCP* 2,6). Die rote Linie illustriert den pH-Wert bei hohen CO₂-Emissionen (RCP* 8,5).
Quelle: Nach Bopp et al., 2013 (Referenz 9).



Ozeanversauerung (pH)

7.1 7.7 8.3


Aragonitsättigung 2100

Hoch-CO₂-Emissions-Szenario (RCP* 8,5)

Arktis

Teile der Arktis sind bereits korrosiv für Schalen mariner Organismen. Innerhalb von Dekaden wird fast die gesamte Oberfläche diesen Zustand erreicht haben. Dies wird Ökosysteme und Menschen beeinträchtigen, die von ihnen abhängen.

Korallen

 Schätzungen zufolge werden sehr hohe CO₂-Emissionen bis 2100 in der ozeanischen Deckschicht Bedingungen verursachen, die für das Wachstum von Korallenriffen nachteilig sind. Drastische Reduzierungen der Emissionen könnten gewährleisten, dass die Hälfte des Oberflächenwassers das Wachstum von Korallenriffen weiterhin begünstigt***.

Sättigungszustand

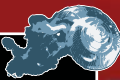
Der Sättigungszustand Omega (Ω) bezeichnet den Sättigungsgrad von Kalziumkarbonat im Meerwasser. Hier wird Ω für die mineralische Form des Aragonit gezeigt.

Wenn Ω unter 1 liegt ($\Omega < 1$), sind die Bedingungen korrosiv (untersättigt) für Schalen und Skelette auf Aragonit-Basis.

Wenn Ω über 1 liegt ($\Omega > 1$), ist das Wasser mit Kalziumkarbonat übersättigt, und die Bedingungen fördern die Schalenbildung. Das Wachstum von Korallen profitiert ab $\Omega \geq 3$.

Computermodellierungen zeigen, dass Ω bis 2100 im Oberflächenwasser um tropische Riffe unter 3 sinken wird, wenn CO₂-Emissionen wie bisher fortgesetzt werden***.

Antarktis

 Wenn CO₂-Emissionen wie bisher fortgesetzt werden (RCP* 8,5), werden für 60 Prozent der Oberfläche des Südpolarmeers korrosive Bedingungen für Organismen erwartet, die ihre Schalen aus Aragonit aufbauen. Hierzu gehören etwa die Flügelschnecken, die Teil des marinen Nahrungsnetzes sind. Drastische Reduktionen der Emissionen (RCP* 2,6) können verhindern, dass große Teile der Oberfläche des Südpolarmeers korrosiv für die Schalen aragonitischer Organismen werden**.

*Emissionsszenarios der Zwischenstaatlichen Sachverständigengruppe über Klimaänderungen (IPCC) - Repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCPs)

**Persönliche Kommunikation: Joos & Steinacher, nach Steinacher et al., 2013 (Referenz 10)

***Ricke et al., 2013 (Referenz 11)

Schalen und Skelette

Die Schalen und Skelette vieler mariner Organismen bestehen entweder aus Kalzit oder Aragonit, beides sind Formen von Kalziumkarbonat. Wissenschaftler interessieren sich besonders für Aragonit, das von vielen Korallen und einigen Weichtieren produziert wird, da es löslicher ist als Kalzit.

Organismen können ihre Schalen und Skelette besser aufbauen, wenn ausreichend Karbonat-Ionen im Wasser verfügbar sind – es übersättigt ist. Ungeschützte Schalen und Skelette lösen sich auf, wenn Karbonat-Ionen im Wasser knapp sind – es untersättigt ist.



2100

Phytoplankton

Die festen Schalen von Coccolithophoriden – winzige im Wasser schwebende Lebewesen – produzieren einen Großteil des marinen Kalziumkarbonats. Wenn sie absterben, sinken sie und nehmen Kohlenstoff mit in die Tiefen des Ozeans. Sie sind eine wichtige Nahrungsquelle für andere Meeresbewohner und eine Hauptquelle für das klimakühlende Gas Dimethylsulfid (DMS).

Wie Coccolithophoriden auf Ozeanversauerung reagieren, ist Thema intensiver wissenschaftlicher Untersuchungen. Während einige Arten tolerant gegenüber Ozeanversauerung sind, zeigen andere in saurem Wasser verringerte Kalzifizierungs- und Wachstumsraten.



Aragonit-Sättigungszustand (Ω)



1850

Internationale Forschungskoordination



- ▶ Forschung wird dringend benötigt, um Unsicherheiten zu verringern. Ein koordiniertes **globales Netzwerk von experimenteller, beobachtender und modellierender Meeresforschung** ist von entscheidender Bedeutung. Hauptgebiete der Forschung sind Reaktionen von Schlüsselarten und ganzen Ökosystemen, insbesondere über längere Zeiträume; das Anpassungsvermögen von Organismen; sozio-ökonomische Folgen; und die biogeochemischen Rückkoppelungen mit dem Klimasystem.
- ▶ Im Juni 2012 wurde das **Ocean Acidification International Coordination Centre (OA-ICC)** als internationales Koordinierungszentrum für Forschungsarbeiten zur Ozeanversauerung ins Leben gerufen. Das Zentrum, das in den Marinen Umweltlaboratorien der Internationale Atomenergie-Organisation (International Atomic Energy Agency, IAEA) in Monaco untergebracht ist, unterstützt, kommuniziert und fördert internationale Aktivitäten in der Erforschung und Überwachung der Ozeanversauerung und stellt Verbindungen zwischen Wissenschaft und Politik her.
- ▶ Ein globales Beobachtungsnetzwerk für Ozeanversauerung, das **Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON)**¹², wurde im Juni 2012 eingerichtet. Es arbeitet eng mit dem internationalen Koordinierungszentrum zusammen. Global betrachtet gewährleisten nur wenige Standorte multi-dekadische Messungen. Entlegene Regionen sind schlecht abgedeckt. Das Netzwerk misst chemische und ökosystem-relevante Variablen. Diese werden benötigt, um die Auswirkungen der Ozeanversauerung rechtzeitig einschätzen zu können. Es sichert die Datenqualität und Vergleichbarkeit und führt Informationen zusammen.
- ▶ Umfangreiche Investitionen in die Beobachtung von Auswirkungen auf die Ökosysteme bilden den Schlüsselaspekt der zukünftigen internationalen Forschungskoordination.
- ▶ **Future Earth** (Erde der Zukunft), die neue internationale, auf zehn Jahre angelegte Forschungsinitiative zur globalen Nachhaltigkeit, wird einen Mechanismus entwickeln, mit dessen Hilfe eine international koordinierte Forschungsagenda ausgearbeitet wird, die Themen wie Ozeanversauerung beinhaltet.






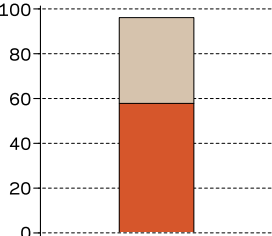
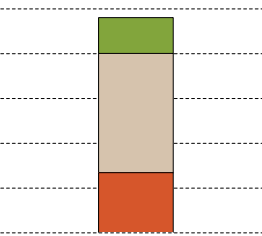
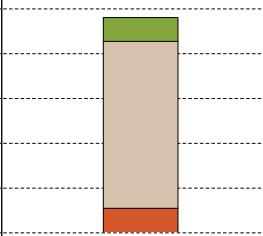
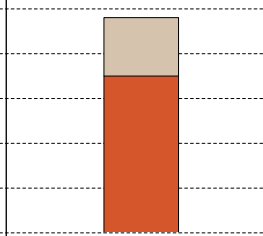
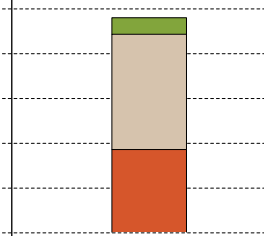
Stakeholder-Engagement

Effektiver Informationsaustausch zwischen Wissenschaft, Politik und Industriezweigen ist die Grundlage einer erfolgreichen Anpassung und Schadensminderung. Ein Forum für den Dialog zwischen der Forschungsgemeinschaft und Stakeholdern – die **Ocean Acidification international Reference User Group (OAiRUG, Internationale Ozeanversauerungs-Referenz-Nutzergruppe)** – wurde auf der Basis einer früheren europäischen Initiative eingerichtet. Die OAiRUG bündelt ein breites Spektrum an Endnutzern und führenden Wissenschaftlern, um den zügigen Austausch von Wissen zu fördern.

Außerdem beabsichtigt Future Earth (s. oben), eine Plattform für den zielorientierten Dialog über globale Themen einschließlich der Ozeanversauerung einzurichten.

Kommerziell und ökologisch wichtige Arten

Wissenschaftliche Forschung zeigt die Verletzlichkeit und Empfindlichkeit kommerziell und ökologisch wichtiger mariner Arten im Hinblick auf Ozeanversauerung unter erhöhten CO₂-Niveaus (nach Turley und Boot, 2011¹³, und Wittmann und Pörtner, 2013¹⁴).

GRUPPEN				
Mollusken	Stachelhäuter	Krustentiere	Flossenfische	Korallen
				
Venusmuscheln, Jakobsmuscheln, Miesmuscheln, Austern, Flügelschnecken, Abalonen und Kopffüßer (Kalmare, Sepien und Tintenfische).	Seeigel, Seegurken, Seesterne.	Shrimps, Garnelen, Krabben, Hummer, Ruderfußkrebse (Zooplankton) usw.	Kleine (Heringe, Sardinen, Sardellen), große (Thunfisch, Bonitos, Knochenhechte), grundlebende (Flundern, Heilbutt, Kabeljau, Schellfisch) usw.	Tropische und Kaltwasserkorallen.
Rolle im Ökosystem				
Muscheln und Flügelschnecken sind eine wichtige Nahrungsquelle für Fische wie Lachs (Flügelschnecken). Miesmuscheln und Austern bieten Lebensraum für andere Organismen.	Schlüsselarten und eine Nahrungsquelle für Fische. Seesterne sind wichtige Räuber.	Zooplankton wie Ruderfußkrebse spielen eine zentrale Rolle in Nahrungsnetzen, die Phytoplankton (das sie fressen) und Raubtiere verbinden (Fische und Säugetiere).	Entscheidende Rolle im Gleichgewicht der Ökosysteme als Top-Räuber oder als Verbindung wichtiger trophischer Ebenen.	Wichtige Ökosystem-Ingenieure, bieten Lebensraum für eine Vielzahl von Meerestierarten, von denen viele auf das Leben in Korallenriffen spezialisiert sind.
Aktuell geschätzter kommerzieller Wert [♦]				
\$24 Milliarden, lokal bedeutend, direkte Proteinquelle in einigen Inselstaaten.	\$0,7 Milliarden, lokal bedeutend, „Luxus“-Nahrungsmittel, Seegurken werden in der Traditionellen Chinesischen Medizin ausgiebig genutzt.	\$37 Milliarden	\$65 Milliarden, bedeutender Anteil an menschlicher Nahrung, Fischöl und Fischmehl. Lokal bedeutend: Abhängigkeit von Nahrung und Einkommen in einigen Regionen.	\$30–375 Milliarden [◇] Diese Brennpunkte mariner Artenvielfalt stellen einen Küstenschutz dar, ziehen Touristen an und fördern die Fischerei.
Verletzlichkeit				
Erwachsene und Jungtiere zeigen verringerte Kalzifizierung, Wachstum und Überlebensraten. Einige Arten können lokal aussterben.	Wenige Arten wurden bisher untersucht. Verletzlichkeit in frühen Lebensstadien. Einige Arten können lokal aussterben.	Weniger betroffen als andere Gruppen. Temperaturtoleranz einiger Krebse wird durch Versauerung verringert.	Indirekte Effekte aufgrund von Veränderungen der Beute und Verlust von Lebensräumen wie Korallen wahrscheinlich. Möglicherweise einige direkte Auswirkungen auf Verhalten, Fitness und Überleben der Larven.	Erosion, Synergie-Effekte von Erwärmung und Versauerung.
Empfindlichkeit (Prozent betroffener Arten) [△]				
				

Bilder: © iStockphoto.com

Effekte

- positiv
- keine
- negativ

♦ Der kommerzielle Wert für Fischereien stellt die Summe von Fang und Aquakultur im Jahr 2010 in US-Dollar dar¹⁵.
 ◇ Der heutige geschätzte Wert globaler Güter und Services, die durch Korallenriffe geliefert werden, etwa Küstenschutz, Tourismus, Artenvielfalt und Nahrung^{16,17}.
 △ Nach Wittmann und Pörtner, 2013¹⁴. Diese Daten beziehen sich auf „business-as-usual“-Entwicklungen der CO₂-Niveaus.

Gesellschaften und Wirtschaftssysteme

Gesellschaften hängen von verschiedenen Ökosystem-Leistungen des Ozeans ab:

- Versorgung, etwa mit Nahrung
- Regulierung, etwa die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre
- Kulturelle Dienstleistungen, etwa Erholung
- Unterstützung, etwa der Nährstoffkreisläufe

Über die Auswirkungen der Ozeanversauerung auf einzelne Organismen ist zwar bereits viel bekannt, über mögliche Reaktionen ganzer Ökosysteme besteht jedoch weitgehend Unsicherheit. Obwohl Schädigungen für Schalentiere und tropische Korallen (große Gewissheit) und Fischerei (niedrige Gewissheit) erwartet werden, ist es schwierig, die Veränderungen der Ökosysteme und der Fischerei quantitativ zu erfassen und vorherzusagen, wie sich die Gesellschaft daran anpassen wird.

Niveaus von Gewissheit:

In dieser Veröffentlichung geben wir vier Niveaus von Gewissheit an (rechts). Genauere Informationen darüber, wie diese Niveaus festgelegt wurden, sind im Kapitel zum wissenschaftlichen Hintergrund zu finden.

- S** Sehr große Gewissheit
- G** Große Gewissheit
- M** Mittlere Gewissheit
- N** Niedrige Gewissheit

S Je stärker der Ozean versauert, desto weniger kann er als Kohlenstoffsенке fungieren [Sehr große Gewissheit].

Der Ozean stellt eine umfangreiche Senke für menschengemachte CO₂-Emissionen dar. Zurzeit endet etwa ein Viertel der jährlichen CO₂-Emissionen aus menschlichen Aktivitäten im Ozean¹⁸. Auf diesen Service können wir uns zukünftig nicht mehr verlassen. Denn der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre steigt schneller an, als der Ozean reagieren kann. Die Fähigkeit des Ozeans, CO₂ aufzunehmen, sinkt mit dem pH-Wert des Ozeans – das heißt, die Pufferfunktion nimmt ab¹⁹. Diese verringerte Leistung stellt für die Stabilisierung der CO₂-Emissionen ein Problem dar: Sie führt dazu, dass noch umfangreichere Emissionssenkungen nötig sind, um die geplanten Ziele zu erreichen und die Folgen des Klimawandels zu beschränken.

M Rückgänge in der Schalentierfischerei verursachen wirtschaftliche Verluste [Mittlere Gewissheit], deren Ausmaß bisher unklar ist.

Die geschätzten weltweiten jährlichen Verluste durch Rückgänge in der Muschel- und Meeresschnecken-Produktion aufgrund von Ozeanversauerung könnten bis 2100 bis auf mehr als 130 Milliarden US-Dollar ansteigen (Preisniveau 2010), sofern der derzeitige Trend der CO₂-Emissionen fortgesetzt wird, lautet eine Schätzung²⁰ [Niedrige Gewissheit]. Für die Vereinigten Staaten wird eine 13-prozentige Gewinn-Abnahme durch Ernteverluste aufgrund von Versauerung bis 2060 erwartet²¹ [Niedrige Gewissheit]. Wirtschaftlich wichtige Schalentier-Arten könnten unterschiedlich auf Ozeanversauerung reagieren (vgl. Tabelle auf S. 9). Wir wissen jedoch noch nicht genug, um genaue quantitative Vorhersagen für alle Fischereien zu treffen. Mollusken scheinen eine der empfindlichsten Organismen-Gruppen zu sein, die bisher unter Versauerungsbedingungen untersucht wurden. Austernlarven in Farmen im Nordost-Pazifik sind in der Tat sehr verletzlich und bereits durch niedrige pH-Werte geschädigt^{22,23}.



Soziale Folgen

Die hier beschriebenen Beispiele unterstreichen die Gefahr deutlicher Gewinneinbrüche, Verlust von Arbeitsplätzen und Existenzgrundlagen sowie indirekte ökonomische Kosten, die auftreten können, wenn Ozeanversauerung marine Lebensräume vernichtet, die Verfügbarkeit mariner Ressourcen verändert und andere

Ökosystem-Dienstleistungen stört.

Die aktuellen Berechnungen wirtschaftlicher Folgen beziehen sich auf kommerziell vermarktete Ökosystem-Dienstleistungen wie Fischereien und Tourismus. Eine umfassende Bewertung muss auch andere Services als diese direkt marktbasieren berücksichtigen,

Schwellenwerte

Können Wissenschaftler ein „sicheres“ oder „tolerierbares“ Niveau von Ozeanversauerung definieren, das nicht überstiegen werden darf?

Einige Entscheidungsträger fragen Wissenschaftler, ob es möglich sei, erste Schwellenwerte anzugeben, jenseits derer sich Ökosysteme nicht mehr regenerieren würden. Dies ist eine komplexe Herausforderung. Die kombinierten Auswirkungen einer veränderten Physik, Chemie und Biologie der Ozeane variieren von Ökosystem zu Ökosystem. Die Folgen hängen auch von der geographischen Lage und lokalen Gegebenheiten ab.

Auswirkungen auf Ökosysteme hängen von politischen Entscheidungen, die jetzt in Bezug auf zukünftige Kohlendioxid-Emissionen getroffen werden, sowie von Strategien zu anderen marinen Aspekten ab. Darüber hinaus gibt es vielschichtige ethische und ökonomische Erwägungen in Bezug auf „sichere“ oder „tolerierbare“ Niveaus der Ozeanversauerung.

Die Wissenschaft kann diese Fragen nicht beantworten, aber einige Informationen über mögliche Auswirkungen politischer Optionen liefern. Ein Dialog zwischen Wissenschaftlern, Entscheidungsträgern und Stakeholdern ist notwendig, um zu erkunden, welche Fragen Antworten benötigen und welche Alternativen zur Verfügung stehen.

Ein erster Schritt auf dem Weg hin zur Identifizierung von Schwellenwerten und Indikatoren wird eine gemeinschaftliche globale Forschungs-Initiative sein. Sie sollte Experimente, Modellrechnungen und Beobachtungen kombinieren, um die komplexen Reaktionen mariner Ökosysteme auf Ozeanversauerung und andere Stressoren aufzuschlüsseln. Die Leitung liegt beim neu gegründeten Internationalen Koordinationszentrum OA-ICC.

M Negative sozio-ökonomische Folgen werden durch den Verlust von Korallenriffen erwartet [Mittlere Gewissheit]. Die Höhe der Kosten ist jedoch ungeklärt.

Durch das Verschwinden tropischer Korallenriffe sind wahrscheinlich deutliche wirtschaftliche Einbußen zu erwarten (bis 2100 werden Korallen so selten sein, dass der Gegenwert ihrer Verluste einer Hochrechnung zufolge²⁴ eine Billion US-Dollar übersteigen wird; Preisniveau 2010) [Niedrige Gewissheit]. Ein großer Teil dieser Rückgänge wird in ungeschützten und kleinen Inselstaaten zu beklagen sein, die wirtschaftlich von Korallenriffen abhängen. Verluste von Korallenriffen werden den Tourismus, die Nahrungsmittelsicherheit, den Küstenschutz und den Artenreichtum negativ beeinflussen. Aber Ozeanversauerung ist nicht der einzige Stressfaktor. Die Riffe sind bereits durch erhöhte Temperaturen (die Korallenbleiche verursachen), Lebensraumzerstörung, Überfischung, Sedimentation und Verschmutzung gefährdet.

Aktivitäten, die das Tempo der Ozeanversauerung drosseln, werden die Auswirkungen reduzieren und die Chance erhöhen, dass sich die Korallenriffe von anderen Belastungen erholen oder sogar anpassen. Daher werden zusätzliche menschengemachte Stressoren wie zerstörerische Fischereimethoden, Verschmutzung und Sedimentbildung nicht nur direkte ökologische Folgen haben – sie werden auch das Anpassungsvermögen der Korallenriffe an wärmere, saurere Bedingungen reduzieren.

Zusätzlich zur globalen Klimapolitik werden lokale Management-Strategien für die Riffe – die sich durch Maßnahmen wie Marine Schutzgebiete (Marine Protected Areas), Fischereimanagement und marine Raumplanung realisieren lassen – ebenfalls die Fähigkeit der Korallenriffe erhöhen, mit der Ozeanversauerung zurechtzukommen^{4,25}.

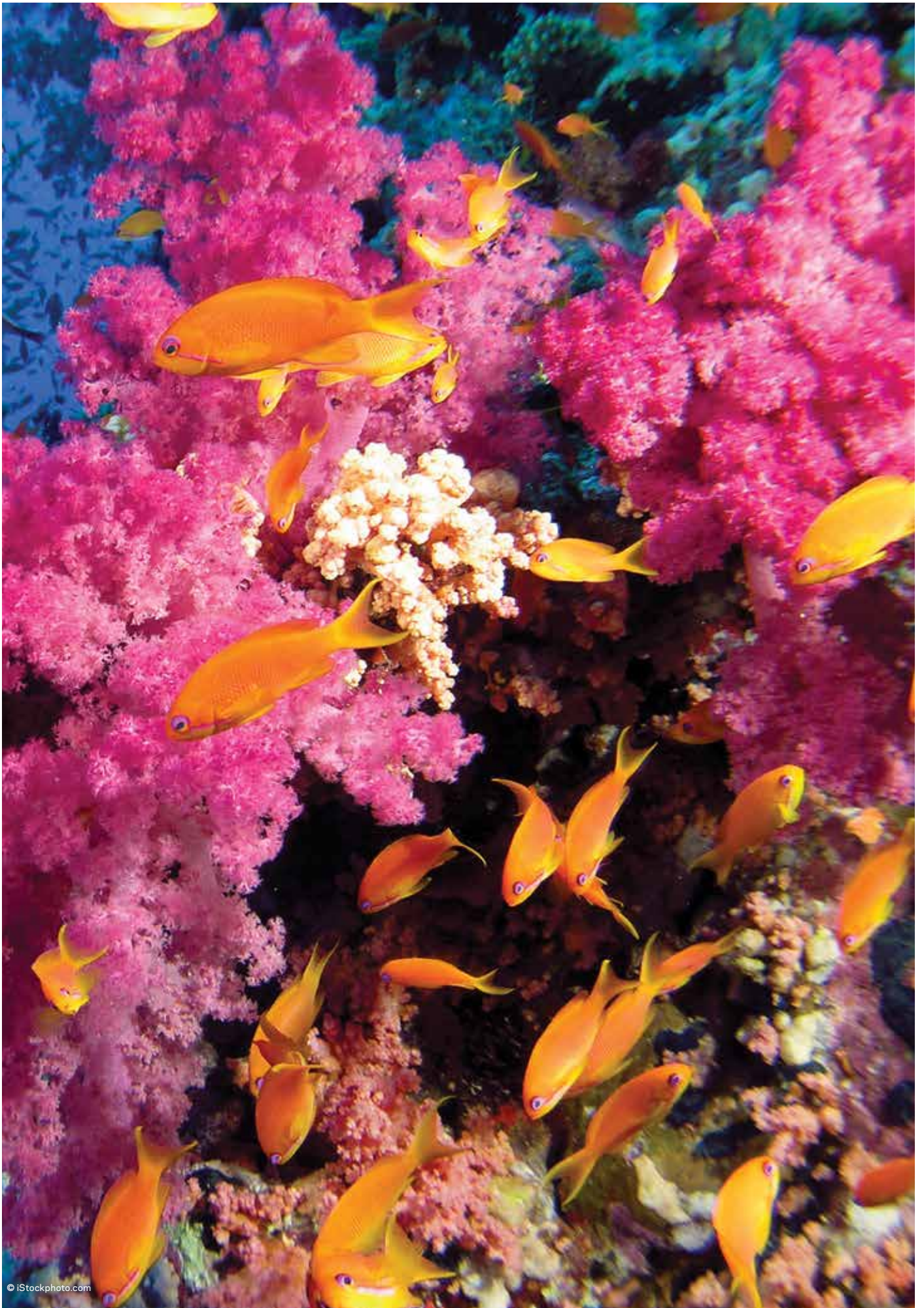
N Die Auswirkungen der Ozeanversauerung auf Ökosysteme könnte Spitzenprädatoren und Fischereien beeinträchtigen [Niedrige Gewissheit].

Es ist ungeklärt, welche Kettenreaktionen Veränderungen im Vorkommen und der Verteilung von Phytoplankton und Zooplankton innerhalb von marinen Ökosystemen auslösen werden, um schließlich Fische und Fischereiwirtschaft zu beeinträchtigen, von denen viele Gesellschaften abhängen. Außerdem ist wenig über die direkten Auswirkungen der Ozeanversauerung auf die Arten bekannt, die Ziel kommerzieller und existentieller Fischereien sind. Dies führt zu großer Unsicherheit bei der Vorhersage zukünftiger Veränderungen in der Fischereiwirtschaft. Dennoch ist dieses Thema wesentlich für die Forschung, da der Fischfang die Lebensgrundlage für etwa 540 Millionen Menschen oder acht Prozent der Weltbevölkerung darstellt²⁶.

etwa kulturelle oder regulierende Aufgaben (wie Küstenschutz) und eine breitere Auswahl an Versorgungs-Dienstleistungen (wie Arzneimittel auf mariner Basis).

Durch Ozeanversauerung besonders gefährdete Gesellschaften sind zumeist in Entwicklungsländern oder kleinen Inselstaaten anzutreffen²⁷.

Ihre Bewohner sind auf Fisch und andere marine Ressourcen als Haupt-Proteinquelle angewiesen. Außerdem hängen indigene Völker und Kulturen in der Arktis – dort, wo Ozeanversauerung schneller vorstatten geht als andernorts – von natürlichen Rohstoffen ab. Daher sind auch diese Gesellschaften besonders bedroht.



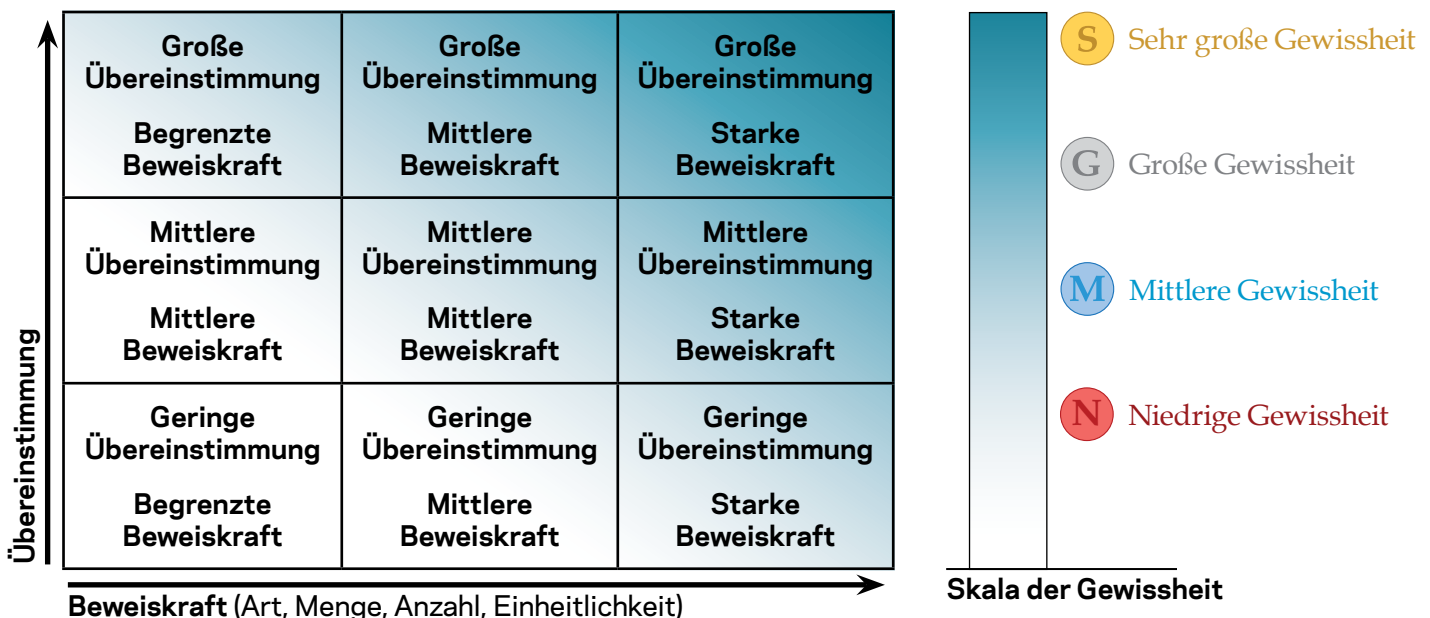
© iStockphoto.com

Der wissenschaftliche Hintergrund

Ozeanversauerung ist ein relativ junges Forschungsgebiet. Die Anzahl der Wissenschaftler und der Fachveröffentlichungen, die sich mit dem Thema befassen, steigen jedoch zügig an. Es gibt zahlreiche neue Erkenntnisse, und unser Verständnis wird kontinuierlich verbessert.

Zur Festlegung der Niveaus an Gewissheit

Die verschiedenen Niveaus an Gewissheit werden in dieser Veröffentlichung als „niedrig“, „mittel“, „groß“ und „sehr groß“ beschrieben. Diese Bezeichnungen zeigen an, wie die Autoren die Beweiskraft und die Übereinstimmung der Ergebnisse einschätzen. Diese Analyse basiert auf einem Bewertungsverfahren wie es beim Synthese-Band des Europäischen Projekts zur Ozeanversauerung²⁸ oder dem Fünften Sachstandsbericht der Sachverständigengruppe über Klimaänderungen (IPCC) angewendet wurde. Die jüngsten Meta-Analysen zur Ozeanversauerung mit 167 beziehungsweise 228 Studien zu Meeresorganismen^{14,29} lieferten weitere Belege, die den Autoren halfen, Versuchsdaten zu analysieren und zusammenzufassen. Zunehmende Beweiskraft und steigende Übereinstimmung entsprechen einer wachsenden Gewissheit (s. Tabelle), wie es im Leitfaden des IPCC zum Umgang mit Unsicherheiten³⁰ im Fünften Sachstandsbericht beschrieben ist.



Der Ozean versauert in hoher Geschwindigkeit und in erdgeschichtlich nie dagewesenem Maße

Die Chemie der Ozeanversauerung ist gut verstanden. Wissenschaftlern stehen fundierte Modelle zur Verfügung, um Veränderungen in der Chemie der ozeanischen Deckschicht vorherzusagen, die durch die CO₂-Zunahme in der Atmosphäre verursacht werden. Wenn sich CO₂-Gas in Meerwasser löst, bildet sich Kohlensäure, und die chemische Zusammensetzung des Ozeans ändert sich: Ozeanversauerung.

S Ozeanversauerung wird durch den Eintrag von Kohlendioxid aus menschlicher Aktivität in die Atmosphäre verursacht [Sehr große Gewissheit].

Der Ozean nimmt derzeit etwa ein Viertel des CO₂ auf, das aufgrund menschlicher Aktivitäten jährlich in die Atmosphäre entlassen wird¹⁸. Damit reduziert er die Auswirkungen dieses Treibhausgases auf das Klima erheblich.

S Von Menschen verursachte Ozeanversauerung findet derzeit messbar statt [Sehr große Gewissheit].

Von Menschen verursachte CO₂-Emissionen rufen chemische Veränderungen im Ozean hervor, die bereits jetzt zu beobachten und global zuverlässig vorhersagbar sind.

Der Säuregrad des Wassers ist seit Beginn der industriellen Revolution um etwa 26 Prozent angestiegen¹. Wenn mehr CO₂ gelöst wird, wird es kalkifizierenden Organismen schwererfallen, ihre Schalen aufzubauen.

G Der Ozean versauert schneller als je zuvor in den vergangenen Millionen von Jahren [Große Gewissheit].

Ihr hohes Tempo macht die heutige, von Menschen verursachte Versauerung in der geologischen Geschichte unseres Planeten zu einem singulären Ereignis.

Eine Analyse zur Ozeanversauerung der vergangenen 300 Millionen Jahre unterstreicht die nie dagewesene Geschwindigkeit der aktuellen Versauerung³¹. Am ehesten vergleichbar ist ein Ereignis vor 55 Millionen Jahren, das mit einem Massenaussterben kalkbildender Tiefsee-Organismen und deutlichen Veränderungen im Ökosystem der Deckschicht in Verbindung gebracht wird³¹. Zu jener Zeit änderte sich der pH-Wert des Ozeans rasant – jedoch vermutlich zehnmals langsamer als aktuell³².

S Die Folgen von CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen auf Ozeanversauerung werden über Jahrhunderte nachwirken [Sehr große Gewissheit].

Der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre steigt zu schnell an, um von natürlichen Rückkoppelungen wie der Auflösung von Tiefsee-Karbonaten – dies geschieht in Zeiträumen von tausenden Jahren – oder der Verwitterung von Karbonaten an Land und Silikatgesteinen – dies dauert mehrere zehn oder hundert Jahrtausende – ausgeglichen zu werden.

Auf der Basis von Szenarien zum CO₂-Gehalt in der Atmosphäre können globale Veränderungen in der Meerwasserchemie sehr genau vorausgerechnet werden. Selbst wenn die von Menschen verursachten CO₂-Emissionen heute gestoppt würden, würde der pH-Wert des Ozeans jahrhundertlang nicht das vorindustrielle Niveau erreichen³³.

S Kohlendioxid-Emissionen zu reduzieren, verlangsamt den Prozess der Versauerung [Sehr große Gewissheit].

Die Konzentration des atmosphärischen CO₂ betrug 2013 im weltweiten Durchschnitt etwa 395 parts per million (ppm), was den vorindustriellen Wert von 280 ppm um mehr als 40 Prozent übersteigt. Die Hälfte dieser Zunahme ist in den vergangenen 33 Jahren aufgetreten³⁴. Wenn die CO₂-Emissionen reduziert werden, wird weniger CO₂ in den Ozean gelangen und das Ausmaß der Folgen der Ozeanversauerung begrenzt³³.

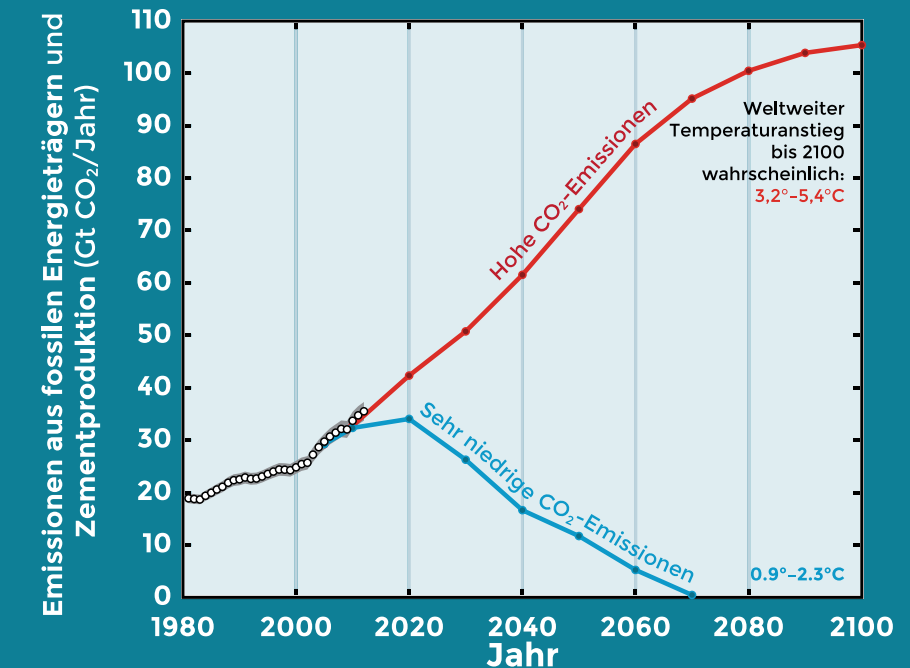
Die Reduzierung der CO₂-Emissionen ist mit bestehenden oder hierfür entwickelten Technologien möglich. Derzeit gibt es Vereinbarungen zur Stabilisierung der CO₂-Emissionen, welche den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf 2°C über dem vorindustriellen Niveau begrenzen. Diese Werte können immer noch die Stabilität einiger Meeresökosysteme gefährden. Aktuelle Emissions-Pfade zeigen einen viel stärkeren globalen Temperaturanstieg (siehe Kasten).

Zukünftige CO₂-Emissionen: Repräsentative Konzentrationspfade

Entwicklungspfade für zukünftige Emissionen bezeichnet die Sachverständigengruppe über Klimaänderungen (IPCC) in ihrem Fünften Sachstandsbericht¹ als „Repräsentative Konzentrationspfade“ (Representative Concentration Pathways, RCPs). Viele Szenarien könnten einen bestimmten Pfad erzeugen. Der höchste RCP (8,5 Wm⁻² Strahlungsantrieb) wird bei hohen Emissionswerten eingeschlagen („business as usual“, Fortsetzung des Gewohnten). Dieser Pfad führt zu einer globalen Erwärmung bis 2100 um etwa 4,3°C im Vergleich zu prä-industriellen Temperaturen (Wahrscheinlichkeits-Spektrum 3,2-5,4°C). Der niedrigste RCP (2,6 Wm⁻² Strahlungsantrieb) erfordert deutliche Emissionsreduktionen und würde zu globalen Durchschnittstemperaturen von etwa 1,6°C (Wahrscheinlichkeits-Spektrum 0,9°C-2,3°C) über dem prä-industriellen Niveau führen.

Globale Folgen für den Ozean

Sofern Emissionen wie bisher andauern (RCP 8,5), würde die Ozeanversauerung so weit ansteigen, dass in hundert Prozent der oberen Schichten tropischer Ozeane bis 2100 keine wachstumsfördernden Bedingungen für Korallenriffe



mehr bestehen. Weitreichende Reduzierungen (RCP 2,6) würde diese Verluste um die Hälfte verringern (persönliche Kommunikation, Joos und Steinacher^{10,11}). Bis 2100 könnten 60 Prozent der Oberfläche korrosiv für die Schalen aragonitischer Organismen werden – einem Teil der marinen Nahrungskette. Mit einer starken Emissionsreduzierung (RCP 2,6) könnten diese korrosiven Bedingungen in größten Teilen des Südpolarmeers umgangen werden (persönliche Kommunikation, Joos und Steinacher¹⁰).

Globale CO₂-Emissionen (weiß gepunktet, Unsicherheiten in grau) aus der Nutzung fossiler Energieträger folgen dem Pfad hoher Emissionen (rote Linie, RCP 8,5), der Vorhersagen zufolge zu einer deutlichen weltweiten Erwärmung führt. Umfangreiche und anhaltende Emissionsreduktionen (blaue Linie, RCP 2,6) sind nötig, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, das Zwei-Grad-Ziel zu erreichen, auf das sich die Politik geeinigt hat.

Quelle: Glen Peters und Robbie Andrew, CICERO und das Global Carbon Project, nach Peters et al., 2013⁸. Historische Daten vom Carbon Dioxide Information Analysis Center.

Wie werden die Meereslebewesen reagieren?

Der Großteil des verfügbaren Wissens über die Reaktionen von Tieren und Pflanzen auf Ozeanversauerung stammt aus relativ kurzen Laborversuchen mit einzelnen Arten. Diese Experimente vereinfachen zwar die natürlichen Verhältnisse, liefern aber Anhaltspunkte für mögliche Auswirkungen im Ozean²⁸.

In einer steigenden Anzahl von Labor- und Feldstudien werden mehrere Arten gemeinsam untersucht, etwa in natürlicherweise saureren Ökosystemen oder in Mesokosmen mit natürlichen, artenreichen Lebensgemeinschaften.

Die Ergebnisse eines breiten Spektrums mariner Organismen zeigen verschiedenartige Reaktionen, darunter verringerte Überlebens-, Kalzifizierungs-, Wachstums- oder Entwicklungsraten sowie geringere Abundanz. Empfindlichkeit und Toleranz gegenüber Ozeanversauerung einzelner Meereslebewesen unterscheiden sich stark – manchmal sogar bei verschiedenen Klonen derselben Art. Andere Organismen sprechen positiv auf die gesteigerte Verfügbarkeit von CO₂ an. Aktivere Tiere wie nicht-sesshafte Krustentiere oder Fische scheinen im Hinblick auf Ozeanversauerung weniger sensibel zu sein. Einigen Algen- und Phytoplankton-Arten sowie Seegräsern könnte der zusätzliche Kohlenstoff gut tun. Die Auswirkungen auf einzelne Arten – einerlei, ob sie verlieren oder profitieren – können eine Kettenreaktion über die Nahrungskette hinweg auslösen.

M Von Menschen verursachte Ozeanversauerung wird viele kalzifizierende Organismen beeinträchtigen [Mittlere Gewissheit].

Die meisten Studien belegen, dass Kalzifizierung – die Fähigkeit von Organismen, Schalen oder Skelette zu bilden – mit der Ozeanversauerung abnimmt²⁹. Hierzu gehören planktische Kalzifizierer (z.B. Foraminiferen, Coccolithophoriden und Flügelschnecken), Korallen und Weichtiere oder auch Stachelhäuter (z.B. Seeigel) sowie in geringerem Maße Krustentiere (z.B. Krebse).

Eine Analyse von Studien zur Ozeanversauerung zeigt, dass viele kalkbildende Organismen auch einen Rückgang im Wachstum, in der Überlebensrate, der Entwicklung und der Abundanz²⁹ aufweisen. Viele kalzifizierende Gruppen reagieren in ihren frühen Lebensstadien besonders empfindlich auf CO₂-induzierte Veränderungen in der Meerwasserchemie. Krustentiere sind weniger betroffen als Korallen, Weichtiere oder Stachelhäuter.

G Weichtiere (wie Muscheln, Austern und Flügelschnecken) gehören zu einer der Gruppen, die am empfindlichsten auf Ozeanversauerung reagieren [Große Gewissheit].

Frühe Lebensstadien vieler Weichtiere (Larven und Jungtiere) sowie ausgewachsene Individuen haben reduzierte Kalzifizierungs-, Wachstums- und Überlebensraten gezeigt. Dies macht die Weichtiere zu einer der Gruppen, die am empfindlichsten auf Ozeanversauerung reagieren¹⁴.

M Die Schalen von Flügelschnecken lösen sich bereits auf [Mittlere Gewissheit].

Die Meere in den hohen Breiten werden schon jetzt für einige Arten korrosiv. Die Schalen der Flügelschnecken, einer Schlüsselart im Nahrungsnetz, lösen sich in einigen Bereichen des Südpolarmeers bereits auf³⁵. Diese winzigen Tiere sind für das Nahrungsgefüge in der Arktis und Antarktis besonders wichtig. Sie stellen beispielsweise eine entscheidende Futterquelle für den Buckellachs dar³⁶.

G Sofern die CO₂-Emissionen im jetzigen Ausmaß fortgesetzt werden, werden Korallenriffe noch in diesem Jahrhundert schneller erodieren als sie wachsen [Große Gewissheit].

Mit der derzeitigen Entwicklung der CO₂-Emissionen könnte allein die Ozeanversauerung das Wachstum der Korallenriffe bis zum Ende des 21. Jahrhunderts beenden³⁷. Wenn zusätzlich die Auswirkungen der Korallenbleiche aufgrund des Temperaturanstiegs im Ozean mitberücksichtigt werden, könnte die Erosion der meisten Riffe schneller vonstatten gehen als das Wachstum durch Korallen und andere Organismen. Dies könnte der Fall sein, sobald der CO₂-Anteil 560 ppm erreicht – unter dem jetzigen Entwicklungspfad der Emissionen bis Mitte des Jahrhunderts³⁸. Sofern dies passiert, würden der Abbau und der Verlust der Korallenriffe ganze Ökosysteme treffen, die auf Riffen als Habitat basieren, und Konsequenzen für Artenvielfalt, Fischerei und Küstenschutz mit sich bringen. Energische Reduzierungen der CO₂-Emissionen sind nötig, um einen Großteil der tropischen Korallenriffe zu bewahren und die Wasserbedingungen so zu erhalten, dass sie das Wachstum begünstigen¹¹.

G Kaltwasserkorallen-Gemeinschaften sind bedroht [Große Gewissheit] **und könnten nicht zu erhalten sein.**

Es wird erwartet, dass bis 2100 70 Prozent der Kaltwasserkorallen korrosiven Bedingungen ausgesetzt sein werden – einige werden sogar schon um 2020 in untersättigtem Wasser leben³⁹. Untersättigung begünstigt die Auflösung toter Skelette, die die Basis von Korallen-Gemeinschaften in der Tiefsee bilden. Dies wird zum Verfall der Kaltwasserkorallen-Ökosysteme führen^{40,41}. Da sie vielen Tiefsee-Organismen Lebensraum, Futterplätze und Kinderstube liefern, hätte ihr Verlust Konsequenzen für ganze Nahrungsnetze⁴².

Ozeanchemie für Schalen- und Skelettaufbau

Im Ozean reagiert Kohlendioxid mit Meerwasser und Karbonat-Ionen zu Hydrogenkarbonat. Ein erhöhter CO₂-Anteil verringert die Konzentration der Karbonat-Ionen. Die Schalen vieler mariner Organismen sind aus Kalziumkarbonat gemacht, das hauptsächlich in zwei Formen vorkommt: Kalzit und Aragonit. Beide Minerale lösen sich bei geringer Konzentration an Karbonat-Ionen – bezeichnet als „untersättigte Bedingungen“ – auf, sofern kalzifizierende Organismen keine Mechanismen entwickelt haben, um dies zu verhindern. Dies können eine Schutzschicht oder andere Mittel sein, die verhindern, dass die Kalk-Strukturen dem korrosiven Wasser ausgesetzt werden⁴³. Aragonit wird von den meisten Korallen, den ersten Larvenstadien vieler und einiger ausgewachsener Weichtiere (etwa den Flügelschnecken) gebildet. Es ist leichter löslich als Kalzit, das von Coccolithophoriden, Foraminiferen, Stachelhäutern und Krustentieren produziert wird.

Die Einheit für den Sättigungsgrad des Meerwassers mit Kalziumkarbonat ist Omega (Ω). $\Omega < 1$ bezeichnet untersättigtes

(korrosives) und $\Omega > 1$ übersättigtes Wasser.

In einem saurer werdenden Ozean lassen das Wachstum von Skeletten und Schalen deutlich nach, weil die Sättigung nachlässt. Beispielsweise profitiert das Wachstum von Korallen von einer hohen Sättigung mit Aragonit von mehr als 3 ($\Omega > 3$).

Bedingungen in der Tiefe

Tiefere Wasserschichten enthalten von Natur aus mehr CO₂ und haben einen niedrigeren pH Wert als die oberen Schichten. Außerdem sinkt die Sättigung mit Aragonit und Kalzit mit steigendem Druck. Die Grenze zwischen diesen tieferen untersättigten Regionen und dem höherliegenden gesättigten Wasser wird als „Sättigungshorizont“ bezeichnet.

Der Sättigungshorizont für Aragonit wird zunehmend flacher, sodass sich korrosive Bedingungen für schalenbildende Organismen immer weiter Richtung Wasseroberfläche ausbreiten.

Dieser Prozess ist auf globalem Niveau gut verstanden und dokumentiert. Auf dem RCP 8,5 (vgl. S.15) wird der Sättigungshorizont im Nordpazifik, in der Arktis und im Südpolarmeer bis zum Ende dieses Jahrhunderts die Deckschicht des Ozeans erreicht haben.

In Auftriebsgebieten wie im nordöstlichen Pazifik und an den Westküsten Südamerikas und Afrikas strömen natürlicherweise saurere Tiefenwasser auf die Kontinentalhänge. Die Aufnahme von anthropogenem CO₂ in den Ozean hat das Ausmaß dieser durch saurere Wassermassen betroffenen Gebiete vergrößert⁴⁵ – einige von ihnen sind wichtige Fischereigründe.



M Ozeanversauerung könnte sich direkt auf die Physiologie, das Verhalten und die Gesundheit von Fischen auswirken [Mittlere Gewissheit].

Die Ansammlung von CO₂ in Tierkörpern könnte Lebensprozesse stören und dadurch übergreifende Veränderungen in der Gesundheit oder Fitness hervorrufen^{46,47}. Allgemein betrachtet scheinen Fische weniger anfällig für Ozeanversauerung zu sein als sesshaftere Organismen. Ozeanversauerung hat zu einer reduzierten Wachstumsrate bei Fischlarven geführt⁴⁸.

Es gibt Belege dafür, dass sich das Verhalten von Clownfischen ändert (Geruchssinn, Gehör, optische Wahrnehmung von Gefahr usw.). So können diese Bewohner von Korallenriffen Räuber und Beute schlechter erkennen⁴⁹. Langzeit-Folgen sind unklar, da geologische Archive anders als bei anderen Lebewesen bei Fischen nicht auf Empfindlichkeiten gegenüber Ozeanversauerung hinweisen.

Insgesamt hat der Wandel in der Nahrungsverfügbarkeit wahrscheinlich deutlichere Auswirkungen auf das Vorkommen von Fischen als direkte physiologische Schädigungen.

G Einige Seegras- und Phytoplankton-Arten könnten von der Ozeanversauerung profitieren [Große Gewissheit].

Erhöhte CO₂-Mengen scheinen die Photosynthese und das Wachstum einiger Organismengruppen zu stimulieren. Hierzu gehören einige Seegräser, Makroalgen und einige Phytoplankton-Gruppen (z.B. Cyanobakterien und Piko-Eukaryoten)⁵⁰. Beobachtungen in Meeresgebieten mit natürlichen CO₂-Quellen (z.B. nahe der Insel Ischia in Italien) zeigen, dass einige Wasserpflanzen in saurerem Wasser besonders gut gedeihen⁵¹.

G Die Kombination von Ozeanversauerung und erhöhten Temperaturen schädigt viele Lebewesen [Große Gewissheit].

Ozeanversauerung scheint die Temperaturtoleranz einiger Organismen einzuschränken⁵⁶ - andere reagieren vor allem in wärmerem Wasser empfindlich auf Ozeanversauerung. Die Reaktion auf eine Kombination beider Faktoren ist oftmals ausgeprägter als auf einen Stressor allein⁵². Studien zeigen einen Trend zur Verringerung von Überleben, Wachstum und Entwicklung, wenn erhöhte Temperaturen und Ozeanversauerung gleichzeitig auftreten. Die Kombination kann zu Verschiebungen in der Artenvielfalt und der Zusammensetzung von Ökosystemen durch Schrumpfung von Habitaten führen.

Warmwasserkorallen sind in Zeiten ungewöhnlich hoher Temperaturen anfällig für Bleiche. Seit 1979 waren mehrere Massenbleichen zu verzeichnen, die weltweit zum Absterben von Warmwasserkorallen geführt haben⁵³. Tropische Korallenriffe sind besonders durch die kombinierten Effekte von Erwärmung und Ozeanversauerung gefährdet.

Wie werden marine Ökosysteme reagieren?

G Die unterschiedlichen Reaktionen von Arten auf die Ozeanversauerung werden wahrscheinlich Veränderungen in marinen Ökosystemen hervorrufen [Große Gewissheit], aber das Ausmaß der Folgen ist schwierig vorherzusagen.

Wir wissen, dass einige Lebewesen, etwa Seegräser und einige Phytoplankton-Arten, unter saureren Bedingungen besser gedeihen, während andere, Korallen oder Schalentiere, geschädigt werden. Diese unterschiedlichen Empfindlichkeiten lösen wahrscheinlich – in Verbindung mit anderen Stressoren wie der globalen Erwärmung – Veränderungen in der Zusammensetzung der Arten aus, sodass Räuber geänderte Nahrungsquellen vorfinden. Unsere Fähigkeit, diesen Wandel und dessen Folgen vorherzusagen, ist durch viele Unsicherheiten eingeschränkt. Aber Wissenschaftler sind sich weitgehend einig darüber, dass die Veränderungen wahrscheinlich einschneidend sein werden⁵⁴.

Folgende Wissenslücken sind zu schließen: Wie werden verschwundene Arten ersetzt? Bleibt die Rolle einer ersetzten Art im Ökosystem dieselbe? Was werden die Konsequenzen für die Ökosysteme sein? Wie wird dies biogeochemische Kreisläufe beeinflussen, auf denen das Leben beruht? Werden sich einige Arten rechtzeitig anpassen können (vgl. Kasten)? Gibt es Übertragungseffekte von einer Generation zur nächsten?

Obwohl die Erforschung der Ozeanversauerung rasch fortgeschritten ist, sind Wissenschaftler noch nicht in der Lage, belastbare Prognosen für Auswirkungen auf marine Lebensgemeinschaften abzugeben. Wie ganze Ökosysteme auf Ozeanversauerung reagieren, ist daher ein Forschungsbereich, der vorrangig berücksichtigt wird. Laborstudien und Untersuchungen einzelner Arten können nicht einfach auf das gesamte Ökosystem übertragen werden. Dennoch existieren genügend Nachweise, anhand derer Wissenschaftler einige vorläufige Schlussfolgerungen mit verschieden großer Gewissheit ziehen können.

Anpassung

Akklimatisation ist die Fähigkeit eines einzelnen Lebewesens, sich an Umweltveränderungen anzupassen. Sie kann über das Leben des Organismus hinweg verteilt zu verschiedenen Zeitpunkten stattfinden. Die Reaktionen, die normalerweise reversibel sind, erlauben es dem Organismus, unter einer Bandbreite von Umweltbedingungen zu existieren.

Adaption ist die evolutive Reaktion einer Population auf eine gewandelte Umwelt über mehrere Generationen hinweg. Das Potenzial für evolutive Anpassung ist bei Arten mit kurzen Generationszeiten und großen Populationszahlen besonders ausgeprägt.

Für einige kurzlebige Mikroorganismen wurde die evolutive Anpassung an Ozeanversauerung experimentell bewiesen, darunter kalkbildende Mikroalgen (Coccolithophoriden)⁵⁵. Mitglieder dieser Gruppe besitzen eine große genetische Vielfalt, kurze Generationszeiten von einem Tag oder weniger und gewaltige Populationsgrößen von bis zu einer Million Zellen pro Liter Meerwasser. Demgegenüber könnte es Lebewesen mit längeren Generationszeiten wie Korallen schwerfallen, mit der Stärke und der Geschwindigkeit Schritt zu halten, mit der Ozeanversauerung in diesem Jahrhundert auftritt.

Kurzzeit-Experimente zur Reaktion einer Art auf Umweltveränderungen lassen in der Regel keine Rückschlüsse auf Anpassungsprozesse zu. Die dabei beobachteten Reaktionen könnten daher dazu führen, dass die langfristige Empfindlichkeit natürlicher Populationen gegenüber Umweltveränderungen überschätzt wird. Dennoch lässt das geologisch belegte Massenaussterben zu Zeiten, in denen Ozeanversauerung deutlich langsamer ablief als heute, vermuten, dass die Evolutionsraten einiger Arten nicht schnell genug sind, als dass sie sich an die vielfältigen Veränderungen anpassen können, die für den Ozean der Zukunft erwartet werden, anpassen zu können [Große Gewissheit].



G Multiple Stressoren verschlimmern die Auswirkungen von Ozeanversauerung [Große Gewissheit].

Die Probleme, die Organismen durch Ozeanversauerung bevorstehen, werden oft noch durch andere Belastungen vergrößert – etwa durch steigende Temperaturen⁵⁶, Verlust von Sauerstoff, zunehmende Schichtungsstabilität (verringerte Durchmischung)^{9,57}, Raubbau, Verschmutzung, Extremereignisse, zunehmende Strahlungsstärke durch Ozonabbau in der Stratosphäre⁵⁸ oder Änderungen im Salzgehalt. Einige dieser Stressoren werden ebenfalls durch das Übermaß an CO₂ in der Atmosphäre ausgelöst.

Global betrachtet verringert eine stärker ausgeprägte Stratifizierung die Produktivität in den niederen Breiten, wo Nährstoffe begrenzt verfügbar sind. Außerdem sind große Bereiche dieser Region bei steigenden Temperaturen durch Sauerstoffrückgang bedroht. Die Auswirkungen einer Kombination von Ozeanversauerung und Sauerstoffmangel könnten weitreichende Konsequenzen für die Biogeochemie des Ozeans haben, beispielsweise könnten größere „Todeszonen“ entstehen oder die marine Denitrifikation und die anaerobe Ammonium-Oxidation zunehmen – zwei Prozesse, bei denen molekularer Stickstoff entsteht. Dies könnte den marinen Stickstoffkreislauf beeinträchtigen^{9,57}. Veränderungen in den Tiefen der Ozeane infolge von Versauerung sind bisher wenig erforscht.

N Ozeanversauerung wird globale biogeochemische Kreisläufe verändern [Niedrige Gewissheit].

Eine sich wandelnde Zusammensetzung des marinen Ökosystems und der Karbonat-Chemie beeinträchtigt biogeochemische Kreisläufe in komplexer Weise. Einige Organismen werden unter Ozeanversauerung besser gedeihen, andere werden zu kämpfen haben. Veränderungen im Phytoplankton und Zooplankton werden für Räuber zu spüren sein, die auf diese Organismen als Futter angewiesen sind. Ozeanversauerung könnte auch die Produktion des starken Treibhausgases Distickstoffoxid (Lachgas) oder des klimakühlenden Gases Dimethylsulfid (DMS) beeinflussen. Wir müssen die Reaktionen des Ökosystems auf Ozeanversauerung und deren Auswirkungen auf die Kreisläufe wichtiger Nährstoffe verstehen, um die Vorhersagekraft globaler Modelle bezüglich biogeochemischer Veränderungen zu verbessern⁵⁹.

M Ozeanversauerung könnte die Stickstofffixierung durch einige Cyanobakterien stimulieren [Mittlere Gewissheit].

Es gibt Belege dafür, dass Ozeanversauerung die Stickstofffixierung einiger Cyanobakterien stimuliert⁵⁴. Durch diesen Prozess wird Stickstoffgas in eine biologisch verwertbare Form gewandelt – eine wichtige Nährstoffzufuhr für den Ozean. Dies könnte Folgen für den Stickstoff-Kreislauf und die Produktivität der Ozeane haben, die in weiten Bereichen stickstofflimitiert sind.

Referenzen

1. IPCC, 2013. *Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers*, www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf
2. The Royal Society, 2005. *Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide*. The Royal Society, London.
3. Billé, R., Kelly, R., Biastoch, A., Harrould-Kolieb, E., Herr, D., Joos, F., Kroeker, K., Laffoley, D., Oschlies, A., Gattuso, J.-P., 2013. Taking action against ocean acidification: a review of management and policy options. *Environmental Management* 52:761–779, doi:10.1007/s00267-013-0132-7.
4. Pandolfi, J.M., Connolly, S.R., Marshall, D.J., Cohen, A.L., 2011. Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification. *Science* 333(6041):418–422, doi:10.1126/science.1204794.
5. Rau, G.H., McLeod, E.L., Hoegh-Guldberg, O., 2012. The need for new ocean conservation strategies in a high-carbon dioxide world. *Nature Climate Change* 2:720–724, doi:10.1038/nclimate1555.
6. US National Research Council, 2001. *Marine Protected Areas: Tools for Sustaining Ocean Ecosystems*. The National Academies Press, Washington, D.C.
7. Hassellöv, I.-M., Turner, D.R., Lauer, A., Corbett, J.J., 2013. Shipping contributes to ocean acidification. *Geophysical Research Letters* 40:2731–2736, doi:10.1002/grl.50521.
8. Peters, G.P., Andrew, R.M., Boden, T., Canadell, J.G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M.R., Wilson, C., 2013. The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change* 3:4–6, doi:10.1038/nclimate1783.
9. Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J.C., Doney, S.C., Dunne, J.P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Seferian, R., Tjiputra, J., Vichi, M., 2013. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10:6225–6245.
10. Steinacher, M., Joos, F., Stocker, T.F., 2013. Allowable carbon emissions lowered by multiple climate targets. *Nature* 499(7457):197–201, doi:10.1038/nature12269.
11. Ricke, K.L., Orr, J.C., Schneider, K., Caldeira, K., 2013. Risks to coral reefs from ocean carbonate chemistry changes in recent earth system model projections. *Environmental Research Letters* 8:034003, doi:10.1088/1748-9326/8/3/034003.
12. www.pmel.noaa.gov/co2/story/International+OA+Observing+Network
13. Turley, C., Boot, K., 2011. The ocean acidification challenges facing science and society. In Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.
14. Wittmann, A.C., Pörtner, H.-O., 2013. Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nature Climate Change* doi:10.1038/nclimate1982.
15. FAO, 2012. *Fisheries and Aquaculture Statistics 2010*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
16. Cesar, H.J.S., Burke, L., Pet-Soede, L., 2003. *The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation*. Cesar Environmental Economics Consulting, Arnhem, and WWF-Netherlands, Zeist, The Netherlands. 23 pp. Online at: <http://assets.panda.org/downloads/cesardegradationreport100203.pdf>.
17. Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neil, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253–260.
18. Le Quéré, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T.J., Doney, S.C., Feely, R.A., Foster, P., Friedlingstein, P., Gurney, K., Houghton, R.A., House, J.I., Huntingford, C., Levy, P.E., Lomas, M.R., Majkut, J., Metzl, N., Ometto, J.P., Peters, G.P., Prentice, I.C., Randerson, J.T., Running, S.W., Sarmiento, J.L., Schuster, U., Sitoh, S., Takahashi, T., Viovy, N., van der Werf, G.R., Woodward, F.I., 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience* 2:831–836, doi:10.1038/ngeo689.
19. Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T., Rios, A.F., 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305(5682):367–371, doi:10.1126/science.1097403.
20. Narita, D., Rehdanz, R., Tol, R.S.J., 2012. Economic costs of ocean acidification: a look into the impacts on global shellfish production. *Climatic Change* 113:1049–1063, doi: 10.1007/s10584-011-0383-3.
21. Cooley, S.R., Doney, S.C., 2009. Anticipating ocean acidification's economic consequences for commercial fisheries. *Environmental Resource Letters* 4:024007, doi:10.1088/1748-9326/4/2/024007.
22. Barton, A., Hales, B., Waldbusser, G.G., Langdon, C., Feely, R.A., 2012. The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects. *Limnology and Oceanography* 57(3):698–710, doi:10.4319/lo.2012.57.3.0698.
23. Waldbusser, G.G., Brunner, E.L., Haley, B.A., Hales, B., Langdon, C.J., Prahl, F.G., 2013. A developmental and energetic basis linking larval oyster shell formation to acidification sensitivity. *Geophysical Research Letters* 40:2171–2176, doi:10.1002/grl.50449.
24. Brander, L.M., Rehdanz, K., Tol, R.S.J., Van Beukering, P.J.H., 2012. The economic impact of ocean acidification on coral reefs. *Climate Change Economics* 3(1):1250002, doi:10.1142/S2010007812500029.
25. Atweberhan, M., Feary, D.A., Keshavmurthy, S., Chen, A., Schleyer, M.H., Sheppard, C.R., 2013. Climate change impacts on coral reefs: Synergies with local effects, possibilities for acclimation, and management implications. *Marine Pollution Bulletin* 74:526–539, doi:10.1016/j.marpolbul.2013.06.011.
26. FAO, 2010. *State of World Fisheries and Aquaculture, 2010*. FAO Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
27. Cooley, S.R., Lucey, N., Kite-Powell, H., Doney, S.C., 2012. Nutrition and income from molluscs today imply vulnerability to ocean acidification tomorrow. *Fish and Fisheries* 13:182–215, doi:10.1111/j.1467-2979.2011.00424.x.

28. Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), 2011. *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.
29. Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., Gattuso, J.-P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology* 19:1884–1896, doi: 10.1111/gcb.12179.
30. Mastrandrea, M.D., Field, C.B., Stocker, T.F., Edenhofer, O., Ebi, K.L., Frame, D.J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K.J., Matschoss, P.R., Plattner, G.-K., Yohe, G.W., Zwiers, F.W., 2010. *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Available at www.ipcc.ch.
31. Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D.N., Thomas, E., Gibbs, S.J., Sluijs, A., Zeebe, R., Martindale, R.C., Greene, S.E., Kiessling, W., Ries, J., Zachos, J.C., Royer, D.L., Barker, S., Marchitto Jr., T.M., Moyer, R., Pelejero, C., Ziveri, P., Foster, G.L., Williams, B., 2012. The geological record of ocean acidification. *Science* 335(6072):1058–1063, doi:10.1126/science.1208277.
32. Ridgwell, A., Schmidt, D.N., 2010. Past constraints on the vulnerability of marine calcifiers to massive carbon dioxide release. *Nature Geoscience* 3:196–200, doi:10.1038/ngeo755.
33. Joos, F., Frölicher, T.L., Steinacher, M., Plattner, G.-K., 2011. Impact of climate change on ocean acidification projections. In Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.
34. GLOBALVIEW-CO₂: Cooperative Atmospheric Data Integration Project - Carbon Dioxide. NOAA ESRL, Boulder, Colorado [Available at www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/globalview/], 2012.
35. Bednarek, N., Tarling, G.A., Bakker, D.C.E., Fielding, S., Jones, E.M., Venables, H.J., Ward, P., Kuzirian, A., Leze, B., Feely, R.A., Murphy, E.J., 2012. Extensive dissolution of live pteropods in the Southern Ocean. *Nature Geoscience* 5(12):881–885, doi:10.1038/ngeo1635.
36. Armstrong, J.L., Boldt, J.L., Cross, A.D., Moss, J.H., Davis, N.D., Myers, K.W., Walker, R.V., Beauchamp, D.A., Halderson, L.J., 2005. Distribution, size, and interannual, seasonal and diel food habits of northern Gulf of Alaska juvenile pink salmon, *Oncorhynchus gorbuscha*. *Deep-Sea Research (Part II, Topical Studies in Oceanography)* 52:247–265.
37. Fabricius, K.E., Langdon, C., Uthicke, S., Humphrey, C., Noonan, S., De'ath, G., Okazaki, R., Muehllehner, N., Glas, M.S., Lough, J.M., 2011. Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Climate Change* 1(3):165–169, doi:10.1038/nclimate1122.
38. Silverman, J., Lazar, B., Cao, L., Caldeira, K., Erez, J., 2009. Coral reefs may start dissolving when atmospheric CO₂ doubles. *Geophysical Research Letters* 36:L05606, doi:10.1029/2008GL036282.
39. Guinotte, J.M., Orr, J., Cairns, S., Freiwald, A., Morgan, L., George R., 2006. Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Frontiers in Ecology and the Environment* 4:141–146.
40. Form, A., Riebesell, U., 2012. Acclimation to ocean acidification during long-term CO₂ exposure in the cold-water coral *Lophelia pertusa*. *Global Change Biology* 18:843–853.
41. Lunden, J., Georgian, S.E., Cordes, E.E., 2013. Aragonite saturation states at coldwater coral reefs structured by *Lophelia pertusa* in the northern Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography* 58(1):354–362.
42. Roberts, J.M., Wheeler, A.J., Freiwald, A., 2006. Reefs of the deep: The biology and geology of cold-water coral ecosystems. *Science* 213:543–547.
43. McCulloch, M., Falter, J., Trotter, J., Montagna, P., 2012. Coral resilience to ocean acidification and global warming through pH up-regulation. *Nature Climate Change* 2:623–627, doi:10.1038/nclimate1473.
44. Kleypas, J.A., McManus, J.W., Meñez, L.A.B., 1999. Environmental limits to coral reef development: where do we draw the line? *American Zoologist* 39(1):146–159.
45. Feely, R.A., Sabine, C.L., Hernandez-Ayon, J.M., Ianson, D., Hales, B., 2008. Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the Continental Shelf. *Science* 320(5882):1490–1492, doi:10.1126/science.1155676.
46. Fabry, V.J., Seibel, B.A., Feely, R.A., Orr, J.C., 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science* 65:414–432.
47. Pörtner, H.-O., 2012. Integrating climate-related stressor effects on marine organisms: unifying principles linking molecule to ecosystem-level changes. *Marine Ecology Progress Series* 470:273–290.
48. Baumann, H., Talmage, S.C., Gobler, C.J., 2012. Reduced early life growth and survival in a fish in direct response to increased carbon dioxide. *Nature Climate Change* 2(1):38–41.
49. Munday, P.L., Dixson, D.L., Donelson, J.M., Jones, G.P., Pratchett, M.S., Devitsina, G.V., Døving, K.B., 2009. Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(6):1848–1852.
50. Riebesell, U., Tortell, P.D., 2011. Effects of ocean acidification on pelagic organisms and ecosystems. In Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, pp. 99–121.
51. Hall-Spencer, J.M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S.M., Rowley, S.J., Tedesco, D., Buia, M.-C., 2008. Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454:96–99.
52. Harvey, B.P., Gwynn-Jones, D., Moore, P.J., 2013. Meta-analysis reveals complex marine biological responses to the interactive effects of ocean acidification and warming. *Ecology and Evolution* 3:1016–1030.
53. Hoegh-Guldberg, O., 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research* 50:839–866.
54. Gattuso, J.-P., Bijma, J., Gehlen, M., Riebesell, U., Turley, C., 2011. Ocean acidification: knowns, unknowns and perspectives. In Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.
55. Lohbeck, K.T., Riebesell, U., Reusch, T.B.H., 2012. Adaptive evolution of a key phytoplankton species to ocean acidification. *Nature Geoscience* 5:346–351, doi:10.1038/NNGEO1441.aa.
56. Pörtner, H.O., Farrell, A.P., 2008. Physiology and climate change. *Science* 322:690–692.
57. Gruber, N., 2011. Warming up, turning sour, losing breath: ocean biogeochemistry under global change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369(1943):1980–1996, doi:10.1098/rsta.2011.0003.
58. Gao, K., Helbling, E.W., Häder, D.-P., Hutchins, D.A., 2012. Response of marine primary producers to interactions between ocean acidification, solar radiation and warming. *Marine Ecology Progress Series* 470:167–189, doi:10.3354/meps10043.
59. Riebesell, U., Gattuso, J.-P., Thingstad, T.F., Middelburg, J.J., 2013. Arctic ocean acidification: pelagic ecosystem and biogeochemical responses during a mesocosm study. *Biogeosciences* 10:5619–5626.



The Ocean in a High-CO₂ World

Ocean Acidification

Third Symposium • Monterey • California • 24-27 September • 2012

Wir danken den folgenden Organisationen für finanzielle Unterstützung und Förderung durch Sachleistungen:

US National Science Foundation
Prince Albert II of Monaco Foundation
Monterey Bay Aquarium Research Institute
Monterey Bay Aquarium
Monterey Bay Sanctuary Foundation
Naval Postgraduate School
International Union for Conservation of Nature
World Commission on Protected Areas
COMPASS
UK Ocean Acidification Research Programme
Gordon and Betty Moore Foundation
US National Oceanic and Atmospheric Administration
US National Marine Sanctuaries
Blue Ocean Film Festival
Google
X-Prize

Sponsoren des Symposiums



Scientific Committee
on Oceanic Research



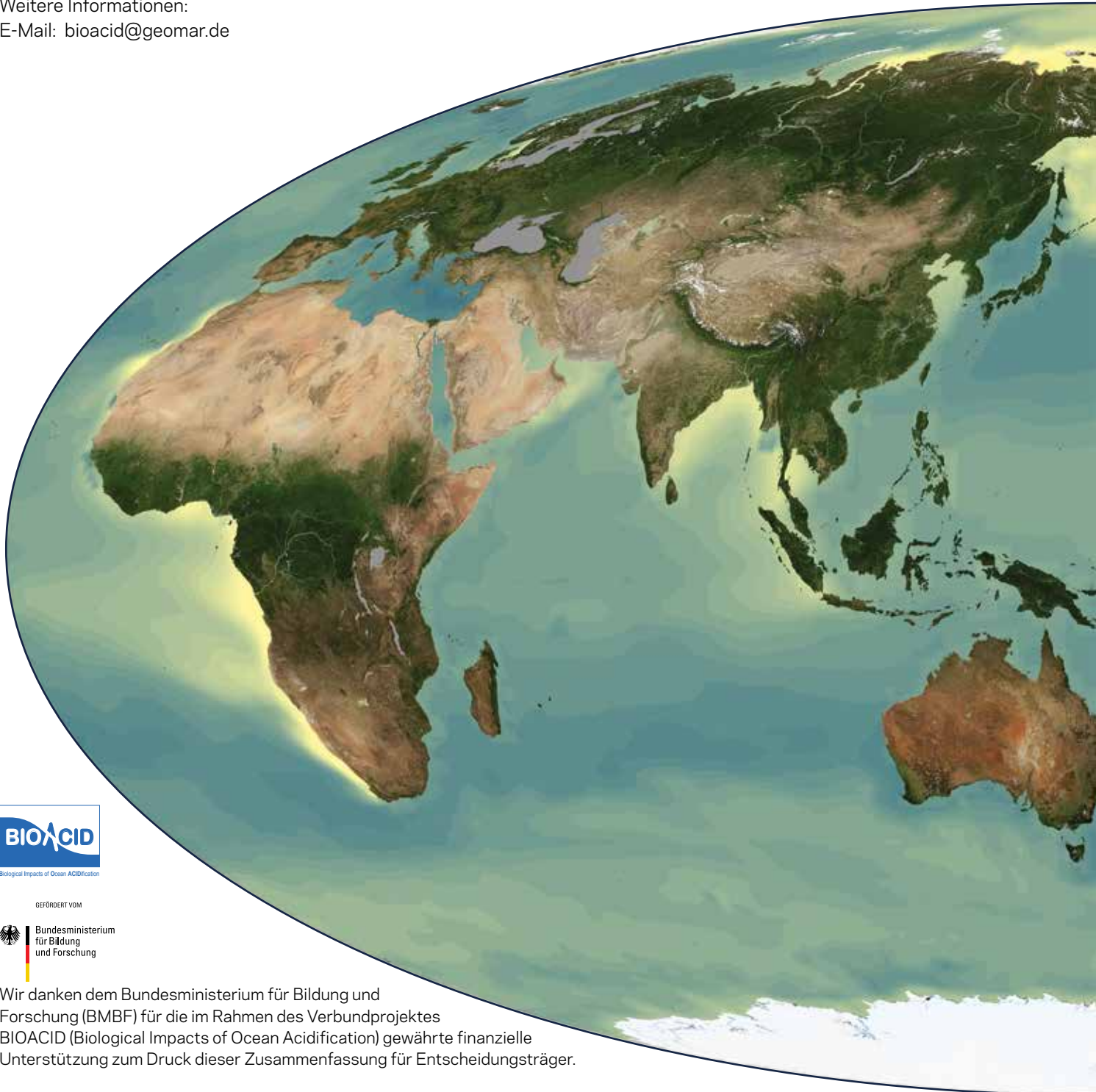
Intergovernmental
Oceanographic
Commission of UNESCO



International Geosphere-
Biosphere Programme

Diese ausführliche Version der Zusammenfassung für Entscheidungsträger ist unter www.igbp.net und www.bioacid.de sowie auf den Seiten der Sponsoren erhältlich.

Weitere Informationen:
E-Mail: bioacid@geomar.de



GEFÖRDERT VOM



Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBWF) für die im Rahmen des Verbundprojektes BIOACID (Biological Impacts of Ocean Acidification) gewährte finanzielle Unterstützung zum Druck dieser Zusammenfassung für Entscheidungsträger.



Dieses Dokument wurde mit finanzieller Unterstützung der Prince Albert II of Monaco Foundation erstellt. Für die Inhalte sind ausschließlich IGBP, SCOR und IOC verantwortlich; sie sind unter keinen Umständen als Ausdruck der Position der Prince Albert II of Monaco Foundation zu verstehen.