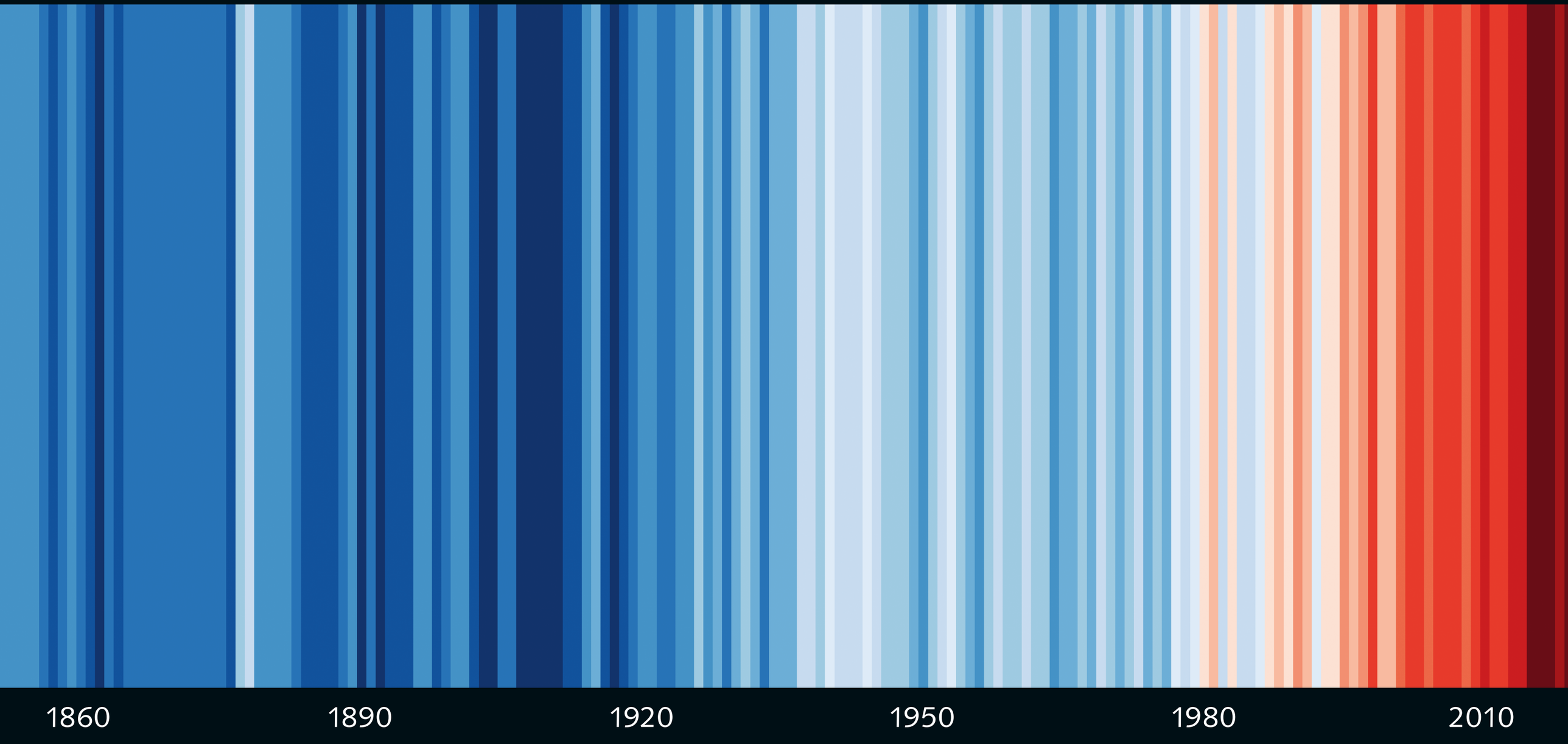
# 2 Der Ozean im Klimawandel

> Der Ozean leistet der Menschheit einen unschätzbaren Dienst. Er reguliert das Klima und bremst die globale Erwärmung, indem er einen großen Teil jener Wärme aufnimmt, die aufgrund menschengemachter Treibhausgasemissionen entsteht. Dies aber setzt großräumige Kettenreaktionen in Gang. Zum einen steigen die Wassertemperaturen und die Meeresspiegel, zum anderen verändern sich die Meeresphysik und -chemie so grundlegend, dass das Leben im Ozean aus dem Takt gerät.

## Globale Erwärmung (1850 bis 2020)



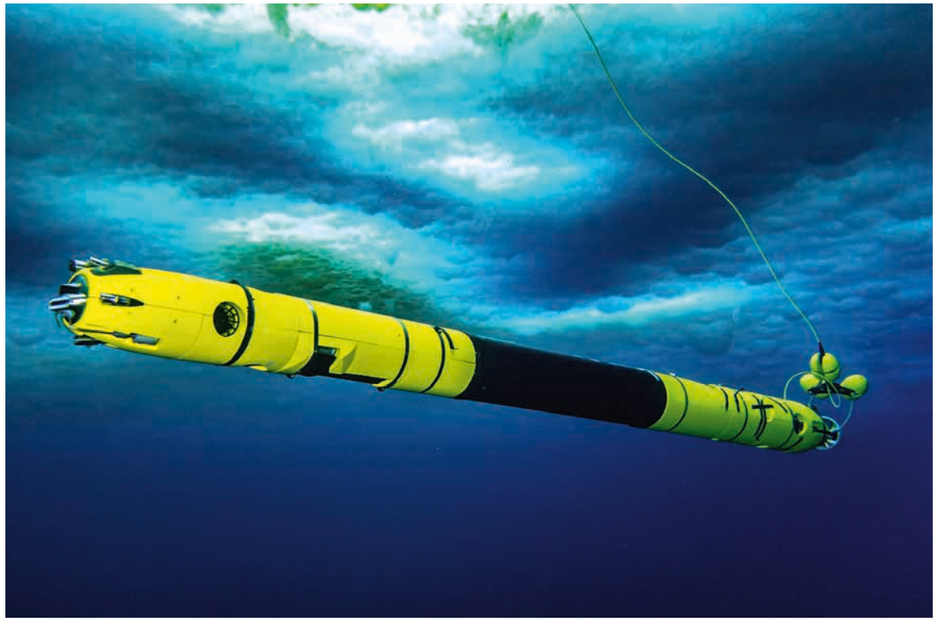
# Die fatalen Folgen der Wärme

**> In den Weltmeeren spielt sich derzeit eine große Tragödie ab. Während der Mensch mit jedem Jahr mehr Treibhausgase in die Atmosphäre entlässt und auf diese Weise einen Wärmerekord nach dem anderen produziert, wirkt der Ozean der Hitzekatastrophe entgegen. Er nimmt mehr als 90 Prozent der überschüssigen Wärme auf und speichert diese in zunehmender Tiefe. Der Preis für diesen Klimaservice aber ist hoch. Das Meer wird wärmer! Es dehnt sich aus und verliert dabei sein wertvollstes Lebenselixier – den Sauerstoff.**

## Alte Rolle, neue Detailschärfe

Die Weltmeere sind und bleiben aus mehreren Gründen einer der wichtigsten Regulatoren des Klimas auf der Erde. Sie speichern im Sommer Sonnenenergie in Form von Wärme und geben diese im Winter wieder an die Atmosphäre ab. Gleichzeitig transportieren die Meeresströmungen zu jedem Zeitpunkt Wärme von den Tropen in die hohen Breiten und verteilen sie auf diese Weise über den Erdball. Beide Effekte moderieren das Klima. Die Meere entziehen der Atmosphäre aber auch das Treibhausgas Kohlendioxid. Einen Teil davon lagern sie in der Tiefsee ein und bremsen auf diese Weise die Erderwärmung. Außerdem speisen sie den globalen Wasserkreislauf, indem an ihren Oberflächen große Wassermengen verdunsten.

Diese großen Zusammenhänge kennt man schon lang, neu ist allerdings die Detailschärfe, mit welcher die Wissenschaft das komplexe Zusammenspiel zwischen Ozean, Atmosphäre, Sonne, Eis und Schnee sowie Landoberfläche mittlerweile versteht. Den Grundstein dafür legen moderne Beobachtungssysteme, die heutzutage im Weltall, in der Luft, an Land sowie in vielen Regionen der Weltmeere zum Einsatz kommt. Satelliten erfassen das Wachsen und Schrumpfen der Eisschilde und Gletscher; sie vermessen die Oberflächentemperatur des Ozeans, die Veränderungen des Meeresspiegels, die Fläche und Dicke des Meereises in der Arktis und Antarktis und dokumentieren zudem den Salzgehalt sowie Farbe und Chlorophyllgehalt des Oberflächenwassers. Sensoren, befestigt an Schiffsrümpfen, sowie Tauchroboter, Bojen und Verankerungen erfassen saisonale und langfristige Veränderungen wichtiger Wasserparameter wie Temperatur, Salzgehalt, pH-Wert, Sauerstoff-, Nährstoff- und Chlorophyllgehalt. Ein schönes Beispiel ist das mehr als 3700 Messgeräte umfassende ARGO-Netzwerk eigenständig agierender, profilierender Drifter. Jeder dieser Roboter misst die Wassertemperatur, den Salzgehalt und in Ausnahmefällen sogar pH-Wert, Sauerstoff- und Nitrat-gehalt bis in Tiefen von 2000 Metern.



**2.1 > Mit diesem einen Meter langen und 23 Zentimeter schmalen Tauchroboter namens Icefin gelang es Wissenschaftlern erstmals, unter die schwimmende Eiszunge des westantarktischen Thwaitesgletschers zu tauchen und großflächig zu untersuchen, wie warm das Wasser an der Unterseite des Eises ist.**

Hinzu kommen hochmoderne Tauchroboter, die entweder von Propellern angetrieben werden oder monatelang durch den Ozean gleiten, mit denen die Wissenschaftler Stück für Stück in bislang unzugängliche Meeresräume vorstoßen. In der Westantarktis beispielsweise ist es britischen und US-amerikanischen Forschern im Winter 2019/2020 erstmals gelungen, die Wassermassen unter der schwimmenden Eiszunge des Thwaitesgletschers mit einem Tauchroboter zu vermessen. Die Wissenschaftler hatten dazu ein 40 Zentimeter großes Loch durch das mehr als 600 Meter dicke Schelfeis gebohrt und das torpedoförmige Messgerät an einem Seil in die Tiefe hinabgelassen. An der Eisunterseite angekommen, begann der Roboter namens Icefin eine stundenlange Erkundungsfahrt, auf der er unter anderem die Temperatur und Leitfähigkeit des Wassers dokumentierte. Seine Daten zeigten, dass das Wasser zwei Grad wärmer war als der Schmelzpunkt des Gletschereises, was erklärt, warum der Thwaitesgletscher derzeit so rasant Eis verliert.

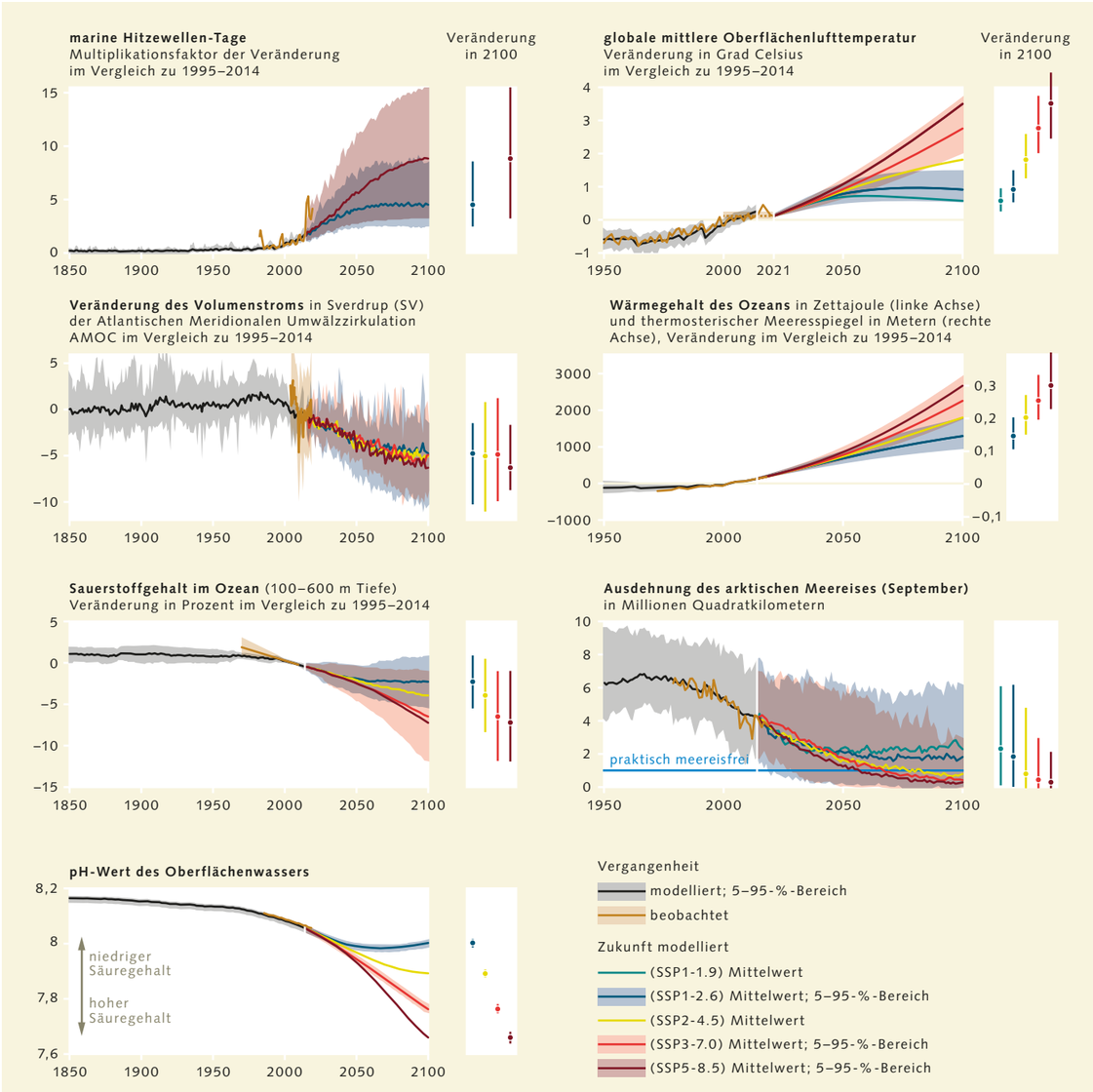
Zu einem besseren Verständnis der Rolle der Ozeane im Klimasystem der Erde trägt allerdings auch eine Vielzahl historischer, zumeist handschriftlicher Wetteraufzeichnungen (Schiffslogbücher, Seewetterberichte etc.) bei, die mittlerweile digitalisiert wurden und Lücken in Beobachtungslangzeitreihen schließen. Fortschritte gab es zudem bei der Entschlüsselung historischer Wetter- und Klimadaten aus Korallenriffen, Eisbohrkernen, See- und Meeressedimenten, aus Fossilien und anderen sogenannten natürlichen Klimaarchiven.

Außerdem stehen der Klimaforschung inzwischen Hochleistungsrechner mit einer viel größeren Speicher- und Rechenkapazität zur Verfügung. Diese Supercomputer ermöglichen es den Forschern, neue Generationen von Klima- und Erdsystemmodellen zu entwickeln, die entweder eine viel höhere räumliche Auflösung haben als die Vorgängergeneration oder aber viel mehr Komponenten (zum Beispiel Ozean, Eis, Schnee, Vegetation) und Wechselwirkungen in ihren Berechnungen berücksichtigen und somit die Komplexität des Klimas besser abbilden.

**2.2 > Der Thwaitesgletscher ist einer der am schnellsten fließenden Eisströme der Westantarktis. Er transportiert Eis aus einer Region so groß wie der US-Bundesstaat Florida Richtung Meer. Seine schmelzenden Eismassen allein verursachen vier Prozent des aktuellen Meeresspiegelanstieges.**

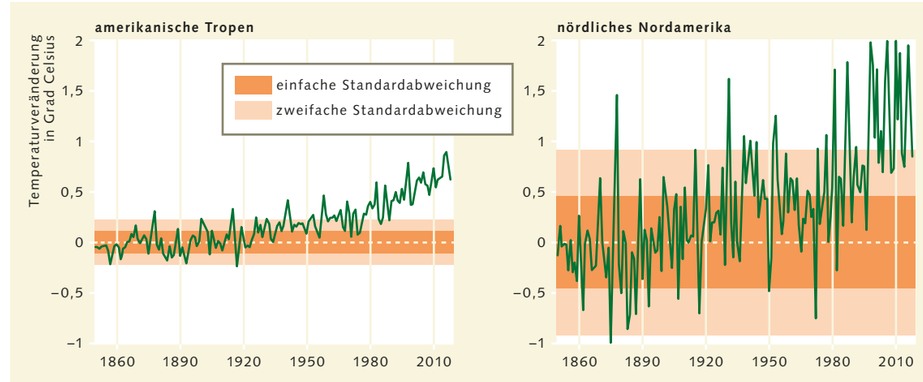
So ist die Ozeankomponente der neuesten Modellgeneration beispielsweise in der Lage, Meereswirbel darzustellen, die kaum größer sind als 100 Kilometer im Durchmesser. Außerdem werden die schnellen ozeanischen Randströme realistischer simuliert. Durch beide Fortschritte kann der Wärmetransport im Ozean besser dargestellt werden. Die Auflösung früherer Modelle hätte nicht ausgereicht, um Transportprozesse auf so kleinen Skalen abzubilden und in Klimasimulationen zu berücksichtigen. Gleiches gilt für die biogeochemischen Prozesse im Ozean oder die Darstellung von Wolken darüber. Ihre Existenz sowie die vielen mit ihnen verbundenen Wechselwirkungen können mittlerweile deutlich detailreicher in Modellen dargestellt werden.

Auf Basis dieser vielen neuen Beobachtungdaten und Klimasimulationen gelingt es der Wissenschaft heute deutlich besser, zu beschreiben, wie sich das Klima der Erde in den zurückliegenden 800 000 Jahren verändert hat, vor allem aber seit Beginn der Industrialisierung vor etwa 150 Jahren (1850 bis 1900). Es herrscht zudem eine




**2.3 > Physikalische und chemische Meeresparameter ändern sich. Für den sechsten Sachstandsbericht des IPCC wurde die künftige Entwicklung mithilfe sogenannter Shared Socioeconomic Pathways modelliert – in Türkis dargestellt für eine Welt mit sehr geringen Treibhausgas-Emissionen (SSP1-1.9), in Blau für eine Welt mit geringen Emissionen (SSP1-2.6), in Gelb mit mittleren Emissionen (SSP2-4.5) sowie in Rot und Weinrot mit hohen (SSP3-7.0) und sehr hohen Emissionen (SSP5-8.5).**






**2.4 > Obwohl die Temperaturen im Norden Amerikas stärker gestiegen sind als in den Tropen, berührt die nördliche Temperaturkurve noch immer den alten Schwankungsbereich. In den Tropen dagegen hat sie das gewohnte Niveau längst verlassen.**

größere Gewissheit darüber, was die Ursachen dieser Veränderungen sind, wie sich die Klimaveränderungen auf die Meere und den Ozean auswirken und welche Zukunftsprognosen sich mit welcher Sicherheit treffen lassen, sowohl im globalen Maßstab als auch auf regionaler Ebene.

## Ohne jeden Zweifel

Die wichtigste Erkenntnis der Klimaforschung lautet: Die Welt ist heutzutage so warm wie zu keinem anderen Zeitpunkt in den zurückliegenden 2000 Jahren und vermutlich auch noch weit darüber hinaus. Seit dem Zeitraum 1850 bis 1900 ist die globale Durchschnittstemperatur unseres Planeten um 1,1 Grad Celsius gestiegen, wobei die Erwärmung über den Kontinenten deutlich höher ausfiel als über den Meeren.

Den größten Erwärmungstrend über Land dokumentierten die Forscher in der Arktis. In der nördlichen Polarregion sind die Temperaturen in den zurückliegenden Jahrzehnten dreimal so schnell gestiegen wie in der restlichen Welt, wobei jedoch die Durchschnittstemperatur von Jahr zu Jahr stark schwankt. Die Unterschiede betragen mitunter mehr als ein Grad Celsius, was sehr viel ist. Diese Schwankungsbreite oder Temperaturvariabilität, wie Meteorologen sagen, erschwert es Wissenschaftlern, das Signal des Klimawandels klar von den natürlichen Schwankungen des Klimas – auch Klimarauschen genannt – zu unterscheiden.

Die bislang kleinsten Temperatursprünge über Land beobachten die Forscher in den Tropen. Diese Erkenntnis allein ist jedoch kein Anlass für Hoffnung, denn im Gegensatz zur Arktis fallen die Jahr-zu-Jahr-Unterschiede hier deutlich kleiner aus. Das heißt, die Temperatur steigt zwar langsam oder in kleineren Schritten, dafür bleibt sie dann aber auf Dauer über einstigen Höchstgrenzen.

Schaut man sich die Temperaturkurven der Äquatorregion genauer an, so ragt diese seit den 1980er-Jahren über den ehemaligen Schwankungsbereich hinaus. Sie hat gewissermaßen ein neues, höheres Temperaturniveau erreicht, was bedeutet, dass die Menschen in den Tropen heutzutage in einem heißeren Klima leben als ihre Vorfahren vor 100 Jahren. Klimaforscher kommen deshalb zu dem Schluss, dass die globale Erwärmung in den Tropen besonders offensichtlich ist, auch wenn der Temperaturanstieg in nackten Zahlen ausgedrückt kleiner ausfällt als in der Arktis.

Weltweit steigende Oberflächentemperaturen sind jedoch nicht der einzige Beleg dafür, dass sich das Klima der Erde verändert. Mittlerweile beobachten Wissenschaftler eine Vielzahl von Indikatoren. Die Luftmassen in der Troposphäre, der untersten Schicht der Atmosphäre, erwärmen sich und sind demzufolge in der Lage, mehr Wasserdampf zu speichern, was in vielen Regionen der Welt zu mehr Niederschlag führt. Abnehmende Temperaturunterschiede zwischen den Polen und den Tropen führen zu veränderten Luftmassenströmungen und somit zu einer Verlagerung wichtiger Windbänder in den gemä-

**ARGO-Drifter**
Als profilierende ARGO-Drifter (englisch: profiling floats) werden Messplattformen bezeichnet, die, einmal im Meer ausgesetzt, in eine Tiefe von bis zu 2000 Metern sinken und dabei die wichtigsten Parameter des umgebenden Wassers erfassen. Alle zehn Tage kehren sie an die Meeresoberfläche zurück und übertragen ihre Messdaten per Satellit. Die Daten werden innerhalb weniger Stunden für jedermann frei zur Verfügung gestellt. An dem ARGO-Beobachtungsnetzwerk sind derzeit Forschungseinrichtungen aus mehr als 40 Ländern beteiligt.

ßigten Breiten. Gleichzeitig weiten sich die subtropischen Trockenzonen aus, während in der Arktis die Fläche des arktischen Meereises in den zurückliegenden 40 Jahren um 40 Prozent geschrumpft ist.

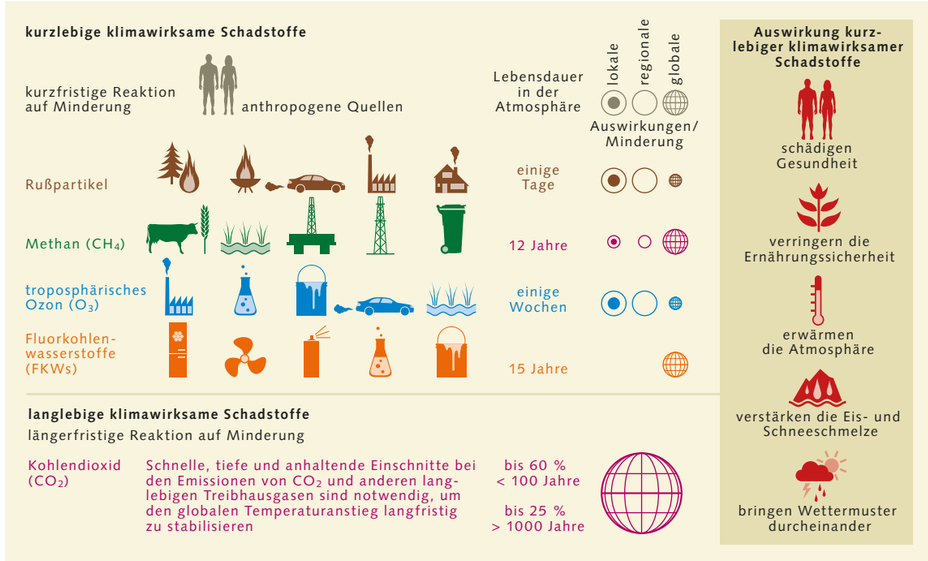
Hauptverantwortlich für diese Veränderungen ist der Mensch. Auch diese Aussage lässt sich heutzutage ohne jeden Zweifel treffen. Wichtige natürliche Klimafaktoren wie die Helligkeit der Sonne oder aber die kühlende Wirkung großer Vulkanausbrüche treten angesichts der Auswirkungen menschlichen Handelns auf der Erde in den Hintergrund. Durch das Verbrennen von Kohle, Erdöl und Erdgas setzt die Menschheit in jedem Jahr eine derart große Menge klimaschädlicher Gase wie Kohlendioxid, Methan und Lachgas (Distickstoffmonoxid) frei, dass deren Konzentration in der Atmosphäre ansteigt und sich der Treibhauseffekt verstärkt.

Für den regelmäßig erscheinenden Weltklimabericht treten Forscher immer wieder aufs Neue den Beweis an und berechnen mithilfe immer besserer Klimamodelle, inwieweit sich die Welt mit und ohne menschliches Handeln erwärmt hätte. Die Ergebnisse sprechen seit Langem eine eindeutige Sprache: Berücksichtigen die Modelle allein die natürlichen Klimatreiber wie Sonne, Vulkane, Vegetation, Ozean und andere, sind sie nicht in der Lage, die Erwärmung seit Beginn der Industrialisierung darzustellen. Eine realistische Simulation des aktuellen Klimas gelingt erst, wenn die Forscher die Daten der menschengemachten Treibhausgasemissionen hinzufügen.

In den zurückliegenden 170 Jahren hat die Menschheit schätzungsweise 2430 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre entlassen. 70 Prozent davon entstanden durch das Verbrennen von Kohle, Erdöl und Erdgas; die restlichen 30 Prozent durch eine veränderte Landnutzung. Hinter diesem Begriff verbergen sich unter anderem Eingriffe wie das Abholzen der Wälder, das Trockenlegen von Mooren und Feuchtgebieten oder aber auch eine intensivere Landwirtschaft.

Bemerkenswert ist außerdem, dass in diesem Zeitraum mit jedem Jahrzehnt mehr Kohlendioxid durch menschliche Aktivitäten freigesetzt wurde. Finanz- und Wirtschaftskrisen führten in der Vergangenheit lediglich zu geringeren Steigerungsraten oder aber wie im Fall der Finanzkrise 2008 zu einem kurzfristigen Emissionsrückgang. In der Folgezeit aber erholte sich die globale Wirtschaft stets wieder, und der Kohlendioxidausstoß nahm erneut zu, sodass sich der langfristige Anstieg fortsetzte.

**2.5 > Die Energiegewinnung aus der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas ist weltweit ein wesentlicher Faktor, der den Klimawandel weiter vorantreibt.**




**2.6 > Etwa 40 bis 45 Prozent der Erderwärmung werden durch kurzlebige klimawirksame Schadstoffe verursacht. Im Gegensatz zu Kohlendioxid verweilen diese nur kurz in der Atmosphäre – von wenigen Tagen (Feinstaub, Ruß) bis hin zu einigen Jahren oder Jahrzehnten (zum Beispiel Methan und Fluorkohlenwasserstoffe).**

Deshalb verwundert es auch nicht, dass die Emissionsstatistiker bislang bis zum Coronajahr 2020 mit jedem weiteren Jahr einen neuen Rekordwert verbuchten. Der aktuelle Höchstwert aus dem Jahr 2019 lag bei einem Gesamtausstoß von 43,1 Gigatonnen (Milliarden Tonnen). Im Pandemie-Jahr 2020 gingen die Emissionen durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe im Vergleich zum Vorjahr um sieben Prozent zurück.

Von der Menge des emittierten Kohlendioxids verbleibt mittlerweile ein Anteil von 46 Prozent in der Atmosphäre. 23 Prozent nimmt der Ozean auf; weitere 31 Prozent entziehen Landpflanzen der Atmosphäre im Zuge ihres Wachstums.

## Der Weltozean als Wärmespeicher

Infolge der globalen Emissionen stieg die Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre im Jahr 2020 auf einen Jahresdurchschnitt von 413,9 ppm (parts per million). Zum Vergleich: Im Jahr 1750, also zwei Jahrzehnte bevor der Brite James Watt die Dampfmaschine optimierte und damit den Grundstein für die Industrialisierung legte, betrug die Kohlendioxidkonzentration schätzungsweise 277 ppm. Je höher der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre steigt, desto undurchlässiger wird die Lufthülle der Erde für die Wärmeenergie, welche unser Planet aufgrund der Sonneneinstrahlung stetig wieder abstrahlt. Anstatt die Wärme ins Weltall entweichen zu lassen, halten die Treibhausgase sie gewissermaßen in der Atmosphäre fest und forcieren damit den Anstieg der Temperatur auf der Erde.

Dass sich die globale Erderwärmung bislang auf einen Durchschnittswert von 1,1 Grad Celsius beschränkt, verdankt die Menschheit in erster Linie dem Weltozean. Die Meere haben seit den 1970er-Jahren mehr als 90 Prozent der vom Menschen zu verantwortenden überschüssigen Wärme aufgenommen.

Um welch gigantische Energiemenge es sich dabei handelt, wird deutlich, wenn man sich einmal vor Augen führt, dass die Meere der Atmosphäre allein im Zeitraum von 2018 bis 2019 etwa 44-mal mehr Energie in Form von Wärme entzogen haben, als die gesamte Menschheit im gleichen Zeitraum für Transport, Industrie, Heizung und im Haushalt genutzt hat. Die Meere sind damit der wirkungsvollste Wärmespeicher im Klimasystem der Erde.

### Methan: Der unerwartete Aufstieg des kleinen Bruders

Das Treibhausgas Methan stand in der Vergangenheit deutlich seltener im Blickpunkt der Öffentlichkeit als sein „großer Bruder", das Kohlendioxid. Das lag vor allem daran, dass Methan in der Atmosphäre chemisch abgebaut wird und daher im Durchschnitt nur etwa zwölf Jahre lang dort verweilt. Kohlendioxid dagegen zerfällt nicht. Es kann der Atmosphäre nur entzogen werden – etwa durch Pflanzen, den Ozean oder durch Gesteinsverwitterung. Diese natürlichen Entnahmeprozesse laufen im Vergleich zum Tempo der Kohlendioxidemissionen jedoch sehr langsam ab, sodass neu emittiertes Kohlendioxid jahrtausendelang als Treibhausgas klimawirksam bleibt.

Seit mehr als zehn Jahren aber beobachten Forscher mit Sorge, wie der Methangehalt in der Atmosphäre zunimmt. Seit 2014 sprechen sie sogar von einem starken Anstieg. Methan kommt zwar weiterhin in deutlich geringerer Konzentration vor als Kohlendioxid, dafür aber besitzt es ein deutlich größeres Wärmepotenzial. Berechnungen zufolge hält es etwa 30-mal so viel Wärme in der Atmosphäre fest wie Kohlendioxid. Nach Schätzungen ist Methan daher für etwa 30 Prozent der bis heute beobachteten Erderwärmung verantwortlich.

Warum die Methanemissionen in den zurückliegenden Jahren so stark gestiegen sind, ist noch nicht genau geklärt. Methan wird sowohl auf natürliche Weise als auch durch menschliche Aktivitäten freigesetzt. Etwa zwei Fünftel der Emissionen stammen aus natürlichen Quellen wie Mooren und Feuchtgebieten. Drei Fünftel der Emissionen sind auf den Menschen zurückzuführen. Sie entweichen aus Erdöl- und Erdgasförderanlagen oder aus alten Kohleschächten, entstehen auf Müllhalden und beim Verbrennen organischen Materials. Oder aber sie werden in der Landwirtschaft freigesetzt, zum Beispiel beim Reisanbau oder durch Rinderherden.

Eine mögliche Erklärung für die steigende Methankonzentration könnte das Bevölkerungswachstum in den Tropen sein. Wo mehr Menschen leben, muss mehr Landwirtschaft betrieben werden, um ausreichend Nahrungsmittel zu produzieren. Durch den Einsatz verbesserter Beobachtungtechnik wie Drohnen und Satelliten verstehen Forscher jedoch auch immer besser, welche enormen Mengen Methan tatsächlich aus Müllbergen oder Erdölförderanlagen entweichen.

Hoffnung macht angesichts der aktuellen Situation nur die kurze Lebensdauer des Methans. Würde es der Menschheit gelingen, ihre Methanemissionen innerhalb kurzer Zeit drastisch zu reduzieren – das notwendige Wissen dazu liegt vor –, würde die Konzentration schon nach etwa zehn Jahren spürbar abnehmen.

Im Fall von Kohlendioxid dagegen müsste man viele Jahrhunderte bis Jahrtausende lang warten, bis sich nach umfassenden Emissionsreduktionen eine messbare Verringerung der Kohlendioxidkonzentration einstellen würde.

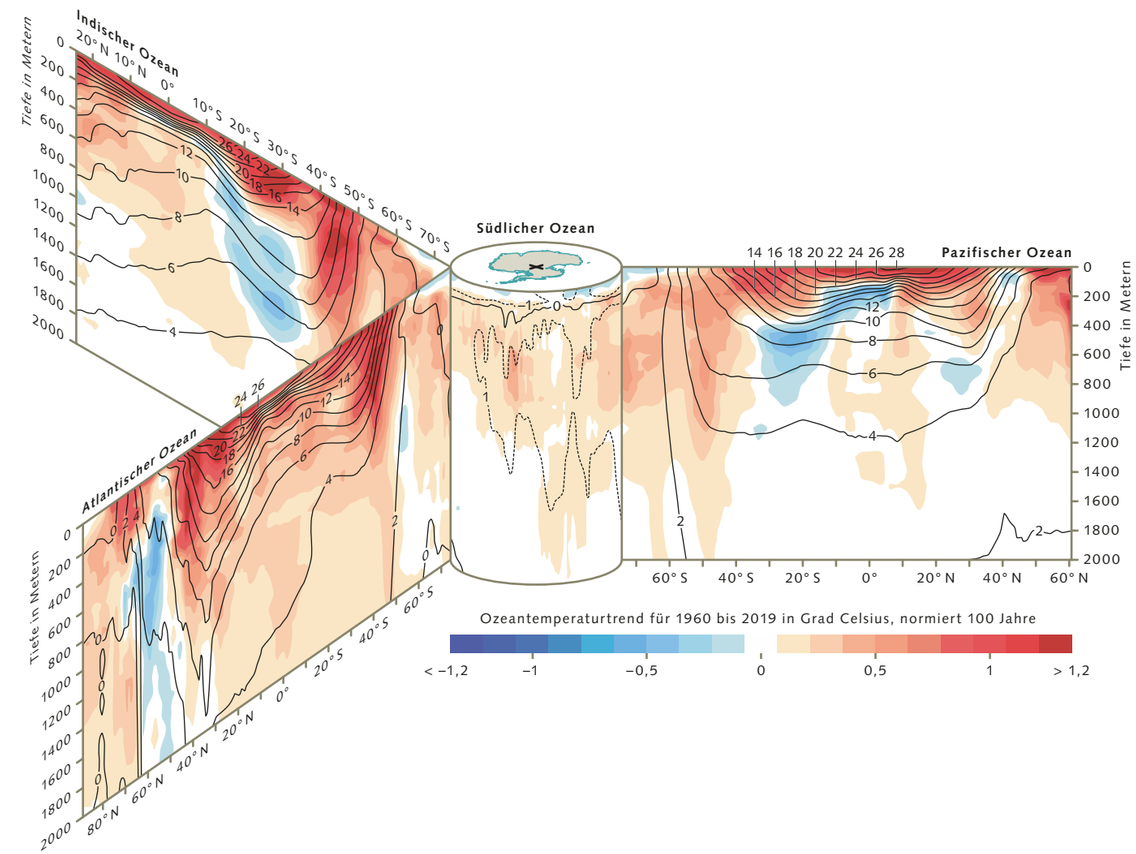
Dass der Ozean der Atmosphäre so viel Wärme entziehen kann, liegt vor allem an der extrem hohen Wärmekapazität des Wassers. Diese besagt, dass im Vergleich zu anderen Stoffen vergleichsweise viel Wärmeenergie benötigt wird, um Wasser überhaupt um ein Grad Celsius zu erwärmen – oder in anderen Worten ausgedrückt: Das Meer kann große Mengen Wärme aufnehmen, ohne dabei selbst deutlich wärmer zu werden. Im Umkehrschluss bedeutet diese Tatsache aber auch, dass die Meere viel Wärme speichern; eine Eigenschaft, die vor allem dann relevant wird, wenn man bedenkt, dass sie die gespeicherte Wärme auch wieder an die Atmosphäre abgeben, wenn sich ihre Wassermassen abkühlen.

Vergleicht man nun die unterschiedliche Wärmekapazität von Luft und Wasser, so wird deutlich, dass die Meere aufgrund der pro Kilogramm viermal größeren Wärmekapazität von Wasser im Vergleich zu Luft umgerechnet mehr als 1000-mal so viel Wärme speichern können wie die Lufthülle der Erde. Die Wärme wird an der Meeresoberfläche aufgenommen. Wind, Gezeiten und Meeresströmungen vermischen die Wassermassen und halten sie konstant in Bewegung, sodass die Wärme sowohl in größere Tiefen als auch von den wärmeren Gebieten Richtung Pole transportiert wird.

Wärme, die vom Meer aufgenommen wird, verschwindet jedoch nicht. Sie wird lediglich zwischengespeichert. Man könnte den Ozean deshalb mit einer gigantischen Wärmebatterie vergleichen, der wir Menschen seit Beginn der Industrialisierung mehr und mehr Wärme zuführen, indem wir Treibhausgase ausstoßen und so den Klimawandel forcieren.

Klimawirksam wird die im Meer gespeicherte Wärme erst wieder, wenn sie dazu beiträgt, dass das Meereis oder die schwimmenden Gletscherzungen in der Arktis und Antarktis schmelzen, aufgrund der Wärme Meerwasser schneller verdunstet oder sich die Luft direkt über der Meeresoberfläche erwärmt.

Gerade in den gemäßigten und höheren Breiten gibt das Meer auf diese Weise seine Wärmeenergie wieder an die Atmosphäre ab und sorgt so dafür, dass die Lufttemperaturen steigen. Innerhalb welchen Zeitraums dies geschieht, ist schwer vorherzusagen: Einmal aufgenommen, kann die Wärme des Meeres das Erdklima über




2.7 > Die Meere nehmen die Wärme an ihrer Oberfläche auf, Strömungen transportieren sie dann in immer größere Tiefen. Dieses Muster zeigt sich in allen Ozeanen, deren Temperaturveränderungen hier bis in eine Tiefe von 2000 Metern dargestellt werden.

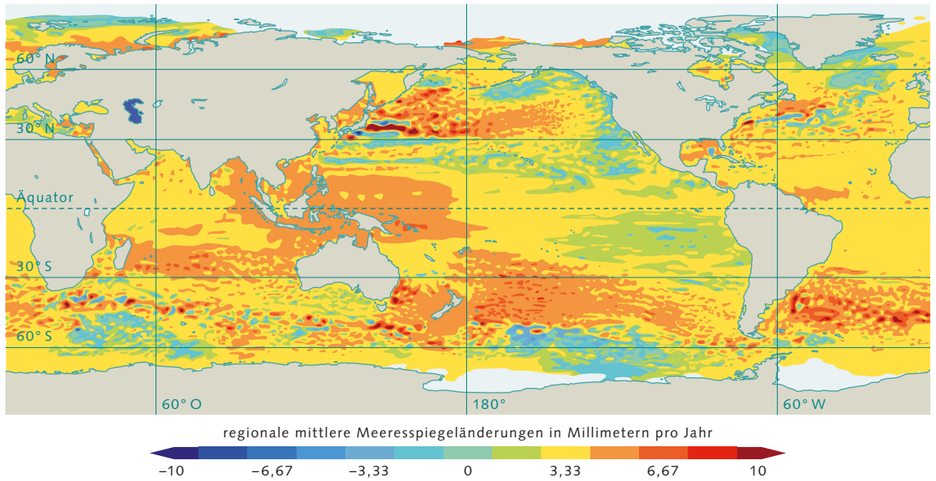
Jahrzehnte hinweg maßgeblich beeinflussen. Aus diesem Grund ist es für wissenschaftliche Vorhersagen des Klimas auch so entscheidend, den Wärmegehalt des Weltozeans möglichst genau zu kennen.

Die Temperaturkurve des Ozeans dient Wissenschaftlern zudem als wichtiges Kontrollinstrument. Verändert sich der Wärmegehalt der Meere, lässt sich anhand dieser Daten am besten der Beweis führen, wie es um die Erderwärmung steht – ob sie abklingt (gleichbleibende oder sinkende Wassertemperaturen) oder aber voranschreitet (steigende Wassertemperaturen). Daten aus der Luft sind für solche Analysen eigentlich ungeeignet, weil sie von zu vielen Faktoren beeinflusst werden. Nichtsdestotrotz werden sie noch immer gern für Aussagen zur Entwicklung der globalen Erwärmung herangezogen.

## Temperaturanstiege bis in große Tiefen

Je mehr Wärme das Meer aufnimmt, desto spürbarer steigen seine Wassertemperaturen; zuerst an der Meeresoberfläche, anschließend in immer größerer Tiefe. Die mittlere Oberflächentemperatur der Meere ist seit Beginn des 20. Jahrhunderts um 0,88 Grad Celsius gestiegen.

Deutliche Veränderungen beobachten Wissenschaftler mittlerweile aber auch in der Tiefsee. Betrachtet man die Wärmeverteilung über die verschiedenen Tiefen,




**2.8 > Die Meeresspiegel steigen nicht gleichmäßig wie in einer Badewanne. Satellitenbeobachtungen von 1993 bis 2017 belegen, dass erhebliche regionale Unterschiede existieren.**

so verblieben bis ins Jahr 2020 etwa 40,3 Prozent der aufgenommenen Wärme in den oberen 300 Metern. 21,6 Prozent waren in eine Tiefe von 300 bis 700 Metern gelangt, weitere 29,2 Prozent wurden in den Wasserschichten zwischen 700 und 2000 Metern gespeichert. Die restlichen 8,9 Prozent Wärme waren vor allem im Atlantischen und Südlichen Ozean bis in eine Tiefe von mehr als 2000 Metern verfrachtet worden.

Klimaforscher schlussfolgern daher, dass die weitreichende Erwärmung des Ozeans eines der überzeugendsten Anzeichen des globalen Klimawandels ist. Seit Beginn der kontinuierlichen Meeresbeobachtungen waren die Ozeane nicht so warm wie heutzutage – und alles deutet darauf hin, dass die Wassertemperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weiter steigen werden, selbst wenn die Menschheit es schaffen sollte, ihre Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

## Lebensbedrohliche Konsequenzen

Im Zuge der Erwärmung verändern sich wichtige physikalische Eigenschaften des Meerwassers. Einige dieser Veränderungen wirken sich unmittelbar auf das Klimageschehen aus, andere wiederum beeinflussen vor allem das Leben im Meer sowie entlang der Küsten.

Die wichtigsten Folgeerscheinungen sind:

- ein Anstieg des Meeresspiegels,
- eine Zunahme der Wassermassenschichtung und die damit verbundene Abnahme der Belüftung und des Sauerstoffgehaltes im Ozeaninneren,
- die Zunahme der Verdunstung von Meerwasser,
- die steigende Gefahr von Wetterextremen wie Stürmen sowie
- ein verstärktes Auftreten von Hitzewellen im Meer.

## Steigende Wasserpegel und kein Ende in Sicht

Wärmer werdendes Wasser dehnt sich aus. Dieses Naturgesetz gilt auch für das Meer und hat in den zurückliegenden Jahrzehnten mit dazu beigetragen, dass der mittlere globale Meeresspiegel im Jahr 2018 etwa 20 Zentimeter höher war als noch im Jahr 1900 – und er wird weiter steigen, Prognosen zufolge um 18 bis 23 Zentimeter bis zum Jahr 2050. Bis zum Anfang des 21. Jahrhunderts waren der Anstieg der Meerestemperaturen und die damit verbundene Ausdehnung der Wassermassen der Hauptgrund für den langfristigen Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels. Dessen jährliche Rate lag im Zeitraum von 1901 bis 1990 bei durchschnittlich 1,4 Millimetern pro Jahr.

**2.9 > Der höchste Punkt der philippinischen Insel Batasan liegt weniger als zwei Meter über dem Meeresspiegel. Damit gehört die Insel zu den vielen niedrig gelegenen Küstenregionen der Welt, die aufgrund steigender Wasserpegel bald unbewohnbar werden. Bei Flut dringt das Wasser schon heute regelmäßig in die Häuser ein.**

Seitdem aber beschleunigt sich der Meeresspiegelanstieg spürbar. Von 1971 bis 2018 stieg der globale Pegel im Durchschnitt um 2,3 Millimeter pro Jahr, wobei in der zweiten Hälfte dieses Zeitraumes (2006 bis 2018) Durchschnittswerte von bis zu 3,7 Millimetern gemessen wurden. Das heißt, das Anstiegstempo hat sich im Vergleich zum zurückliegenden Jahrhundert mehr als verdoppelt.

Diese Beschleunigung ist allerdings nicht allein auf die Ozeanerwärmung zurückzuführen, selbst wenn der Anteil der Dichteveränderungen des Wassers bei mittlerweile 1,4 Millimetern pro Jahr liegt. Steigende Meeresspiegel können durch verschiedene Prozesse hervorgerufen werden. Deutlich zugenommen hat in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten insbesondere jener Anteil, der durch das Schmelzen der weltweiten Gletscher sowie der Eisschilde in Grönland und der Antarktis verursacht wird. Der stete Zufluss neuen Schmelzwassers führt dazu, dass tatsächlich mehr Wasser im Ozean zirkuliert und der Meeresspiegel massebedingt steigt. Nach Angaben des Weltklimarates machten die Eisverluste der Gletscher und Eisschilde in den vergangenen 15 Jahren 1,62 Millimeter pro Jahr aus und damit rund 44 Prozent des Gesamtanstieges.

Einen messbaren Einfluss auf den globalen Meeresspiegel haben außerdem Veränderungen der Wasserspeicher an Land. Werden zum Beispiel in mehreren Regionen der Welt Bäche oder Flüsse zu Stauseen angestaut, kann das den Meeresspiegel durchaus senken. Umgekehrt ist die Wirkung, wenn an Land große Wassermengen aus Grundwasserspeichern oder aber Seen entnommen wurden und dieses Wasser nach seiner Nutzung über die Kanalisation, Bäche und Flüsse in den Ozean gelangt.

An dieser Stelle muss jedoch erwähnt werden, dass die Wasserpegel der Weltmeere nicht so gleichmäßig steigen wie der Wasserstand in einer Badewanne. Ihre Oberfläche ist auch nicht eben, wie man vielleicht annehmen könnte, wenn man vom Strand auf das Meer hinausblickt. Satellitenbeobachtungen belegen, dass es erhebliche regionale Unterschiede in der Meereshöhe sowie im Anstieg der Wasserpegel gibt. Diese lassen sich zum Beispiel auf den Einfluss von Meeresströmungen zurückführen, auf Winde oder auf die unterschiedlich starke wärmebedingte Ausdehnung der Wassermasse. Ausschlaggebend für steigende oder sinkende Wasserpegel können aber auch Landhebungen und -senkungen in jenen Küstenregionen sein, die während der letzten Eiszeit von riesigen Gletschern bedeckt waren. In Zahlen ausgedrückt können diese Unterschiede heutzutage bis zu plus/minus 30 Prozent des globalen Anstieges ausmachen.

Aus diesem Grund wird in der Wissenschaft häufig von Meeresspiegeln – in der Mehrzahl – gesprochen. Zudem verweisen Experten immer wieder darauf, dass es bei der Bewertung des Überflutungsrisikos vor Ort nicht nur auf den globalen Trend ankommt, sondern in erster Linie die lokalen Bedingungen berücksichtigt werden müssen. Ein plakatives Beispiel dafür ist die Entwicklung der Pegelstände an den Küsten Nordamerikas. Während in den zurückliegenden Jahren die Meeresspiegel entlang der Westküste nahezu unverändert geblieben sind oder eher sanken, steigen sie an der Ostküste bis heute größtenteils an.

Steigende Wasserpegel sind eine der folgenreichsten Entwicklungen im Zuge des Klimawandels. Sie gefährden zahllose Atolle und kleinere Inselstaaten sowie weite, oftmals dicht besiedelte Küstenräume auf der gesamten Welt. Gleichzeitig fällt es der Wissenschaft immer noch ausgesprochen schwer, genaue Vorhersagen zur künftigen Entwicklung der regionalen und lokalen Meeresspiegel zu machen. Der Grund dafür sind große Unsicherheiten in Bezug auf entscheidende Einflussfaktoren. So ist zum Beispiel immer noch fraglich, in welchem Tempo die Eisschilde Grönlands und der Antarktis künftig schmelzen werden – und ob sie irgendwann einen sogenannten Kippunkt (Tipping Point) erreichen werden, an dem ihr Zerfall unaufhaltsam und unumkehrbar sein wird.

Der Weltklimarat geht in seinem sechsten Sachstandsbericht davon aus, dass sich der Anstieg des globalen Meeresspiegels weiter beschleunigen wird, selbst wenn es der Staatengemeinschaft gelingen sollte, die Treibhausgasemissionen so umfangreich zu reduzieren wie im **Pariser Klimaabkommen** aus dem Jahr 2015 beschlossen. Den aktuellen Vorhersagen zufolge wird der mittlere globale Meeresspiegel bis zum Jahr 2100 im Durchschnitt um 38 bis 77 Zentimeter steigen – je nachdem, welche Menge an Treibhausgasen die Menschheit weiterhin emittieren wird.

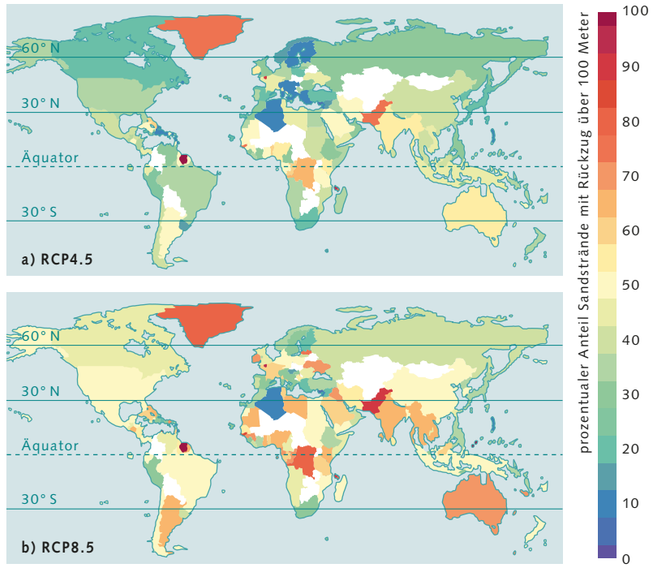
Je höher die Wasserpegel steigen, desto größer wird die Überflutungsgefahr, vor allem in Küstenregionen, die maximal zehn Meter über dem Meeresspiegel liegen. Wurden viele von ihnen in der Vergangenheit statistisch gesehen nur einmal in 100 Jahren von außergewöhnlichen Hochwasserereignissen wie Sturm- und Springfluten oder aber extrem hohen Wellen getroffen, wird dies nach Angaben des Weltklimarates bis zum Jahr 2050 in den hohen und gemäßigten Breiten alle zwei bis 50 Jahre der Fall sein. Für die niedrigen Breiten, gemeint sind die Küstenräume der Tropen und Subtropen, rechnen die Experten mit mehreren extremen Hochwasserereignissen pro Jahr. Das heißt, Millionenstädte wie Kalkutta beispielsweise könnten durch das Meer künftig regelmäßig unter Wasser gesetzt werden.

Besonders schwer werden die Überflutungen ausfallen, wenn sich zu einem generell hohen Meeresspiegel eine Springflut und ein Sturmgebiet gesellen, dessen Winde das Meerwasser vor der jeweiligen Küste aufstauen. Unter diesen Bedingungen können hohe Wellen besonders weit ins Landesinnere vordringen und das Küstengebiet weiträumig überspülen. Küstenschutzexperten gehen davon aus, dass sich die Gefahr großer Überflutungen mit jedem Dezimeter Meeresspiegelanstieg in etwa verdreifacht. Dieser sprunghafte Anstieg ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Küstenstreifen in vielen Regionen der Welt nur knapp über dem bisherigen Meeresspiegel liegen. Sollte der regionale Pegel also um zehn Zentimeter steigen, würde sich die Hochwasserlinie je nach Gefälle automatisch um 30 bis 40 Meter landeinwärts verlagern. Bei Sturm würden die Wellen dann noch viel weiter den Küstenbereich hinaufrollen – es sei denn, steile Klippen oder Küstenschutzbauten wie Schutzmauern versperren ihnen den Weg.

Lässt man alle Hochwasserschutzmaßnahmen außer Acht und betrachtet ausschließlich die Höhenlage der Küstenregionen, leben auf der Welt derzeit rund 360 Millionen Menschen in niedrig gelegenen Gebieten, die selbst bei einer Einhaltung des Zwei-Grad-Klimaziels im Jahr 2100 regelmäßig überflutet würden – die meisten von ihnen in Asien. In Vietnam beispielsweise wäre unter diesen Umständen nahezu ein Viertel der Bevölkerung betroffen; in Thailands Hauptstadt Bangkok stünden große Stadtteile dauerhaft unter Wasser, ähnlich wäre es in Shanghai.

Diese Zahl ist jedoch nur eine von vielen, denn bislang gibt es in der Wissenschaft durchaus unterschiedliche Definitionen, unter welchen Umständen Küstenbewohner als vom Meeresspiegelanstieg gefährdet gelten. Erschwert werden genauere Prognosen auch dadurch, dass man das künftige Bevölkerungswachstum in den Küstenregionen nur ungefähr vorhersagen kann und viele Küstenmetropolen absinken, weil vor Ort so viel Grundwasser aus dem Untergrund gepumpt wird. Steigt zeitgleich der lokale Meeresspiegel, nimmt das Überschwemmungsrisiko um ein Vielfaches zu.

Einig sind sich die Forscher jedoch in ihrer Einschätzung, welche Gefahr der weltweite Anstieg der Meeresspiegel darstellt. Seine negativen Folgen für die Küstenbevölkerung zu minimieren, so der Tenor, sei eine der größten gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit.




**2.10 > Steigende Meeresspiegel bedrohen die Sandstrände der Welt. Diese beiden Karten zeigen für jeden Küstenstaat, wie hoch der prozentuale Anteil seiner sandigen Küstenabschnitte sein wird, die laut Berechnungen bis zum Jahr 2100 mehr als 100 Meter Breite einbüßen werden – oben (a) dargestellt für eine Welt, die sich bis zum Jahr 2100 um 2,5 Grad Celsius erwärmt; darunter (b) für eine Welt, die zum selben Zeitpunkt etwa 4,3 Grad Celsius wärmer ist.**

## Den Meeren geht der Sauerstoff aus

Wärmer werdendes Meerwasser dehnt sich nicht nur aus, es verliert auch Sauerstoff und somit einen der wichtigsten Grundsteine für das Leben im Ozean. Im Zeitraum von 1960 bis 2010 haben die Weltmeere mehr als zwei Prozent (rund 77 Milliarden Tonnen $O_2$) ihres Sauerstoffgehaltes eingebüßt. Gründe dafür waren zum einen die

Überdüngung der Meere – ein Prozess, der vor allem die Küstengewässer betrifft –, zum anderen können Wissenschaftler den Großteil der Sauerstoffverluste mittlerweile eindeutig auf die Meereserwärmung und somit auf den Klimawandel zurückführen.

Sauerstoff gelangt auf zweierlei Weise ins Meer: durch Gasaustauschprozesse zwischen der Atmosphäre und dem Meer an der Wasseroberfläche sowie als Abfallprodukt der Photosynthese, welche Algen und Wasserpflanzen im oberen lichtdurchfluteten Teil der Wassersäule betreiben. Trotzdem enthält ein Liter Meerwasser im Durchschnitt etwa 30-mal weniger Sauerstoff als ein Liter Luft, weshalb das Atmen unter Wasser auch Schwerstarbeit ist. Um ein Gramm Sauerstoff aufzunehmen, müssen Fische, Muscheln, Seesterne und Co. rund 152 Liter Wasser durch ihre Kiemen oder Atemorgane pumpen. Landlebewesen dagegen müssen für die gleiche Sauerstoffausbeute nur 3,6 Liter Luft einatmen.

Verbraucht wird Sauerstoff im Meer allerdings nicht nur durch Fische und andere höher entwickelte Meeresbewohner, sondern in erster Linie durch Mikroben und mehrzellige Organismen, welche bis in große Tiefe pflanzliche und tierische Überreste (organisches Material) zersetzen und dabei Sauerstoff veratmen. Je mehr Biomasse also in der lichtdurchfluteten Zone produziert wird und je mehr Algen und tierische Lebewesen absterben und herabsinken, desto mehr organisches Material steht den Mikroben zur Verfügung und desto mehr Sauerstoff verbrauchen sie. Ähnliches gilt für steigende Wassertemperaturen. Je wärmer das Meer wird, desto mehr Sauerstoff benötigen große und kleine Meeresbewohner, um alle lebenswichtigen Prozesse aufrechtzuerhalten.

Fachleute leiten aus diesen Erkenntnissen zwei wesentliche Schlussfolgerungen ab.

Erstens: Verändern sich die chemischen oder physikalischen Grundvoraussetzungen in einer Wasserschicht – etwa durch den Eintrag von Nährstoffen oder aber Veränderungen der Temperatur oder der einfallenden Lichtmenge –, beeinflusst das die Biomasseproduktion und somit langfristig auch die sauerstoffzehrende Zersetzung der in die Tiefe sinkenden Biomasse.

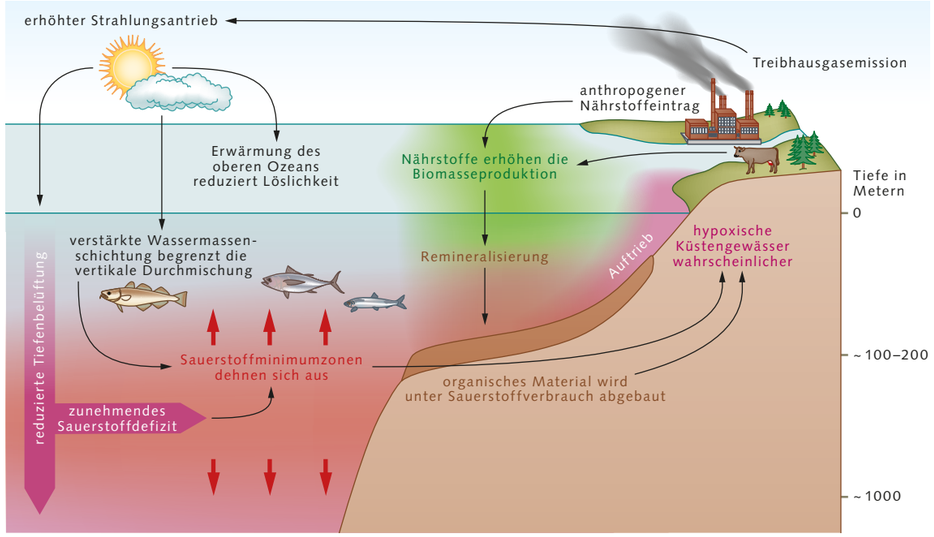
Zweitens: Wenn sauerstoffreiches Oberflächenwasser mit der Ozeanzirkulation in die Tiefe transportiert wird, ist dessen Sauerstoffkonzentration anfangs noch vergleichsweise hoch. Je länger dieses Wasser jedoch in der Tiefe verweilt, desto mehr Zeit haben Mikroben und andere Lebewesen, herunterrieselnde Partikel zu zersetzen und dabei den im Wasser enthaltenen Sauerstoff zu veratmen. Aus diesem Grund ist Tiefenwasser in der Regel eher sauerstoffarm.

Doch zurück zur Meeresoberfläche: Wie viel Sauerstoff das Meer aus der Luft aufnehmen kann, hängt von der Temperatur und vom Salzgehalt des Oberflächenwassers ab. Beide Faktoren bestimmen maßgeblich die Löslichkeit von Gasen im Wasser. Je wärmer und salziger das Meer ist, desto weniger Sauerstoff kann sich darin lösen. Steigt zum Beispiel die Temperatur des Oberflächenwassers von vier auf sechs Grad Celsius, sinkt sein Sauerstoffgehalt automatisch um fünf Prozent.

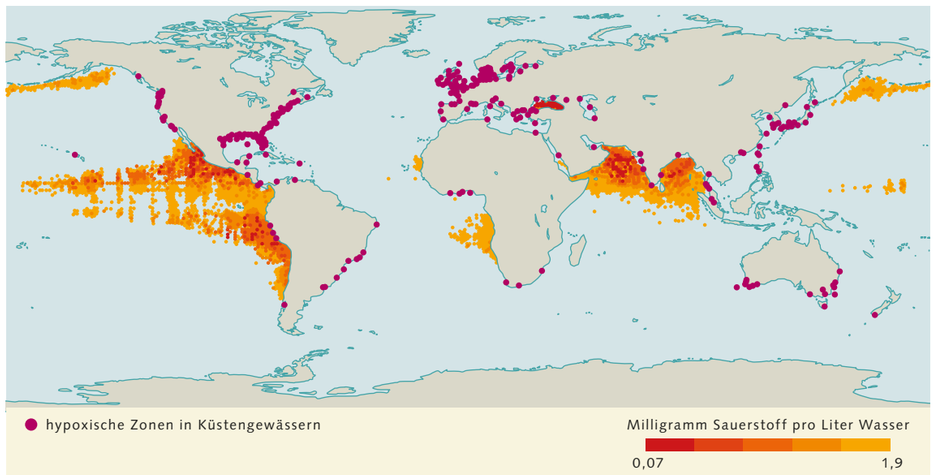
Wissenschaftler haben untersucht, wie groß in den zurückliegenden Jahrzehnten der jeweilige Einfluss von Temperaturveränderungen und eines sich ändernden Salzgehaltes auf den Sauerstoffgehalt der Meere war. Dabei kamen sie zu dem Ergebnis, dass die Sauerstoffverluste in den oberen 1000 Metern der Wassersäule hauptsächlich auf den zunehmenden Wärmegehalt des Ozeans zurückzuführen sind und die daraus folgende geringere Löslichkeit von Gasen im Meer. Veränderungen im Salzgehalt dagegen spielen nach Ansicht der Wissenschaftler nur eine untergeordnete Rolle.

Auf die gesamte Wassersäule gerechnet aber machen die wärme- und löslichkeitsbedingten Sauerstoffverluste nur 15 Prozent aus. Die restlichen 85 Prozent werden dadurch verursacht, dass sich sowohl die Meeresströmungen als auch die Durchmischungstiefe des Oberflächenwassers verändern.

Die Wassermassen an der Meeresoberfläche werden durch den direkten Gasaustausch mit der Atmosphäre belüftet. Dieser Prozess funktioniert so gut, dass das Oberflächenwasser seiner Temperatur entsprechend quasi immer sauerstoffgesättigt ist. Das heißt, es besitzt die maximal mögliche Sauerstoffkonzentration und befindet sich diesbezüglich in einem Gleichgewicht mit der Atmosphäre. Bis in welche Tiefe dieser Zustand existiert, hängt vom Wind ab sowie von der Luft- und Wassertemperatur, welche beide je nach Jahreszeit und geografischer Breite variieren. Im Sommer, wenn Sonne und Lufttemperatur das Oberflächenwasser stark erwärmen, dehnt es sich aus und wird deutlich leichter als die darunterliegenden meist kühleren Wasserschichten. Denn grundsätzlich gilt: Je kälter und salziger eine Wassermasse ist, desto größer ist ihre Dichte und desto tiefer wird sie im Ozean eingeschichtet. Infolge dieses Dichtekontrastes zum Tiefenwasser liegt warmes Oberflächenwasser dann wie ein stabiler, warmer Deckel auf dem Meer, sodass es selbst starkem Wind nicht mehr gelingt, die Deckschicht und die darunterliegenden Wassermassen miteinander zu vermischen. Das sauerstoffreiche Wasser verbleibt also an der Meeresoberfläche und gelangt nicht mehr in tiefere Schichten.

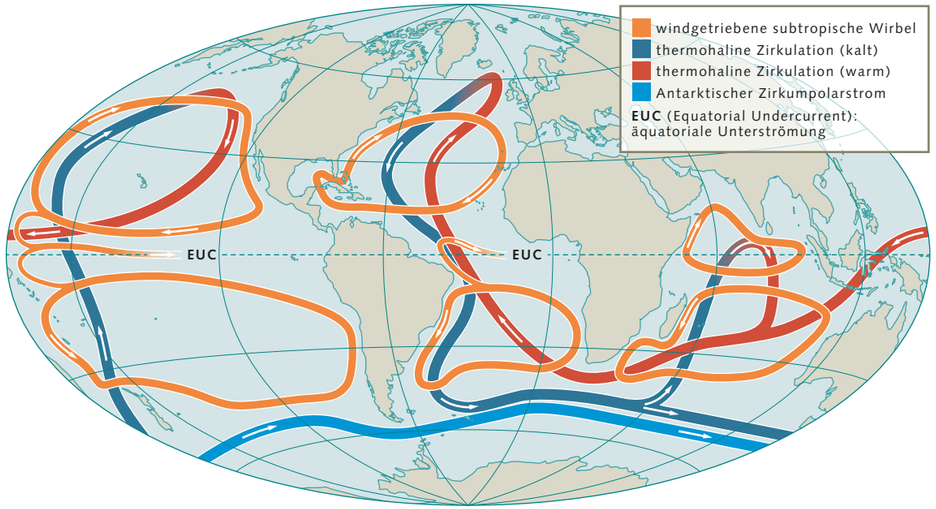



**2.12 > Die Sauerstoffabnahme im offenen Meer wird in erster Linie durch steigende Wassertemperaturen hervorgerufen. Sie bewirken, dass sich weniger Sauerstoff im Wasser löst und Oberflächen- und Tiefenwasser nicht mehr ausreichend durchmischt werden. In Küstengewässern dagegen führen hohe Nährstoffeinträge zu einem starken Algenwachstum, bei dessen Abbau anschließend Mikroorganismen allen Sauerstoff aufbrauchen.**




**2.11 > Niedrige oder abnehmende Sauerstoffkonzentrationen sind ein globales Problem und treten sowohl in Küstengewässern als auch im offenen Ozean auf. Diese Karte zeigt violett markiert Küstenregionen, deren Wasser weniger als zwei Milligramm Sauerstoff pro Liter Wasser (< 63 Mikromol pro Liter) enthält. Orange dargestellt ist die Verteilung der Sauerstoffminimumzonen in einer Tiefe von 300 Metern.**

**2.13 > Temperaturbedingte Grenzen zwischen Wassermassen lassen sich manchmal auch mit bloßem Auge erkennen: Auf diesem Bild schwimmen Stachelmakrelen und Hochrücken-Füsiliere knapp über deutlich kälterem Tiefenwasser.**




**2.14 > Die Lage, Größe und Verteilung sauerstoffarmer Zonen hängen eng von den Meeresströmungen ab. Diese Karte zeigt die vom Wind angetriebenen Strömungen der subtropischen Wirbel und des Antarktischen Zirkumpolarstroms sowie das Förderband der dichtegetriebenen thermohalinen Zirkulation.**

Wissenschaftler bezeichnen die Schichtung der Wassermassen aufgrund von Dichteunterschieden als Stratifikation. Da sich der Ozean von der Meeresoberfläche her erwärmt, nimmt diese als unmittelbare Folge der Meereserwärmung zu und verhindert den Wasseraustausch zwischen Meeresoberfläche und den darunterliegenden Schichten in einem immer größeren Maß. In einigen Regionen der Welt wird die temperaturbedingte Stratifikation der oberen Wasserschicht noch zusätzlich verstärkt; so zum Beispiel in den Polarregionen, wo die Schneedecke, Gletscher und Eisschilde in zunehmendem Maß schmelzen und ihr Schmelzwasser das Meer an seiner Oberfläche aussüßt. Den gleichen Effekt beobachten Wissenschaftler in jenen Meeres- und Küstengebieten, in denen im Zuge des Klimawandels mehr Niederschlag fällt. Wie Schmelzwasser ist auch Regenwasser nichts anderes als Süßwasser, welches das Oberflächenwasser der Meere verdünnt, es somit weniger salzig und demzufolge leichter macht.

Für die Belüftung der Stockwerke unterhalb der vom Wind durchmischten Deckschicht ist das sogenannte thermohaline Förderband der Meeresströmungen zuständig. Es transportiert die Wassermassen der Ozeane wie eine Art Förderband durch alle großen Ozeanbecken. Dieses Förderband bewegt sich aufgrund von Unterschieden in der Temperatur und im Salzgehalt der Wassermassen, weshalb Fachleute auch von einer thermohalinen Zirkulation sprechen (*thermo*: angetrieben durch Temperaturunterschiede; *halin*: angetrieben durch Unterschiede im Salzgehalt).

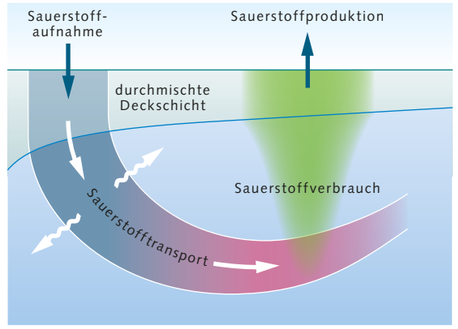
Der Klimawandel beeinträchtigt allerdings auch deren Funktionsweise, denn je wärmer und leichter die Wassermassen an der Meeresoberfläche werden, desto langsamer geht die Umwälzbewegung der thermohalinen Zirkulation vonstatten. Gemeint ist das Abkühlen und Absinken gigantischer Wassermassen in den mittleren Breiten, wo das sogenannte Zwischenwasser entsteht, sowie in der Arktis und Antarktis, wo sich schweres, sauerstoffreiches Tiefenwasser bildet. Letzteres fließt aus den Polarregionen zurück Richtung Äquator und belüftet dabei den tiefen Ozean. Das Zwischenwasser dagegen versorgt die mittleren Schichten des Meeres mit Sauerstoff.

Mittlerweile gibt es aus vielen Teilen der Welt Hinweise darauf, dass das Förderband der thermohalinen Zirkulation im Zuge des Klimawandels langsamer wird. Demzufolge gelangt nicht nur weniger sauerstoffreiches Oberflächenwasser in größere Tiefen; auf ihrer Wanderung durch die Ozeane verbringen die einzelnen Wassermassen insgesamt auch mehr Zeit in der mittleren und unteren Etage des Meeres. In beiden Stockwerken aber zersetzen Mikroben und Kleinstlebewesen weiterhin Par-

tikel und veratmen Sauerstoff, was dazu führt, dass der Sauerstoffgehalt des Zwischen- und Tiefenwassers weiter sinkt.

Wie diese Entwicklung künftig weitergehen wird, haben deutsche Wissenschaftler in Klima-Ozean-Modellen berechnet. Ihr Ergebnis: Die wärmebedingte Verlangsamung der globalen Meereszirkulation wird künftig für die Hälfte aller Sauerstoffverluste in den oberen 1000 Metern der Wassersäule verantwortlich sein. Im tiefen Ozean, also unterhalb der 1000-Meter-Marke, werden sogar 98 Prozent der Verluste auf die abnehmende thermohaline Zirkulation zurückzuführen sein.

In den zurückliegenden 50 Jahren ist die Gesamtfläche sogenannter Sauerstoffminimumzonen im offenen Ozean, in denen Fische nicht mehr genügend Sauerstoff zum Atmen haben, um etwa 4,5 Millionen Quadratkilometer angewachsen. Dieses Plus entspricht in etwa der Fläche der Europäischen Union. Im selben Zeitraum hat sich die Menge des anoxischen, das heißt des komplett sauerstofffreien Wassers vervierfacht. Den Ozeanen geht im Zuge des Klimawandels also im wahrsten Wortsinn die Luft aus. Das Fatale an dieser Entwicklung ist jedoch, dass sich die wärmebedingten Sauerstoffverluste des Meeres nicht einfach stoppen und umkehren lassen. Selbst wenn es der Menschheit gelingen sollte, ihre Treibhausgasemissionen nach den Vorgaben des Pariser Klimaabkommens zu reduzieren und künftig emissionsneutral zu leben,




**2.16 > Auf dem offenen Meer nimmt der Sauerstoffgehalt des Wassers mit zunehmender Tiefe ab. Grund ist der Sauerstoffverbrauch der Mikroorganismen.**

würde es mehrere Jahrhunderte dauern, bis die Treibhausgaskonzentration sinkt, sich die Atmosphäre und der Weltozean abkühlen und der Sauerstoffgehalt der Meere wieder auf das vorindustrielle Niveau ansteigt.

## Treibstoff für Hurrikane und Starkregen

Im Ozean und seinen Nebenmeeren zirkulieren 97 Prozent allen flüssigen Wassers auf der Erde, was sie zum wichtigsten Reservoir des globalen Wasserkreislaufes macht. Über den Ozeanen verdunsten pro Jahr schätzungsweise 420 000 Kubikkilometer Wasser. Etwa 90 Prozent dieser Feuchtigkeit kehrt im Anschluss in Form von Regen oder Schnee direkt wieder ins Meer zurück. Die restlichen zehn Prozent aber wandern in Form von Wasserdampf oder Wolken über die Kontinente und regnen dort ab. Auf dem Rückweg ins Meer machen sie dann oft noch Zwischenstation – etwa als Wassertropfen, der einer Pflanze zum Wachstum verhilft, oder aber als Sickerwasser, welches dazu beiträgt, einen Grundwasserspeicher wieder aufzufüllen. Irgendwann aber kehrt auch dieses Wasser ins Meer zurück.

Wie viel Wasser über dem Meer verdunstet und sich damit auf die Reise begibt, hängt abermals von der Luft- und Wassertemperatur ab. Je weiter sich die Atmosphäre nämlich erwärmt, desto mehr Wasserdampf kann sie speichern (sieben Prozent mehr Feuchtigkeit pro ein Grad Celsius Erwärmung). Und je wärmer das Meerwasser ist, desto einfacher verdunstet es an seiner Oberfläche. Im Zuge des Klimawandels verändern sich demzufolge wichtige Verteilungsmuster innerhalb des Wasserkreislaufes. Höhere Verdunstungsraten über dem Meer verstärken zum Beispiel die Intensität von Starkregenereignissen, die sich zumeist über dem Ozean zusammenbrauen. Das heißt, im Zuge eines solchen extremen Wetterereignisses fällt heutzutage deutlich mehr Regen, als dies früher der Fall war.

Beispielgebend dafür war unter anderem der Tropensturm Imelda, der Mitte September 2019 über den Südosten des US-Bundesstaates Texas hinwegzog und aufgrund seiner außergewöhnlich hohen Niederschläge große Überschwemmungen auslöste. Am zweiten und dritten Sturmtag fielen im Sturmzentrum jeweils bis zu 500 Liter Regen pro Quadratmeter – eine Niederschlagsmenge, wie sie die Küstenregion von Texas sonst nur einmal alle 50 Jahre erlebt. Rund 1000 Menschen mussten evakuiert werden, fünf Menschen starben, mehr als 10 000 Autos wurden durch die Regenfälle und Überschwemmungen beschädigt. Für 13 Landkreise mit insgesamt 6,6 Millionen Einwohnern wurde der Notstand ausgerufen.

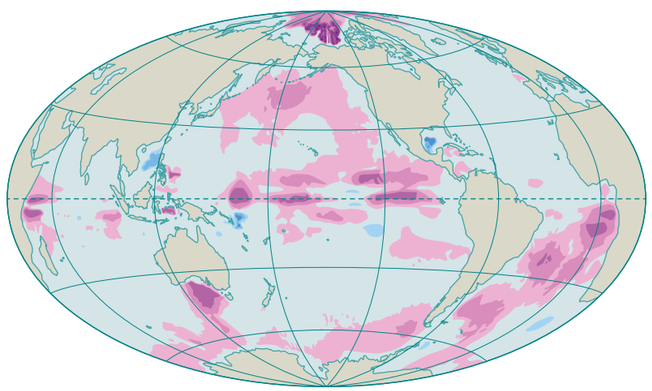
Klimaforscher sammelten im Anschluss an dieses Extremereignis alle verfügbaren meteorologischen Daten aus der Region – aktuelle Wetterangaben ebenso wie historische Aufzeichnungen, die mindestens 80 Jahre zurückreichten. Anschließend berechneten sie mithilfe von Klimamodellen, in welchem Maß der Klimawandel die Wahrscheinlichkeit und Niederschlagsintensität des Sturmes erhöht hat. Ihre Analyse ergab, dass im Vergleich zum Jahr 1900 die Gefahr eines solchen zweitägigen Starkregens um den Faktor 1,6 bis 2,6 gestiegen war; die Regenintensität hatte um neun bis 17 Prozent zugenommen. Die Studie sei ein weiterer Beleg dafür, dass der Klimawandel entlang der US-amerikanischen Golfküste zu steigenden Niederschlagsmengen bei Extremwetterereignissen führe, schlussfolgerten die Forscher am Ende.

Solche sogenannten Zuordnungsstudien (englisch: extreme event attribution oder auch attribution research) sind ein noch relativ junges Forschungsfeld innerhalb der Klimawissenschaften. Seit knapp 20 Jahren versuchen Forscher herauszufinden, welchen Anteil der menschengemachte Klimawandel an Extremereignissen wie Dürren, Hitzewellen, Stürmen und Überflutungen hat. Oft vergleichen sie dabei die Beobachtungsdaten eines Extremereignisses mit zwei Sorten von Klimasimulationen – eine in einer Welt ohne vom Menschen verursachte Treibhausgasemissionen und eine zweite, welche unser heutiges Klima realistisch abbildet.

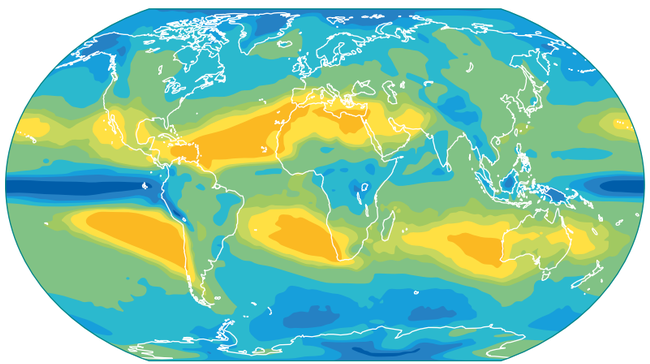
Mittlerweile gibt es mehr als 350 Einzelstudien, die von Experten begutachtet wurden und in Fachmagazinen erschienen sind. Die meisten von ihnen liefern neue Anhaltspunkte dafür, dass menschliches Handeln die Wahrscheinlichkeit oder aber die Intensität extremer Wetterereignisse erhöht. In einer Überblicksstudie aus dem Jahr 2020 zeigen Experten auf, dass der menschengemachte Klimawandel in 78 Prozent der insgesamt untersuchten Extremereignisse deren Wahrscheinlichkeit oder Intensität erhöht hat. Auslöser waren in den meisten Fällen steigende Temperaturen infolge der hohen Treibhausgasemissionen. Betrachtet man nur die Studien zu Starkregenereignissen und Überflutungen, fiel das Ergebnis nicht ganz so eindeutig aus. Hier konnte in lediglich 54 Prozent der Studien ein Fingerabdruck des Klimawandels nachgewiesen werden.

Der Weltklimarat geht in seinem neuesten Bericht ebenfalls davon aus, dass sich die Niederschlagsmuster in vielen Regionen der Welt verändern werden. Extreme wie Starkregen oder aber lang anhaltende Trockenheit werden häufiger auftreten und intensiver ausfallen. Zunehmen werden außerdem die jahreszeitlichen Unterschiede in der Niederschlagsmenge. Das heißt, es wird in

**2.15 > Seit dem Jahr 1960 hat der Sauerstoffgehalt der Meere um mehr als zwei Prozent abgenommen. Diese Karte zeigt, in welchen Regionen die Sauerstoffkonzentration besonders stark gesunken ist.**




**2.17 > Je wärmer Atmosphäre und Meer sind, desto mehr Wasser verdunstet und desto größer ist die Gefahr von Starkregen. Die Karte zeigt, um wie viel wahrscheinlicher Starkregenereignisse werden würden, wenn die Welt eines Tages drei Grad Celsius wärmer wäre als zur vorindustriellen Zeit.**



# Atemnot in überdüngten Küstengewässern

Jedes Jahr im Juni veröffentlichen Wissenschaftler der US-amerikanischen Meeresbehörde NOAA eine Vorhersage zur Größe der sogenannten Todeszone (englisch: dead zone), die sich im Laufe des Sommers im nördlichen Teil des Golfs von Mexiko bildet. Als Todeszone werden umgangssprachlich Meeresgebiete in Küstennähe bezeichnet, deren Wasser hypoxisch ist. Das heißt, es besitzt nur noch so wenig Sauerstoff, dass Fische und andere wasseratmende Meereslebewesen Atemnot bekommen und gezwungen sind, ihren Stoffwechsel enorm herunterzufahren oder aber – falls das nicht reicht – abzuwandern, sonst sterben sie. Wann genau das der Fall ist, unterscheidet sich von Art zu Art. Wissenschaftler verwenden lediglich Richtwerte und geben diese auch noch in unterschiedlichen Einheiten an – je nachdem, ob es sich um Küstengewässer oder aber um Zonen im offenen Ozean handelt. Wassermassen gelten in der Regel als hypoxisch, wenn sie pro Kilogramm Wasser weniger als 70 Mikromol Sauerstoff enthalten. Sinkt die Konzentration sogar unter 20 Mikromol, spricht man von sogenannten Minimumzonen mit extrem geringem Sauerstoffgehalt.

Hypoxische Zonen entstehen in der Regel dort, wo Flüsse übermäßig viele Mineralien und Nährstoffe in die Küstengewässer eintragen und auf diese Weise das Wachstum ein- und mehrzelliger Algen (Phytoplankton) antreiben. Oft kommt es dabei auch zu schädlichen Algenblüten. Sterben Algen ab, sinken die Überreste in tiefere Wasserschichten. Dort werden sie von Mikroben zersetzt, die dabei mehr Sauerstoff veratmen, als durch Frischwasser, Strömungen oder aber Wind und Wellen (Durchmischung mit Oberflächenwasser) hinzugefügt werden kann. Gleichzeitig geben die Mikroben aber jede Menge Kohlendioxid ab, wodurch der pH-Wert des Tiefenwasser sinkt. Das heißt, die Lebensbedingungen für Meeresorganismen in dieser Zone verschlechtern sich noch weiter.

**Ein an Land verursachtes Problem**

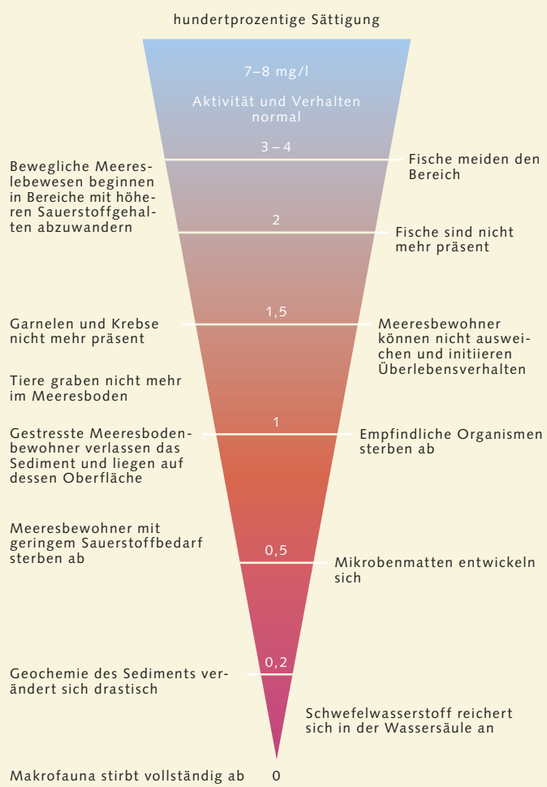
Den übermäßigen Nährstoffeintrag hat in erster Linie der Mensch zu verantworten. Seit dem Jahr 1950 hat sich die Weltbevölkerung nahezu verdreifacht. Dementsprechend gestiegen ist auch der Druck auf Landwirte, ausreichend Nahrungsmittel zu produzieren. Weltweit setzen Bauern heutzutage zehnmal mehr Dünger (vor allem Stickstoff und Phosphor) ein als noch vor 50 Jahren. Ein beträchtlicher Teil davon wird vom Regen davongewaschen und landet im Meer. Hinzu kommen oftmals ungeklärte Abwässer aus Städten und Gemeinden. Als Folge dieser Wasserverschmutzung ist die Nährstoffbelastung der Küstengewässer in den zurückliegenden Jahrzehnten so stark angestiegen, dass sich die Zahl der hypoxischen Zonen im Zeitraum von 1960 bis 2007 in etwa verdoppelt hat. Weltweit gibt es mittlerweile mehr als 500. Man findet sie nahezu überall: im Golf von Mexiko ebenso wie in der Ostsee, im Ostchinesischen Meer, entlang der britischen Küste sowie in Australien. Allein in den USA gibt es inzwischen 300 Gebiete, deren Sauerstoffkonzentration unter den für Fische kritischen Richtwert von 70 Mikromol pro Kilogramm Wasser fällt.

Viele von ihnen liegen in flachen Küstengebieten (weniger als 100 Meter Wassertiefe) und weisen verhältnismäßig schwache Strömungen auf, weshalb die Wassermassen relativ lange an Ort und Stelle verweilen. Unter solchen Bedingungen wachsen im Sommer nicht nur Algen sehr gut; es bildet sich auch eine sehr warme und stabile Deckschicht heraus, welche die Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers erschwert. Durchbrochen wird diese stabile Schichtung nur, wenn Stürme die Küstengewässer aufwühlen und kräftig durchmischen. Im Golf von Mexiko etwa verhinderte Hurrikan Barry im Sommer 2019 die Ausbildung einer rekordverdächtig großen Todeszone. Fachleute wissen mittlerweile aber auch, dass die durchlüftende Wirkung eines Sturmes nicht lange anhält. Meist bilden sich schon innerhalb von einer Woche wieder jene Bedingungen heraus, unter denen die Küstengewässer Sauerstoff verlieren. Und je wärmer Luft und Meer sind, desto früher im Jahr stellen sich diese Bedingungen ein und desto länger bleibt die hypoxische Zone erhalten. Der Klimawandel begünstigt also die Entstehung solcher Zonen.

**Kleiner Anteil, große Wirkung**

Vergleicht man die temperatur- und zirkulationsbedingten Sauerstoffverluste des offenen Ozeans mit den Verlusten der Küstengewässer, so fallen Letztere rechnerisch kaum ins Gewicht. Ihr Anteil ist sogar so klein, dass globale Klima-Ozean-Modelle ihn bei der Berechnung des globalen Sauerstoffbudgets der Meere nahezu vernachlässigen. Die Folgen der küstennahen Todeszonen für die marinen Ökosysteme und den Menschen aber wiegen umso schwerer. Bewegliche Organismen wie Fischschwärme wandern ab oder verändern ihr Verhalten; sesshafte Bodenbewohner wachsen langsamer oder aber sterben. Das gesamte Nahrungsnetz fällt zumindest bis zum Ende des Sommers in großen Teilen in sich zusammen. Marines Leben, wie man es kennt, ist unter diesen Umständen kaum noch möglich. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen auch langfristige Veränderungen: In den betroffenen Küstenregionen sinken die Artenvielfalt und die Gesamtbiomasse; zudem verändert sich die Artenzusammensetzung. Alle drei Entwicklungen schaden vor allem der Fischerei.

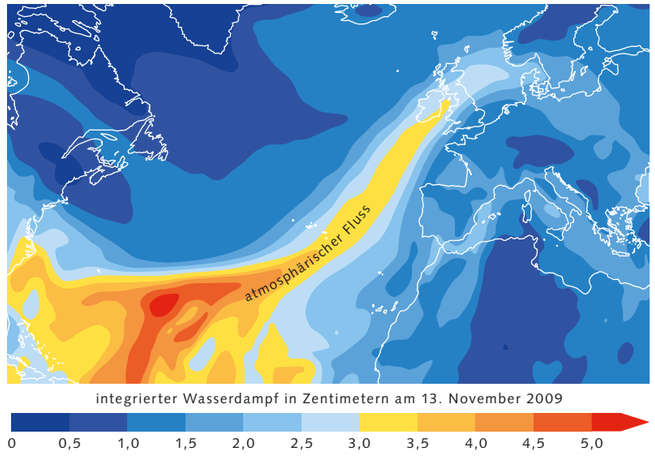
Um dem Sauerstoffverlust in den Küstengebieten Einhalt zu gebieten, bedarf es vieler Maßnahmen. An erster Stelle steht die Reduktion der Nährstoffeinträge. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Landwirtschaft und Tierhaltung entlang der Flussläufe umgestellt werden. Feuchtgebiete und Mangrovenwälder, die organische Partikel herausfiltern, bevor sie das Meer erreichen, müssen restauriert werden. Abwässer dürfen nur noch gründlich gereinigt eingeleitet werden. Dass sich solche koordinierten Maßnahmenpakete auszahlen, zeigt sich unter anderem in den Küstengebieten Nordwesteuropas. Nach Angaben der OSPAR-Kommission gibt es dort inzwischen weniger sauerstoffarme Zonen als noch in den Jahren 2001 bis 2005.




**2.18 > Die Verfügbarkeit von Sauerstoff entscheidet darüber, welche Lebensformen und -vielfalt in einem Gewässer möglich sind. Küstenforscher berechnen die Sauerstoffkonzentration in Milligramm pro Liter Wasser und wissen mittlerweile, ab welchen Schwellenwerten höheres Leben nach und nach verschwindet.**

**Sauerstoffgehalt**

Der Sauerstoffgehalt des Meeres wird von Wissenschaftlern verschiedener Fachrichtungen in unterschiedlichen Maßeinheiten angegeben. Ozeanografen und Chemiker berechnen die Sauerstoffmenge in Mikromol pro Kilogramm Wasser; Biologen und Küstenforscher dagegen geben sie in Milligramm pro Liter Wasser an. Für Umrechnungen zwischen beiden Einheiten gilt: 1 Milligramm Sauerstoff pro Liter Wasser entspricht in etwa 30 Mikromol Sauerstoff pro Kilogramm Wasser.




**2.19 > Atmosphärische Flüsse sind Luftströmungen, die in etwa so viel Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf transportieren, wie mancher Fluss an Wasser führt – daher auch die Bezeichnung. Die hier gezeigte Strömung verursachte im November 2009 extremen Regen in Großbritannien.**

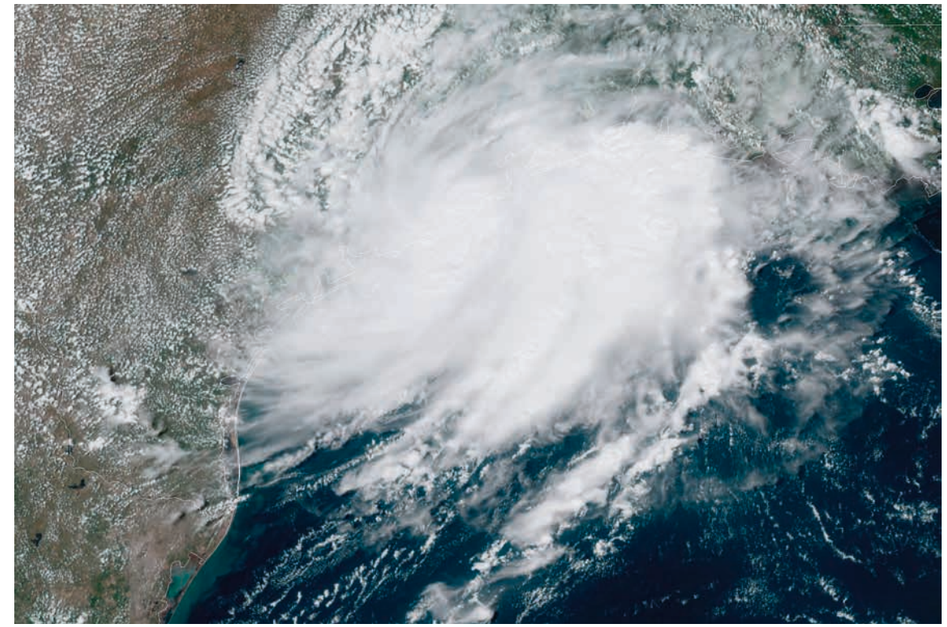
einigen Regionen seltener regnen. Wenn dann aber mal Niederschlag fällt, wird der Himmel seine Schleusen öffnen und innerhalb kurzer Zeit mehr Wasser herabregnen lassen, als die lokale Bevölkerung dies bislang gewohnt ist. Die Überflutungsgefahr steigt, denn tropische und außertropische Stürme werden mehr Feuchtigkeit im Gepäck haben.

Gleiches gilt für die sogenannten atmosphärischen Flüsse (englisch: atmospheric rivers). Als solche werden lange, meist 400 bis 600 Kilometer breite Bänder feuchtigkeitsgesättigter Luft bezeichnet, die Luftfeuchtigkeit (Wasserdampf) aus den Tropen in die mittleren Breiten transportieren – und das sowohl über dem Pazifischen Ozean als auch über dem Atlantischen Ozean. Die meisten atmosphärischen Flüsse sind für den normalen, saisonal typischen Regenfall an den Westküsten Nord- und Südamerikas sowie in Grönland und auf den Britischen Inseln verantwortlich. Im US-Bundesstaat Kalifornien bringen sie 25 bis 50 Prozent des Jahresniederschlages. Atmosphärische Flüsse können aber auch Extremereignisse verursachen, vor allem wenn ihre wassergeladenen Luftmassen an der US-Westküste auf Gebirge treffen und gezwungen sind, aufzusteigen. In diesem Fall treten besonders häufig schwere Regenfälle mit Überschwemmungen auf. Sollten die Luftmassen der atmosphärischen Flüsse wärmer werden, steigt auch die Menge an Feuchtigkeit in ihrem Gepäck. Forscher gehen deshalb davon aus, dass im Zuge des Klimawandels auch die Intensität der von ihnen verursachten Regenfälle zunehmen und die Überschwemmungsgefahr steigen wird.

Intensivere Starkregen sind eine Folge der Meereserwärmung; es gibt aber noch eine zweite Folge: Forscher können mittlerweile belegen, dass die steigenden Wassertemperaturen an der Meeresoberfläche die Zerstörungskraft großer tropischer Stürme verstärken. Das Wirkungsprinzip ist dabei ganz einfach: Hurrikane, Zyklone und Taifune beziehen ihre Energie aus der Temperatur des Meeres unter ihnen – je wärmer das Wasser, desto höhere Windgeschwindigkeiten kann der Sturm entwickeln und desto größer wird seine Zerstörungskraft, wenn er auf Land trifft. Klimamodelle hatten diese Wechselwirkung schon lange aufgezeigt. Den Einfluss des Klimawandels jedoch auch durch Beobachtungen zu verifizieren, das gelang erst im Jahr 2020.

US-amerikanische Wissenschaftler werteten dazu Satellitenaufnahmen von Wirbelstürmen der zurückliegenden 40 Jahre aus und konnten zeigen, dass mit steigender Meerestemperatur auch die Wahrscheinlichkeit zunahm, dass sich ein aufziehender Wirbelsturm in einen zerstörerischen Monstersturm der Kategorie 3 oder höher entwickelte. Die Zerstörungskraft tropischer Wirbelstürme wird nach der Saffir-Simpson-Hurrikan-Windskala bewertet (englisch: Saffir-Simpson hurricane wind scale, SSHWS). Diese leitet das mögliche Schadenspotenzial eines Wirbelsturmes von seiner Windgeschwindigkeit ab und ordnet ihn einer von fünf Kategorien zu. Alle Stürme mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 178 Kilometern pro Stunde (Kategorie 3) gelten demnach als sehr zerstörerischer Hurrikan (englisch: major hurricane).

Mehr Verdunstung und mehr Niederschlag ziehen aber auch Veränderungen an der Meeresoberfläche nach sich, insbesondere was den Salzgehalt betrifft. In Regionen, in denen künftig mehr Wasser verdunstet, als durch Regenfälle wieder hinzukommt, wird das Oberflächenwasser salziger – zum Beispiel im tropischen Teil des Atlantiks und im Mittelmeer. Dort jedoch, wo die Niederschläge größer sein werden als die Verdunstung, wird das Oberflächenwasser aussüßen. Das heißt, sein Salzgehalt wird langfristig abnehmen. Klimaprojektionen zufolge wird Letzteres vor allem im Pazifischen Ozean sowie im Arktischen Ozean der Fall sein.



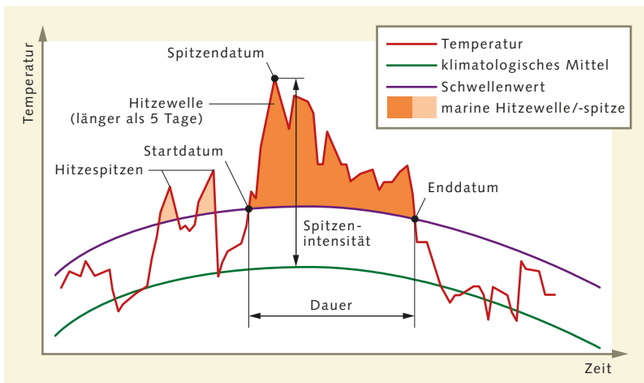
**2.20 > Der tropische Wirbelsturm Imelda trifft am 17. September 2019 auf die Golfküste des US-Bundesstaates Texas. Wenig später regnet es in Teilen von Texas so stark, dass Imelda in der Rangliste der niederschlagsreichsten tropischen Wirbelstürme über den USA Platz sieben einnimmt.**

## Marine Hitzewellen

Ein weiteres Extremereignis, welches inzwischen häufiger auftritt und regelmäßig neue Rekordmarken setzt, sind sogenannte marine Hitzewellen. Als solche bezeichnen Fachleute Phasen, in denen das Wasser in einem bestimmten Meeresgebiet an mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen außergewöhnlich warm ist. Im zurückliegenden Jahrzehnt dokumentierten Wissenschaftler solche Phasen sowohl im offenen Ozean als auch in den Randmeeren und Küstenregionen. Es gab sie im Sommer ebenso wie im Winter, denn ausschlaggebend ist keine bestimmte Temperaturmarke, sondern immer nur die Antwort auf die Frage: Um wie viel Grad Celsius wärmer ist die Wassertemperatur an einem Ort im Vergleich zum Durchschnittswert, der sonst zur selben Jahreszeit an diesem Ort gemessen wurde?

Hitzewellen machen häufig Schlagzeilen, weil sie die Lebensgemeinschaften in den betroffenen Meeresregionen nachhaltig beeinflussen. Prominente Beispiele des zurückliegenden Jahrzehnts sind die Hitzewelle entlang der Westküste Australiens im Jahr 2011, die Mittelmeerhitzewellen von 2012 und 2015 sowie die weltweit als „The Blob“ bekannt gewordene Hitzewelle im Nordpazifik, welche sogar von 2014 bis 2016 andauerte.

Auslöser solcher Warmwasserblasen können ganz unterschiedlicher Art ein. Oft beteiligt sind Meeresströ-




**2.21 > Als Hitzewellen bezeichnen Wissenschaftler Phasen, in denen die Wassertemperatur eines Meeresgebietes an mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen über einem bestimmten Temperaturgrenzwert liegt. Dieser Grenzwert verändert sich mit der Jahreszeit und wird statistisch berechnet.**

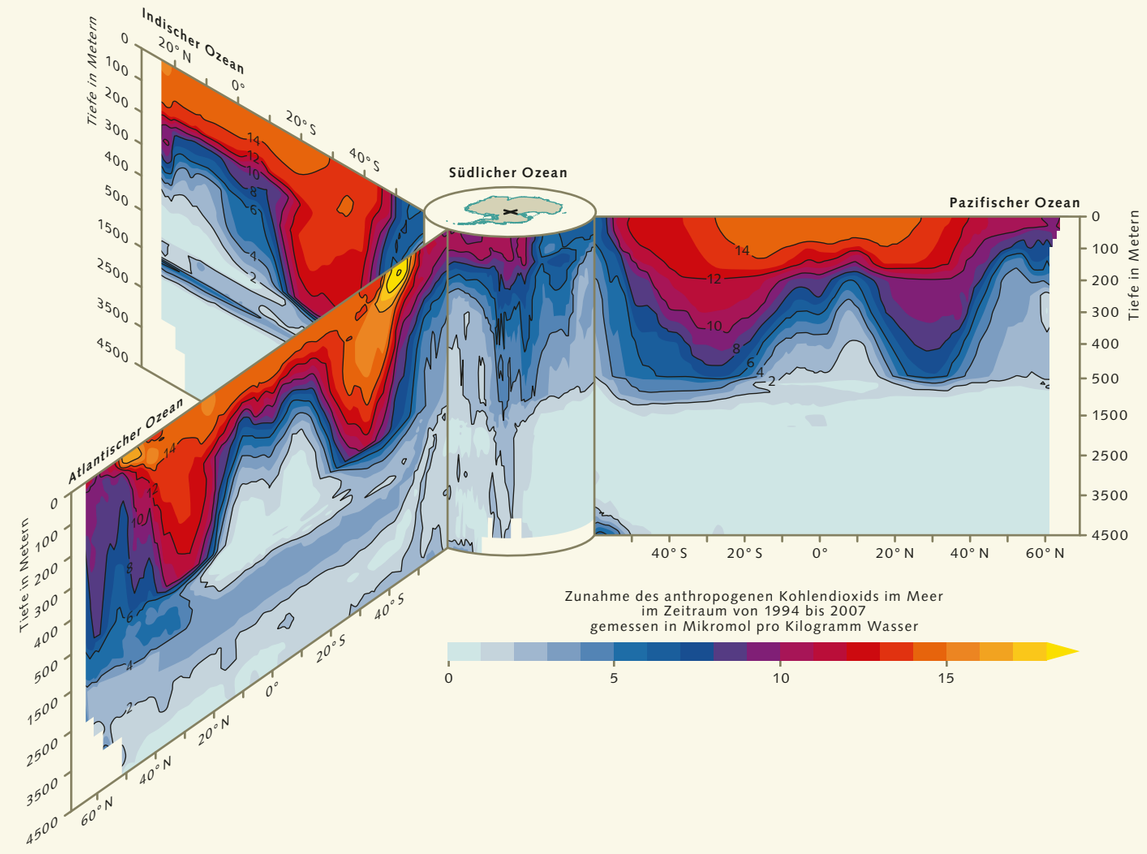
## Der Ozean versauert

Der Ozean speichert nicht nur Wärme, er entzieht der Atmosphäre auch das Treibhausgas Kohlendioxid. Seit Beginn der Industrialisierung haben die Weltmeere 25 Prozent der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen aufgenommen – mit schwerwiegenden Folgen für die Meereschemie. Denn wenn sich Kohlendioxid aus der Atmosphäre im Meerwasser löst, kommt es zu einer chemischen Veränderung des Oberflächenwassers. Sein pH-Wert sinkt, das Wasser wird saurer.

Normalerweise hat Meerwasser einen pH-Wert von 8,2 im Durchschnitt und ist damit eher basisch. Grund dafür sind mineralische Bestandteile im Wasser, sogenannte Kalziumkarbonate wie Calcit und Aragonit, die einst aus verwittertem Gestein an Land gelöst und anschließend ins Meer geschwemmt wurden. Nimmt der Ozean nun aber Kohlendioxid auf (aus der Atmosphäre oder weil Meereslebewesen es ausatmen), löst sich dieses Gas im Gegensatz zu Sauerstoff nicht einfach nur im Wasser. Im Gegenteil – eine Teilmenge des Kohlendioxids reagiert mit dem Wasser, sodass Kohlensäure entsteht. Dieses wiederum zerfällt in Bikarbonate, die sogenannten Salze der Kohlensäure, und Protonen (auch als Wasserstoffionen bezeichnet). Letztere treiben den Säuregehalt des Wassers in die Höhe, der Ozean versauert.

Das Maß für die Konzentration der Wasserstoffionen in einer Lösung ist der sogenannte pH-Wert. Dieser Zahlenwert gibt die Konzentration jedoch als negativen dekadischen Logarithmus an. Das bedeutet, je mehr Wasserstoffionen in einer Lösung vorhanden sind, desto kleiner ist der pH-Wert. Der mittlere pH-Wert der Meeresoberfläche ist seit dem Jahr 1860 von 8,2 auf 8,1 gesunken. Dieser vermeintlich kleine Schritt auf der logarithmischen pH-Skala entspricht einem realen Anstieg des Säuregehalts um 26 Prozent – eine Veränderung, wie sie die Weltmeere und ihre Bewohner in den letzten Jahrmillionen nicht erlebt haben. Mittlerweile reicht das Versauerungssignal in Tiefen von bis zu 2000 Metern. Sollte die Menschheit auch weiterhin so viel Kohlendioxid emittieren wie bisher, wird der pH-Wert der Ozeane bis zum Jahr 2100 voraussichtlich um weitere 0,3 bis 0,4 Einheiten sinken und das Meerwasser um 100 bis 150 Prozent saurer werden. Das heißt nicht, dass die Ozeane tatsächlich sauer sind, denn auch bei Werten um 7,7 bleiben sie chemisch betrachtet basisch, doch sind sie – relativ gesehen – saurer als zuvor.

Wie viel Kohlendioxid sich im Wasser anreichert, hängt unter anderem von der Wassertemperatur ab (Gase lösen sich im kalten Wasser besser), vom Grad der Aussüßung (salzarmes Wasser versauert schneller) sowie vom Sauerstoffverbrauch. In den überdüngten Küstenzonen beispielsweise leben viele Organismen, die große Mengen Sauerstoff veratmen und dementsprechend viel Kohlendioxid freisetzen. Erwärmen sich die Küstengewässer dann auch noch, werden ihre Lebensgemeinschaften auf dreifache Weise unter Druck gesetzt – durch die Erwärmung, die Sauerstoffabnahme und die Versauerung. Da nur wenige Arten diesem geballten Meereswandel gewachsen sind, sprechen Wissenschaftler im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels für den Ozean auch von einem tödlichen Trio.




**2.22 > Im Zeitraum von 1994 bis 2007 hat der Weltozean durchschnittlich 31 Prozent des vom Menschen freigesetzten Kohlendioxids aufgenommen und bis in beachtliche Tiefen eingelagert. Welche Unterschiede es dabei zwischen den großen Ozeanbecken gibt, zeigt diese Grafik. Die schwarzen Linien markieren die schrittweise Abnahme der $CO_2$-Konzentration um jeweils zwei Mikromol Kohlendioxid pro Kilogramm Wasser.**

mungen, die außergewöhnlich warmes Wasser irgendwo konzentrieren. Marine Hitzewellen entstehen aber auch infolge starker Sonneneinstrahlung und hoher Lufttemperaturen. Winde heizen sie unter bestimmten Umständen an; bei anderer Ausgangslage wiederum können Luftbewegungen eine Hitzewelle auch unterdrücken. Außerdem weiß man mittlerweile, dass große Klimazyklen wie zum Beispiel das El-Niño-Phänomen die Wahrscheinlichkeit von Hitzewellen in bestimmten Meeresregionen beträchtlich erhöhen.

Viel entscheidender für die künftige Bilanz aber ist die generelle Erwärmung der Weltmeere im Zuge des Klimawandels. Sie macht das Auftreten von großen Hitzewellen immer wahrscheinlicher, worunter vor allem Meeresbewohner mit geringer Wärmetoleranz stark leiden. Diese stoßen immer häufiger an ihre Temperaturgrenze. Das heißt, ihre Anpassungs- und Überlebenschancen sinken. Die Arten wandern entweder in andere Gefilde ab – oder aber sie sterben aus. Andere Möglichkeiten gibt es für sie nicht.

Auf lange Sicht bedeutet diese Entwicklung grundlegende Veränderungen in den Lebensgemeinschaften des Meeres und somit auch in den Ökosystemfunktionen der Ozeane.

## Keine verlässliche Konstante mehr

Heutzutage verändert der Klimawandel die Weltmeere auf eine Weise, wie die Menschheit es noch nie erlebt hat. Infolge der globalen Erwärmung steigen die Wassertemperaturen kontinuierlich, die Meeresspiegel ebenso – beides sind die deutlichsten marinen Indikatoren der globalen Erwärmung. Gleichzeitig verliert der Ozean Sauerstoff in immer größeren Tiefen und versauert flächendeckend und in einem zunehmenden Maß. Diese physikalischen und chemischen Veränderungen wirken sich unmittelbar auf eine Vielzahl der ozeanischen Ökosystemleistungen aus – etwa auf seine Funktion als verlässlicher Wetterregulator. Durch die Verlagerung windgetriebener Meeresströmungen Richtung Pol etwa gelangt die Wärme des Meeres mittlerweile viel weiter in den Norden und Süden, als dies früher der Fall war, und beeinflusst das Wetter in jenen Regionen. Das Stressorentrio aus Meereserwärmung, Versauerung und Sauerstoffabnahme verändert aber auch die Rahmenbedingungen des Lebens im Meer. Es reduziert die Fähigkeit des Ozeans, Biomasse zu produzieren, und verstärkt die schädliche Wirkung direkter menschlicher Eingriffe in einem Maß, dass das Überleben der marinen Artengemeinschaften vielerorts auf dem Spiel steht.

# Ein Angriff auf die Artenvielfalt

**> Die klimabedingten Veränderungen des Ozeans wirken sich mittlerweile auf alle Lebensgemeinschaften des Meeres aus. Infolgedessen sind viele Meereslebewesen gezwungen, ihre angestammten Territorien zu verlassen. Räuber-Beute-Beziehungen verändern sich, die Produktivität des Ozeans sinkt. Überdies verstärken sich die Folgen des Klimawandels gegenseitig in ihrer Wirkung und schwächen die Widerstandskraft mariner Arten gegenüber weiteren menschengemachten Stressfaktoren. Der Klimawandel, so viel steht mittlerweile fest, entwickelt sich zu einem der treibenden Motoren des Artensterbens im Meer.**

## Die Grenzen der Belastbarkeit

Die Meere sind der größte und artenreichste Lebensraum der Erde. Sie beherbergen schätzungsweise 2,2 Millionen Arten, von denen der Mensch bislang allerdings nur etwas mehr als 200 000 kennt und wissenschaftlich beschrieben hat. Die meisten von ihnen haben sich über lange Zeiträume hinweg an die Lebensbedingungen in ihren Heimatgewässern angepasst. Gemeint sind die vorherrschende Temperatur, der Sauerstoffgehalt, der Säuregrad des Wassers, die natürlichen Rhythmen, in denen Nährstoffe oder aber Futter unter Umständen sogar im Überfluss vorkommt, und wichtige Umweltkomponenten wie zum Beispiel Meeresströmungen, die im Fall vieler Arten dafür verantwortlich sind, dass Laich oder Larven über große Strecken transportiert oder aber über weite Gebiete hinweg verteilt werden. Unter diesen gewohnten Lebensbedingungen wachsen die Meeresbewohner am besten, leben am längsten und reproduzieren sich in einem Maß, das den Fortbestand der Population garantiert.

Diese physikalischen und chemischen Grundpfeiler des Lebens im Meer aber verändern sich derzeit in einem Tempo, wie es die Weltmeere in den zurückliegenden 50 bis 300 Millionen Jahren nicht erlebt haben. Die Auswirkungen des Klimawandels sind mittlerweile in allen Meeren und allen Tiefen zu finden und stellen für die marinen Ökosysteme eine Vielzahl an Risiken dar. Wissenschaftliche Langzeitbeobachtungen zu den Folgen des Klimawandels für die Lebensgemeinschaften des Meeres gibt es in erster Linie aus der nördlichen Hemisphäre. In der Nordsee, dem Mittelmeer und den Meeresgebieten rund um Labrador und Neufundland untersuchen Forscher seit mehreren Jahrzehnten die klimabedingten Veränderungen. Aus der Äquatorregion sowie aus den Meeren der Südhemisphäre stammen mit Ausnahme australischer Beobachtungen nur einige wenige biologische Langzeituntersuchungen, weshalb Forschende auch auf jede Menge Labor- und Feldexperimente sowie auf Modellsimulationen und historische Verbreitungsdaten zurückgreifen, um ein möglichst realistisches Bild von den Auswirkungen des Klimawandels auf das Leben im Meer zu erhalten.

Um zu verstehen, wie und warum marine Lebewesen auf den Klimawandel reagieren, muss man wissen, dass die meisten Meeresbewohner – mit Ausnahme der Vögel und Säugetiere – wechselwarme Tiere sind. Das heißt, ihre Körpertemperatur wird von der Umgebungstemperatur bestimmt. Die Temperaturvorlieben einer Art entsprechen deshalb in der Regel jenen Wassertemperaturen, die in ihrem angestammten Lebensraum über das Jahr verteilt vorherrschen, einschließlich aller jahreszeitlichen Temperaturschwankungen. Das heißt, jeder wechselwarme Meeresbewohner verfügt über eine Temperaturobergrenze und eine Temperaturuntergrenze, bei der er jeweils noch leben und wachsen kann. Den Bereich zwischen beiden Grenzen bezeichnen Wissenschaftler als Temperaturtoleranzfenster oder thermische Nische.

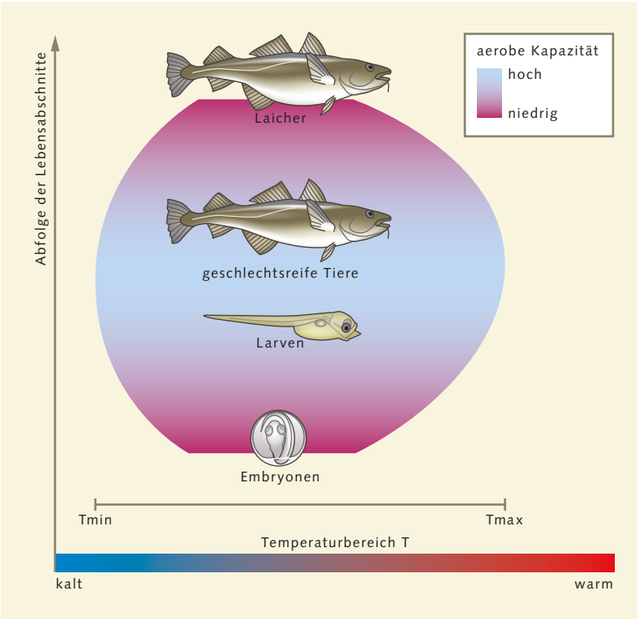
Dieses Fenster ist je nach Art unterschiedlich weit gefasst. Arten aus den gemäßigten Breiten wie der Nordsee haben generell ein breiteres Temperaturfenster. Grund dafür sind die stark ausgeprägten Jahreszeiten in diesen Gebieten. Die hier lebenden Tiere müssen sowohl warme Sommer als auch kalte Winter aushalten. Das Temperaturtoleranzfenster der Lebewesen in den Tropen oder Polargebieten dagegen ist zwei- bis viermal schmaler als jenes der Nordseebewohner. Dafür haben sie sich auf extreme Lebensbedingungen eingestellt. Antarktische Eisfischarten etwa können in bis zu minus 1,8 Grad Celsius kaltem Wasser leben. Ihr Blut enthält Gefrierschutzproteine. Zudem verzichten sie auf den roten Blutfarbstoff Hämoglobin, weil ihr Stoffwechsel niedrig und Sauerstoff im Überfluss vorhanden ist. Aus diesem Grund ist ihr Blut dünnflüssiger, und die Fische benötigen weniger Energie, um es durch den Körper zu pumpen.

Aber: Die Eisfische leben am Limit. Steigt die Temperatur um wenige Grad Celsius, stoßen die Tiere schnell an ihre körperlichen Grenzen. Das bedeutet, sie sind dann nicht mehr in der Lage, genügend Energie zu erzeugen, um alle Funktionsprozesse ihres Körpers aufrechtzuerhalten. Das wiederum liegt daran, dass mit jedem Grad Erwärmung der Energiebedarf der wechselwarmen Organismen exponentiell steigt und damit auch ihr Sauerstoffbedarf, denn ohne Atmung kann keine Energie erzeugt werden. Dieser Anstieg ist bei Arten mit engem Fenster besonders steil. Im Umkehrschluss heißt das also, dass Meeresbewohner nur dann einen Temperaturanstieg in ihrem Lebensraum überstehen, wenn sie in der Lage sind, ihren Körper mit entsprechend mehr Sauerstoff zu versorgen. Gelingt das nicht mehr, kollabiert ihr Herz-Kreislauf-System. Experten sprechen deshalb auch von der sauerstoff- und kapazitätslimitierten Temperaturtoleranz der Lebewesen.

Erschwerend kommt nun noch hinzu, dass sich die Breite des Temperaturtoleranzfensters im Lauf des Lebens eines Fisches, einer Muschel oder aber eines Seesterns verändern kann. In frühen Lebensstadien, das heißt als Embryo im Ei oder als Larve, sind wechselwarme Tiere in der Regel wärmeempfindlicher als in späteren Entwicklungsstufen. Diese Sensibilität nimmt weiter zu, wenn die Tiere nicht nur steigenden Wassertemperaturen ausgesetzt sind, sondern gleichzeitig auch noch mit einem sinkenden pH-Wert (Versauerung) und einer abnehmenden Sauerstoffkonzentration konfrontiert sind. In diesem Fall verstärken sich die Stressfaktoren in ihrer Wirkung oft gegenseitig.

Von Fischen weiß man neuerdings, dass ihnen außergewöhnlich warme Wassertemperaturen vor allem im Embryonalstadium sowie während der Paarungszeit gefährlich werden. Der Grund für diese unterschiedliche Wärmetoleranz liegt in der Anatomie der Fische: Fischembryonen beispielsweise besitzen noch keine Kiemen und kein Herz-Kreislauf-System, mit denen sie ihre Sauerstoffversorgung steigern könnten. Paarungsbereite Fische dagegen bilden Ei- und Spermienzellen aus. Diese zusätzliche Körpermasse muss ebenfalls mit Sauerstoff versorgt werden, weshalb das Herz-Kreislauf-System laichbereiter

**2.23 > Der Vielborster *Peinaleopolynoe orphanae* gehört zu den marinen Arten, die Biologen im Jahr 2020 entdeckten und beschrieben. Der Tiefseebewohner aus dem Ostpazifik trägt einen Panzer aus pink bis goldfarben schillernden Platten.**




**2.24 > Jedes Lebewesen besitzt einen Temperaturbereich, in dem es existieren kann. Dessen Größe wird durch die Fähigkeit begrenzt, den Körper bei steigender Temperatur mit entsprechend mehr Sauerstoff zu versorgen, um die Energieerzeugung aufrechtzuerhalten. Fische sind dazu als geschlechtsreife Tieres deutlich besser in der Lage als im Larvenstadium oder als Laicher.**

Tiere schon bei niedrigeren Temperaturen enorm gefordert ist.

Daraus folgt, dass Fische vor allem in ihrer Fortpflanzungszeit besonders unter dem Klimawandel leiden, denn die Wassertemperatur in ihren Laichgebieten entscheidet über ihren Reproduktionserfolg. Das gilt für marine Arten ebenso wie für Fische in Seen und Flüssen. Als deutsche Meeresbiologen vor Kurzem in einer Studie die Temperaturtoleranzdaten von fast 700 Fischarten über ihre Lebensstadien hinweg auswerteten und diese mit den neuen Klimaszenarien des Weltklimarates (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) abglichen, zeigte sich, dass bei einer Begrenzung der Erderwärmung auf das Pariser Klimaziel von 1,5 Grad Celsius bis zum Jahr 2100 nur etwa zehn Prozent der untersuchten Fischarten ihre angestammten Laichgebiete aufgrund zu warmen Wassers verlassen müssen. Bleiben die Treibhausgasemissionen dagegen auf hohem bis sehr hohem Niveau, wäre mit einer Erwärmung von 4,4 Grad Celsius und mehr zu rechnen. Diese würde dann bis zu 60 Prozent der Fischarten zwingen, aus ihren gewohnten Laichgebieten abzuwandern.

## Schnellerer Artenwandel als an Land

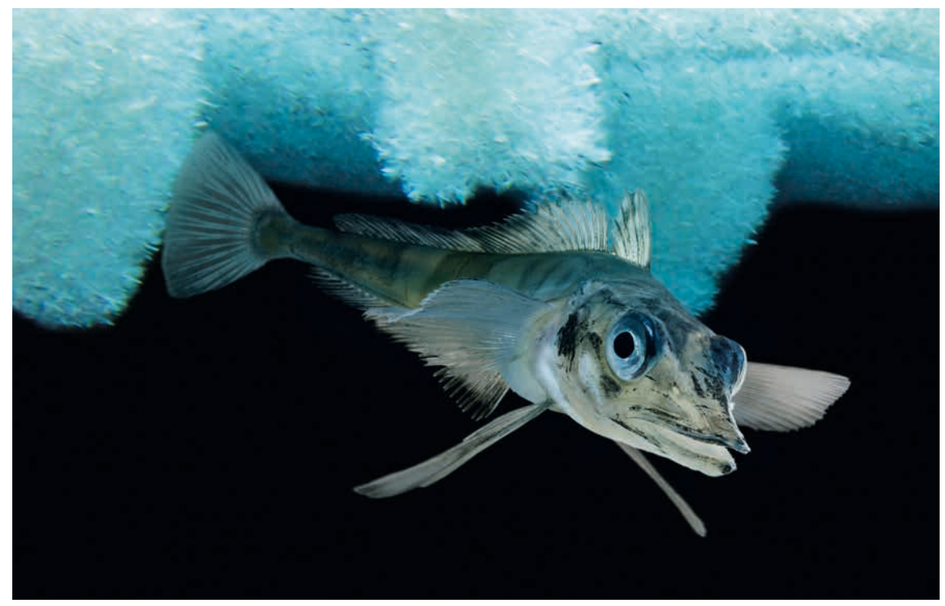
Wie die Fische reagieren alle Lebewesen auf Veränderungen ihrer Umwelt, indem sie zuerst versuchen, ihr individuelles Verhalten an die neuen Bedingungen anzupassen. Wissenschaftler nennen diese Form der Anpassung Akklimatisierung. Die Organismen steigern Atmung und Stoffwechsel, pumpen mehr Blut oder Wasser und Nährstoffe durch den Körper, fressen gegebenenfalls mehr oder wandern in Gebiete ab, in denen die gewohnten Umweltbedingungen vorherrschen. All diese Maßnahmen aber kosten Energie, welche die Lebewesen zusätzlich aufbringen müssen. Gelingt ihnen das, haben sie relativ gute Überlebenschancen. Fehlen dagegen die notwendigen Reserven, gelangen die Individuen möglicherweise schnell an ihre Leistungsgrenze und laufen Gefahr zu sterben.

Wer es jedoch schafft, sich kurz- oder mittelfristig zu akklimatisieren, erhält in der Regel auch die Chance, sich geschlechtlich fortzupflanzen und der eigenen Art zu ermöglichen, sich über mehrere Generationen hinweg genetisch an die neuen Lebensbedingungen anzupassen. Das heißt, vor allem die Lebewesen zeugen Nachwuchs, dessen Erbanlagen unter Umständen derart modifiziert sind, dass die jeweilige Folgegeneration besser mit den neuen Umweltbedingungen zurechtkommt als ihre Eltern- und Großelterngeneration. Diese Form der Anpassung wird genetische Adaption oder auch evolutionäre Anpassung genannt.

Vergleicht man die Lebensgemeinschaften an Land mit den Lebensgemeinschaften des Meeres, offenbaren sich grundlegende Unterschiede, die im Zuge des Klimawandels von Bedeutung sind:

- Die Primärproduzenten des Meeres (Phytoplankton) besitzen viel kürzere Reproduktionszyklen als die Bäume oder das Gras an Land. Während Bäume unter Umständen Jahrhunderte alt werden, erneuern sich die weltweiten Planktonvorkommen etwa 45-mal pro Jahr, also grob geschätzt etwa alle acht Tage. Diese Eigenschaft versetzt das Plankton theoretisch in die Lage, sich im Fall verändernder Umweltbedingungen schneller genetisch anzupassen als etwa Pflanzen an Land.
- Der Anteil wechselwarmer Organismen ist im Meer vergleichsweise hoch, was dazu führt, dass die Artenvielfalt und ihre Verteilungsmuster im Ozean maßgeblich durch die Temperatur bestimmt werden. An Land dagegen spielen auch andere Faktoren wie zum Beispiel die Niederschlagsmenge, aber auch geographische Barrieren eine stärkere Rolle.
- Meeresbewohner haben im Gegensatz zu Landlebewesen so gut wie keine Chance, sich bei Hitzewellen in Höhlen oder an andere schattige und somit kühlere Orte zurückzuziehen. Sie sind den warmen Wassertemperaturen geradezu schutzlos ausgeliefert und müssen deshalb früher die Flucht ergreifen.
- Tropische Arten leben in der Regel in Regionen, deren Umgebungstemperatur von vornherein schon so warm ist, dass sie im oberen Toleranzbereich der jeweiligen Arten liegt und es nur eines ausgesprochen kleinen Temperaturanstieges bedarf, um das Wärmelimit zu übersteigen.
- Beweglichen Meereslebewesen wie Fischen fällt es im Vergleich zu Landlebewesen leichter, ihren angestammten Temperaturen in kühlere Regionen zu folgen, weil sie wenige Hindernisse wie Unterseegebirge, tiefe Gräben oder Wasserströmungen (zum Beispiel Antarktischer Zirkumpolarstrom) überwinden müssen oder aber diese kein echtes Hindernis darstellen. Viele Landlebewesen oder Arten in Seen, Flüssen und Tümpeln dagegen stoßen häufiger auf geografische Barrieren, darunter neuerdings auch vom Menschen genutzte Landflächen, die ihnen ein Weiterkommen oder aber eine Verlagerung ihres Lebensraumes erschweren.

Aus all diesen Gründen geht der wärmebedingte Artenwandel im Meer deutlich schneller vonstatten als an Land. Für die Wissenschaft ist es dabei jedoch im Einzelfall nicht immer ganz einfach, klar zu unterscheiden, welche Reaktionen einer Art oder einer Lebensgemeinschaft sich einzig und allein auf Klimafolgen wie steigende Wassertemperaturen, Versauerung oder Sauerstoffverlust beziehen – und wann auch andere, menschengemachte Stressfaktoren wie Fischerei, Rohstoffabbau und Meeresverschmutzung eine Rolle spielen. Fakt ist nämlich auch, dass unter Druck stehende marine Lebensgemeinschaften empfindlicher



**2.25 > Meereis und Wassertemperaturen bis dicht an den Gefrierpunkt machen dem antarktischen Schwarzflossen-Eisfisch *(Chaenocephalus aceratu)* wenig aus. Er ist perfekt an das Leben im Südpolarmeer angepasst. Seine Wärmetoleranz dagegen ist im Vergleich zu Fischen aus den gemäßigten Breiten winzig.**

**2.26 > Weil ihre Beutefische wärmebedingt Richtung Norden abwandern, müssen arktische Seevögel wie die Elfenbeinmöwe *(Pagophila eburnea)* heutzutage weiter auf das Meer hinausfliegen als früher. Das kostet wertvolle Energie und lässt den Nachwuchs häufiger Hunger leiden.**

auf den Klimawandel reagieren als jene, die nicht befischt werden oder hoher Verschmutzung oder Überdüngung ausgesetzt sind.

## Flucht vor der Wärme

Die deutlichste Reaktion mariner Lebewesen auf die steigenden Wassertemperaturen ist die Verlagerung ihres Lebensraumes in Gebiete, in denen die Tiere und Pflanzen weiterhin ihre gewohnten Umgebungstemperaturen vorfinden. Eine solche Verlagerung kann auf aktive oder auch auf passive Weise erfolgen. Aktiv heißt, dass Fische, Krebse und andere bewegliche Meereslebewesen auf der Flucht vor widrigen Umweltbedingungen eigenständig in neue Lebensräume abwandern. Eine passive Verlagerung dagegen findet statt, wenn zum Beispiel die Sporen, Eier oder Larven einer Art durch veränderte Meeresströmungen in Gebiete getragen werden, in denen es diese Art bislang nicht gab, sie sich aber aufgrund geeigneter Umweltbedingungen neu ansiedeln und fortpflanzen kann. Von einer Verlagerung des Lebensraumes sprechen Forscher allerdings auch dann, wenn sich Arten aufgrund steigender Wassertemperaturen nur noch im kühleren Teil ihres angestammten Verbreitungsgebietes fortpflanzen und ausbreiten, während sie im wärmeren Teil aussterben. Denn auch unter diesen Umständen verschieben sich die Grenzen des von ihnen besiedelten Gebietes.

Die Flucht vor der vom Menschen verursachten Wärme hat bereits vor mehr als einem halben Jahrhundert begonnen. Seit den 1950er-Jahren verlagern Meeresorganismen ihren Lebensraum polwärts. Das heißt, Populationen, die bislang nördlich des Äquators lebten, wandern Richtung Norden; Populationen südlich davon bewegen sich Richtung Süden. Die Artenvielfalt in den warmen Tropen dagegen nimmt seither deutlich ab. Diese Entwicklung beobachten Wissenschaftler über alle Organismengruppen hinweg, vom einzelligen Plankton bis zu großen Fischen. Die Forscher können sogar die Geschwindigkeit dieser Verlagerung nachvollziehen. Sie beträgt bislang etwa 51,5 Kilometer pro Jahrzehnt für bewegliche Arten. Am Meeresboden lebende Organismen dagegen sind etwas langsamer. Ihre Verbreitungsgrenzen verschieben sich in einem Zeitraum von zehn Jahren um durchschnittlich 29 Kilometer. Vergleicht man die Migrationsstatistik aller Organismengruppen an Land und im Wasser miteinander, verlagern Meereslebewesen ihren Lebensraum in etwa sechsmal schneller Richtung Pol als Lebewesen an Land. Diese Zahlen dürfen allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass Pflanzen und Tiere durchaus unterschiedlich auf die Meereserwärmung reagieren, selbst wenn die Arten miteinander verwandt sind.

Besonders starke Abwanderungsbewegungen beobachten Wissenschaftler in den Tropen, wo die Arten aufgrund der steigenden Wassertemperaturen in großer Zahl Richtung Norden oder Süden flüchten. Infolgedessen registrieren Wissenschaftler eine Zunahme der Artenvielfalt in den Randzonen der Tropen, wo die Klimaflüchtlinge nun mit den einheimischen Arten um Nahrung und Lebensraum konkurrieren. Oft sind die Neuankömmlinge dabei im Vorteil, denn auch in den subtropischen Meeresgebieten steigt die Wassertemperatur. Die Folge ist ein Artenwandel der subtropischen Lebensgemeinschaften hin zu mehr tropischen Meereslebewesen. Forscher bezeichnen diese Entwicklung auch als Tropikalisierung (englisch: tropicalization).

In Meeresregionen, wo die Geografie eine Abwanderung in höhere Breiten verhindert – so zum Beispiel im Mittelmeer oder im Golf von Mexiko –, treiben die steigenden Temperaturen im oberen Teil der Wassersäule die beweglichen Meeresbewohner in größere Tiefe. Da das Tiefenwasser in der Regel deutlich kühler ist als das Wasser in der Deckschicht, müssen diese Arten in der Regel gar nicht weit abwandern, um gewohnte Temperaturbedingungen vorzufinden. Fraglich ist allerdings, ob die Arten in größerer Wassertiefe ausreichend Nahrung finden. Für Algen und Wasserpflanzen verschlechtert sich zudem das Lichtangebot mit zunehmender Tiefe.

Ob die Flucht vor der Wärme gelingt, hängt demzufolge nicht nur von der individuellen Beweglichkeit einer Art ab. Vielmehr entscheidet ein Zusammenspiel aus Klima- und anderen Umweltfaktoren darüber, inwiefern Meeresbewohner ihren Lebensraum verlagern können. Zu diesen Faktoren zählen unter anderem:

- lokale Temperatur- und Sauerstoffgradienten;
- Meeresströmungen, die Eier oder Larven in neue Regionen tragen;

- die Gestalt und Tiefe des Meeresbodens (Bathymetrie) für jene Arten, die nur einen Teil oder ihr gesamtes Leben am Meeresgrund verbringen;
- die Verfügbarkeit von Nährstoffen oder Nahrung, geeigneten Laichplätzen oder Hartsubstraten, um darauf zu siedeln;
- die Existenz neuer und alter Fressfeinde sowie
- vom Menschen verursachte Stressoren wie etwa die Fischerei, die Schifffahrt, der Rohstoffabbau und die Meeresverschmutzung.

Besonders wenig Rückzugsoptionen bleiben kälteliebenden oder an das Meereis gebundenen Arten wie den antarktischen Eisfischen oder dem Polardorsch, einer Schlüsselart im marinen Ökosystem der Arktis. Er besitzt nicht nur eine vergleichsweise geringe Wärmetoleranz und ist deshalb selten in Regionen mit einer Wassertemperatur von mehr als drei Grad Celsius zu finden. Sein Nachwuchs ist zudem auf das arktische Meereis angewiesen. Es bietet den Jungfischen Schutz und reichlich Nahrung in Form von Eisalgen und Zooplankton. Die sommerliche Meereisfläche auf dem Arktischen Ozean aber ist seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1979 um etwa 40 Prozent geschrumpft, wodurch sich zum einen der Lebensraum für junge Polardorsche verkleinert. Zum anderen steht den Jungfischen auch weniger Nahrung zur Verfügung, weshalb Wissenschaftler davon ausgehen, dass sich das Wachstum der Tiere verzögern und ihre durchschnittliche Körpergröße abnehmen wird.

## Wärmebedingte Umwälzung der Ökosysteme

Weil Meereslebewesen auf ganz individuelle Weise und in ihrem eigenen Tempo auf die steigenden Temperaturen reagieren, kommt es vielerorts zu einer weitreichenden Umwälzung der Lebensgemeinschaften. Lang bestehende Räuber-Beute-Beziehungen zerbrechen; seit Jahrtausenden gewohnte Abläufe greifen zeitlich nicht mehr wie Zahnräder ineinander. Ein plakatives Beispiel dafür ist der Meeresfrühling, der in den hohen und mittleren Breiten inzwischen viel früher im Jahr Einzug hält als noch vor einigen Jahrzehnten. Das heißt, Algen vermehren sich temperaturbedingt immer früher – pro Jahrzehnt um durchschnittlich 4,4 Tage.

Einstige Nutznießer dieser Algenblüten wie Fische, Muscheln und viele andere Meeresbewohner aber haben enorme Schwierigkeiten, ihren Fortpflanzungsrhythmus ebenso schnell umzustellen. Infolgedessen geht ihr Nachwuchs unter Umständen erst dann auf die Futtersuche, wenn die Algenblüten bereits wieder abgeklungen sind.

Vor ähnlichen Problemen stehen Seevögel, deren Beutearten polwärts abgewandert sind oder aufgrund verpasster Algenblüten zu wenig Nachwuchs produzieren und in ihrem Bestand gefährdet sind. Die Vögel müssen dann viel weiter auf das Meer hinausfliegen oder aber mehr Zeit auf See verbringen, um Beute zu machen. Am Ende ist ihre Jagdausbeute zu gering, als dass sie die Mäuler ihrer Jungen stopfen könnten. Der Nachwuchs verhungert.

Sinkende Bruterfolge infolge steigender Wassertemperaturen beobachten Forscher unter anderem bei Eissturmvögeln, Atlantiksturmtauchern und Dreizehenmöwen im Nordostatlantik. Im Südlichen Ozean dagegen haben die Bruterfolge der Wander- und Laysanalbatrosse klimabedingt zugenommen. Die Vögel profitieren sowohl von der Zunahme und Südverlagerung der Westwinde über dem Südpolarmeer als auch von der temperaturbedingten Artenwanderung Richtung Pol. Als Langstreckensegelflieger nutzen Albatrosse den Wind, um zu ihren Fischgründen zu gelangen. Weil die Westwinde nun aber stärker wehen und die Fischgründe der Albatrosse dichter an den antarktischen Kontinent herangerückt sind, steigt die Jagdeffizienz der Vögel, was ihrem Nachwuchs sehr zugutekommt.

Meeresreptilien wie Schildkröten und Schlangen trifft die Erderwärmung vor allem in ihrer empfindlichsten Lebensphase – als Embryo im Ei. Die Umgebungstemperatur ihres Geleges bestimmt nämlich nicht nur das Geschlecht der Jungtiere, sondern auch ihre Größe, ihren Entwicklungsstand zum Zeitpunkt des Schlüpfens sowie ihre generelle Leistungsfähigkeit. Ist der Sand während der Inkubation von Schildkröteneiern lediglich ein bis vier Grad Celsius wärmer als normal (29 Grad Celsius für ein Geschlechterverhältnis von 50:50), schlüpfen mehr Weibchen aus dem Ei und deutlich weniger Männchen oder gar keine – eine Entwicklung, die langfristig zum Aussterben der Art führt.

**2.27 > Das Geschlecht und die Fitness frisch geschlüpfter Lederschildkröten hängt von der Umgebungstemperatur des Schildkrötengeleges ab. Ist der Sand während der Inkubationszeit ein bis vier Grad Celsius wärmer als normal, schlüpfen kaum noch Männchen aus dem Ei.**

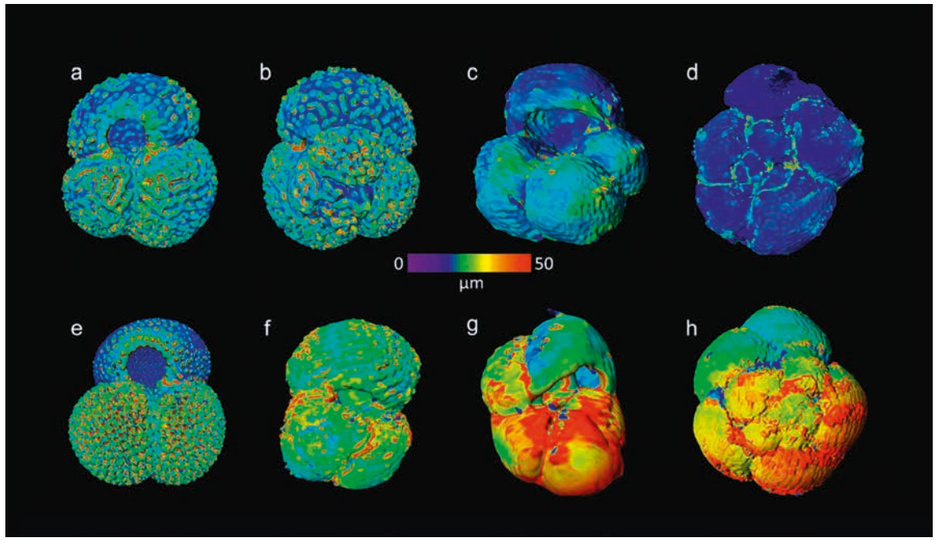
## Das zweite Gesicht des Kohlendioxids

Die Meereserwärmung ist bis heute der weitreichendste Klima-Stressfaktor für die Lebensgemeinschaften des Ozeans und damit der Hauptantrieb des Artenwandels im Meer. Parallel dazu aber laufen weitere Reaktionen ab, welche die Lebensbedingungen in allen Ozeanbecken verändern. Eine von ihnen, die zunehmende Ozeanversauerung, stand in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten besonders im Mittelpunkt der Forschung, weshalb man heute weiß, dass Meereslebewesen unterschiedlich auf kohlendioxidreiches Wasser reagieren.

Zu den Versauerungsgewinnern könnte man das sogenannte Picophytoplankton zählen. Die Kleinsten unter den Phytoplanktonarten sind zwar nur zwischen 0,2 und zwei Mikrometer (der tausendste Teil eines Millimeters) groß, doch in vielen Meeresgebieten sind sie die häufigsten Primärproduzenten – unter anderem weil sie sich auch in Wassermassen mit geringer Nährstoffkonzentration gut vermehren. In verschiedenen Feldexperimenten zur Ozeanversauerung zeigte sich nun, dass die winzigen Algen das erhöhte Kohlendioxidangebot im Meerwasser als Wachstumsbeschleuniger nutzen. Sie wuchsen schneller und bauten mehr Biomasse auf.

Auf der Verliererseite dagegen stehen zum Beispiel viele jener Meeresleben, die wie Fische im Wasser atmen. Kohlendioxidreiches Meerwasser führt nämlich dazu, dass auch die Kohlendioxidkonzentration in den Körperflüssigkeiten der Tiere steigt. Dadurch wird unter anderem der Transport von Stoffen durch die Zellmembran beeinträchtigt. Bei Fischen, die für Forschungszwecke in kohlendioxidreichem Wasser gehalten wurden, veränderte sich die Sinneswahrnehmung. Die Tiere hörten und sahen schlechter und wichen Fressfeinden weniger geschickt aus. Kabeljaularven, die in sehr kohlendioxidreichem Wasser aufgezogen wurden, zeigten Schädigungen wichtiger Organe wie Leber, Nieren und Bauchspeicheldrüse. Außerdem verdoppelte sich die Sterblichkeitsrate der Jungtiere in der kritischen Phase zwischen dem Schlüpfen aus dem Ei und der Ausbildung funktionierender Kiemen.

Heringe wiederum erwiesen sich in ähnlichen Experimenten als deutlich widerstandfähiger gegenüber




**2.28 > Eine Folge der Ozeanversauerung: Die Kalkschalen von Foraminiferen, die vor ungefähr 150 Jahren lebten (untere Reihe, wärmere Farben), waren um bis zu 76 Prozent dicker als jene heute lebender Artgenossen (obere Reihe).**

pH-Wert-Veränderungen des Meerwassers. Eine Erklärung dafür könnte in der Lebensweise der Fische liegen. Heringe laichen meist in der Nähe des Meeresbodens, wo Mikroorganismen stetig herunterrieselnde Biomasse zersetzen und deshalb auf natürliche Weise höhere Kohlendioxidkonzentrationen vorherrschen als an der Meeresoberfläche. Die Tiere sind somit vermutlich schon besser angepasst an einen sich ändernden pH-Wert des Meerwassers als Fischarten, die wie der Kabeljau nah an der Wasseroberfläche laichen.

Eine besondere Gefahr stellt die Ozeanversauerung für kalkbildende Organismen wie Muscheln, Korallen, Stachelhäuter oder Planktonarten wie Coccolithophoriden (Kalkalgen), Foraminiferen (Kammerlinge) und Flügelschnecken dar. Denn sie alle benötigen Kalziumkarbonate, um ihre Schalen und Skelette zu bilden. Die Konzentration des Karbonats im Meer und in den Körperflüssigkeiten sinkt jedoch mit zunehmender Versauerung – es sei denn, sie verfügen über eine gute Säure-Basen-Regulation. Das heißt für die Organismen: Je saurer das Wasser wird, desto mehr Aufwand müssen sie betreiben, um Kalkschalen und Skelette aufzubauen. Langfristig sinken demzufolge entweder die Schalendicke, die Größe, das Gewicht oder die Leistungsfähigkeit der Meereslebewesen. Mit zunehmender Versauerung steigt zudem die Wahrscheinlichkeit, dass das kohlendioxidreiche Wasser Muschelschalen, Schneckenhäuser oder Korallenskelette angreift und sie beschädigt oder aber sogar vollständig zersetzt.

Wie hoch der Druck ist, dem die Meereslebewesen aufgrund der zunehmenden Versauerung ausgesetzt sind, zeigen Forschungsergebnisse britischer Wissenschaftler, die vor Kurzem Zooplanktonproben von der legendären Challenger-Expedition (1872 bis 1876) mit Probenmaterial der Tara-Oceans-Expedition aus den Jahren 2009 bis 2016 verglichen. Dabei stellten sie fest, dass die vor mehr als 150 Jahren im Ostpazifik gesammelten Foraminiferen bis zu 76 Prozent dickere Kalkschalen besaßen als jene, die im zurückliegenden Jahrzehnt im selben Meeresgebiet gefangen wurden.

Doch nicht nur Meereswinzlinge sind betroffen. Ein deutsch-südafrikanisches Forscherteam fand in einer Laborstudie heraus, dass selbst Meeresräuber wie Haie unter der zunehmenden Versauerung leiden werden. Halten sich die Tiere über mehrere Wochen in Wassermassen mit einem pH-Wert von 7,3 oder niedriger auf – normal sind 8,2 –, nehmen sowohl ihre winzigen zahnförmigen Hautplättchen als auch ihre Zähne Schaden. Auf diese Weise könnten langfristig sowohl das Schwimmverhalten als auch die Jagdausbeute der Raubfische beeinträchtigt werden.

Ein Absinken des mittleren pH-Wertes im Meer auf 7,3 ist bei ungebremsten Kohlendioxidemissionen eigentlich erst für das Jahr 2300 vorausgesagt. In sogenannten Auftriebsgebieten wie vor der Süd- und Westküste Südafrikas oder vor der US-Pazifikküste messen Forscher jedoch schon heute gelegentlich derart niedrige Werte. Meist handelt es sich dabei um kalte, nährstoffreiche und gleichzeitig sauerstoffarme und kohlendioxidreiche Wassermassen mit einem pH-Wert von 7,4 bis 7,6, die bei bestimmten Wind- und Strömungsverhältnissen aus der Tiefe aufsteigen und dabei in die Küstenbereiche gelangen. Dort lösen sie aufgrund ihres Nährstoffreichtums regelmäßig große Planktonblüten aus. Sterben diese ab, zersetzen Mikroben die Pflanzenreste und reichern dabei das ohnehin schon kohlendioxidreiche Wasser noch weiter mit Kohlendioxid an. Unter diesen Umständen kann der pH-Wert des Wassers zumindest vor der Küste Südafrikas für wenige Tage sogar auf ein Extremminimum von 6,6 sinken.

## Weniger Sauerstoff, weniger Energie

Die meisten mehrzelligen Meereslebewesen brauchen Sauerstoff, um Energie für sämtliche Lebensprozesse zu erzeugen. Vögel und Meeressäuger wie Wale oder Seelöwen atmen diesen mit der Luft ein. Alle anderen ziehen ihren Atemsauerstoff aus dem Wasser, dessen Sauerstoffgehalt in kälteren Regionen in der Regel höher ist als in wärmeren. Seit den 1950er-Jahren aber nimmt die Menge des im Meerwasser gelösten Sauerstoffs im Zuge des Klimawandels ab – im offenen Ozean ebenso wie in den Küstengewässern.

Infolgedessen haben sich in allen Weltmeeren die sogenannten Sauerstoffminimumzonen (Oxygen Minimum Zones, OMZ) ausgedehnt. Als solche werden Wasserschichten in 100 bis 1000 Meter Tiefe bezeichnet, deren Sauerstoffkonzentration extrem weit unter dem Hypoxie-Grenzwert von etwa 70 Mikromol pro Kilogramm Wasser liegt. Im Indischen und Pazifischen Ozean weisen diese Minimumzonen in der Regel einen Sauerstoffgehalt von weniger als 20 Mikromol pro Kilogramm Wasser auf; im Atlantischen Ozean liegt er meist unterhalb der 45-Mikromol-Marke.

Wie lebensfeindlich diese Umweltbedingungen sind, wird deutlich, wenn man bedenkt, dass viele Meereslebewesen schon bei einem Sauerstoffgehalt von 60 bis 120 Mikromol pro Kilogramm Wasser Schwierigkeiten bekommen, ihren Körper mit ausreichend Sauerstoff zu versorgen. Gerade größere, energiehungrige Organismen wie Haie oder Thunfische können in Meeresgebieten oder Wassermassen mit einer Sauerstoffkonzentration von weniger als 70 Mikromol pro Kilogramm Wasser nicht mehr existieren. Sie meiden diese Gebiete.

Kommt das Lebenselixier Sauerstoff nur noch in so geringer Konzentration vor, leidet das Meeresleben auf allen Ebenen – angefangen bei den Prozessen in einzelnen Zellen bis hin zu den Wechselwirkungen im Gesamtökosystem. Das Leistungsvermögen vor allem der Tiere sinkt und mit ihm ihre Überlebenschance. Sauerstoffarmut verringert zum Beispiel den Fortpflanzungserfolg vieler Arten. Oft sind die Lebewesen in sauerstoffarmen Zonen auch gar nicht mehr in der Lage, sich zu paaren und Nachwuchs zu zeugen, weshalb die Bestände einbrechen. Tiere, die häufig kurzen Phasen des Sauerstoffmangels ausgesetzt sind, weisen ein geschwächtes Immunsystem auf und können sich weniger effektiv gegen Krankheiten und Parasiten wehren. Sie wachsen auch deutlich weniger, weshalb Forscher unter anderem davon ausgehen, dass die Zahl großer, stattlicher Raubfische langfristig abnehmen wird.

Die meisten beweglichen Meeresbewohner ergreifen die Flucht, wenn der Sauerstoffgehalt in ihrem angestammten Lebensraum unter den artspezifischen Schwellenwert sinkt. Diese Reaktion führt zum Beispiel dazu, dass sich die Tiere in den Randzonen konzentrieren, dort stärker um Nahrung konkurrieren und für Fischer leichter zu fangen sind. Die hohen Fangzahlen der Fischereiflotte Perus etwa sind auch darauf zurückzuführen, dass eine in mittlerer Wassertiefe liegende Sauerstoffminimumzone innerhalb des Perustroms die riesigen Schwärme der Peruanischen Sardelle *(Engraulis ringens)* daran hindert, in größere Tiefe abzuwandern. Stattdessen verweilen die Fische in Nähe der Meeresoberfläche, wo sie deutlich leichter und effizienter gefangen werden können.

Eine einengende Wirkung haben wachsende Sauerstoffminimumzonen im Tiefenwasser auch auf Makohaie *(Isurus oxyrinchus)*, Blaue Marline *(Makaira nigricans)* und Segelfische *(Istiophorus albicans)*. Die Räuber des offenen Ozeans sind eigentlich bekannt dafür, dass sie regelmäßig in größere Tiefen hinabtauchen, um dort Fische und Kalmare zu jagen. Im östlichen tropischen Pazifik aber reichen diese Beutezüge bei Weitem nicht so tief hinab wie im westlichen Atlantik. Der Grund: Den Räubern geht im Ostpazifik aufgrund einer stärker ausgeprägten Sauerstoffminimumzone in der Tiefe eher der Sauerstoff aus. Im Westatlantik dagegen ist der Sauerstoffgehalt bis in größere Wassertiefe ausreichend. Als Wissenschaftler das Jagdverhalten Blauer Marline im östlichen tropischen Atlantik untersuchten, stellten sie fest, dass eine sich ausweitende Sauerstoffminimumzone im Tiefenwasser die Fische veranlasste, ihre Tauchtiefe zu reduzieren – und zwar um einen Meter pro Jahr. Über den gesamten Untersuchungszeitraum gerechnet (1960 bis 2010) schrumpfte der Lebensraum der Raubfische somit um 15 Prozent.

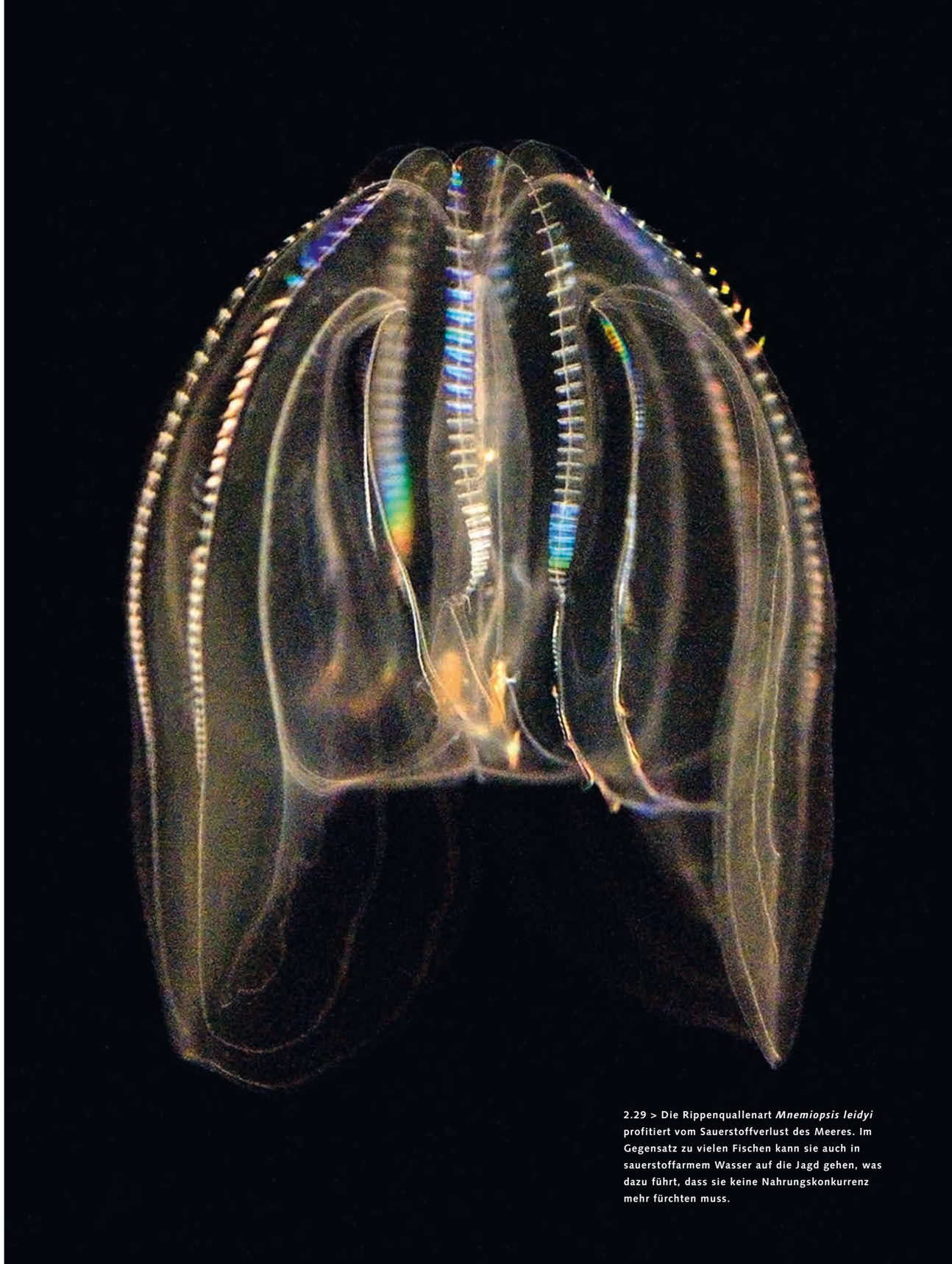
Bilden sich sauerstoffarme Zonen am Meeresboden aus oder reichen sie bis in diese Tiefe, kann es passieren, dass Bodenbewohner ihre Höhlen und Verstecke verlassen und auf den höchstmöglichen Punkt in der Umgebung klettern – in der Hoffnung, die höhergelegenen Wasserschichten würden mehr Sauerstoff enthalten. Durch dieses Verhalten werden sie zur leichten Beute für Räuber. Dieses Risiko aber nehmen die Tiere meistens in Kauf, denn ihnen bleibt tatsächlich nur eine einzige Alternative – der Erstickungstod.

Während im Zuge der weltweiten Sauerstoffabnahme in den Meeren der Lebensraum für Arten mit hohem Sauerstoffbedarf abnimmt, profitieren Lebewesen mit geringem Sauerstoffbedarf sogar von den hypoxischen Zonen. Diese eignen sich zum einen als Rückzugsort, weil potenzielle Feinde – meist Räuber mit höherem Sauerstoffbedarf – nicht folgen können. Zum anderen offerieren sie Nahrungsvorteile für einzelne Arten. Die Rippenquallenart *Mnemiopsis leidyi* beispielsweise kommt auch in der Chesapeake Bay, der größten Flussmündung der USA, vor und verträgt deutlich geringere Sauerstoffkonzentrationen als alle Fische, mit denen sie normalerweise um Nahrung konkurriert. Verwandeln sich nun im Sommer große Teile der Chesapeake Bay in eine sauerstoffarme Zone, kann die Qualle auch dann noch auf die Jagd gehen, wenn ihre Nahrungskonkurrenten das Gebiet längst verlassen haben.

## Das tödliche Trio und seine Gefolgschaft

Im Vergleich zu den direkten Eingriffen des Menschen in das Meer stellen die Folgen des Klimawandels bislang immer noch den kleineren Stressfaktor dar. Der Druck aber, den diese mittlerweile auf die marinen Lebensgemeinschaften ausüben, wächst stetig. Nach Auffassung einiger Wissenschaftler wird der Klimawandel in Kürze die treibende Kraft des globalen Artensterbens sein. Im Ozean beeinflusst er die Lebensgemeinschaften vor allem dort, wo die physikalischen und chemischen Veränderungen gleichzeitig ablaufen und sich das tödliche Trio aus steigenden Wassertemperaturen, einer zunehmenden Ozeanversauerung und sinkender Sauerstoffkonzentrationen durch Wechselwirkungen verstärkt. Werden die Artengemeinschaften unter diesen Umständen auch noch von Extremereignissen wie tropischen Wirbelstürmen, marinen Hitzewellen oder aber Überflutungen mit der dazugehörigen Küstenerosion getroffen, steigt das Schadensausmaß um ein Vielfaches. Lokale Massensterben sind dann nicht mehr auszuschließen. Außerdem wächst die Gefahr, dass die Ökosysteme eine Schwelle oder einen sogenannten Kipppunkt erreichen, ab dem eine Erholung der Lebensgemeinschaften ausgeschlossen ist und Veränderungen somit unumkehrbar werden.

Hurrikan Dorian beispielsweise hinterließ eine Spur der Verwüstung in den küstennahen Korallenriffen der Bahamas, als er Anfang September 2019 mit Spitzenwindgeschwindigkeiten von 290 Kilometern pro Stunde über den Norden der Karibik zog. Nach zwei schweren Sturmtagen waren 25 bis 30 Prozent der Flachwasserkorallenriffe schwer beschädigt. Wind und Wellen hatten Korallenkolonien umgeworfen und entwurzelte Bäume in die empfindlichen Riffstrukturen gerammt. Vom Sturm aufgewirbelte Sedimente begruben Riffabschnitte unter einer Schicht aus Sand, sodass die Korallen zu ersticken drohten. Außerdem zeigten die Riffe vielerorts Anzeichen einer Bleiche, die Forscher unter anderem auf einen Temperaturschock zurückführten. Darüber hinaus fehlten



**2.29 > Die Rippenquallenart *Mnemiopsis leidyi* profitiert vom Sauerstoffverlust des Meeres. Im Gegensatz zu vielen Fischen kann sie auch in sauerstoffarmem Wasser auf die Jagd gehen, was dazu führt, dass sie keine Nahrungskonkurrenz mehr fürchten muss.**

**2.30 > Sturmfolgen: Als Hurrikan Dorian Anfang September 2019 über den Bahamas tobte, brach dieser große Korallenstock (Fleckenriff) im Great Abaco Barrier Reef auseinander.**

nach dem Sturm viele der für die Riffe überlebenswichtigen Fischarten. Ob sich die Tiere in tiefere Gewässer zurückgezogen hatten oder aber während des Hurrikans verletzt oder getötet worden waren, konnten die Wissenschaftler bei ihrer ersten Schadensanalyse nicht herausfinden. Fest stand jedoch, dass die geschädigten Riffe mehrere Jahrzehnte brauchen werden, um sich von den Sturmfolgen zu erholen – vorausgesetzt, der Klimawandel erlaubt es ihnen.

Das fatale Zusammenspiel aus Meereserwärmung, Versauerung, Sauerstoffverlusten und Extremereignissen bedroht mittlerweile die marine Artenvielfalt in allen Teilen des Weltozeans. Wissenschaftler sprechen deshalb auch von einer Kaskadenwirkung der Klimafolgen (englisch: cascading impacts). Reagieren eine oder mehrere Arten eines Nahrungsnetzes auf den klimabedingten Druck, beginnt eine Kettenreaktion, die Veränderungen auf allen Ebenen dieses Ökosystems hervorruft. Immer öfter entstehen dabei auch ganz neue Artengemeinschaften oder -konstellationen, bei denen noch fraglich ist, inwieweit sie zu den Ökosystemleistungen des Meeres beitragen werden.

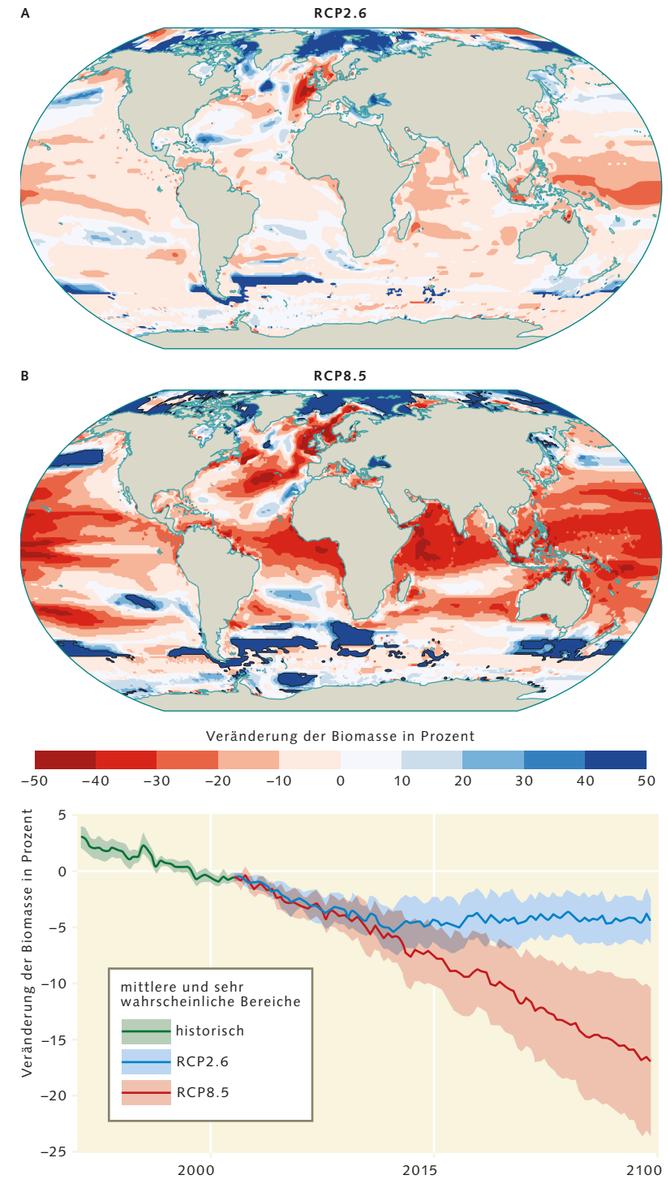
Eine weitere Veränderung ist die Abnahme der tierischen Biomasse im Meer. Modellrechnungen auf Basis der vom Weltklimarat genutzten **Repräsentativen Konzentrationspfade** (englisch: Representative Concentration Pathways, RCPs) lassen darauf schließen, dass der Weltozean bis zum Jahr 2100 etwa 4,3 Prozent seiner tierischen Biomasse aus dem Vergleichszeitraum 1986 bis 2005 verlieren wird, wenn es der Menschheit gelingt, die Erderwärmung auf unter zwei Grad Celsius zu beschränken (RCP2.6). Sollten die Treibhausgasemissionen jedoch weiter stark ansteigen und die globale Durchschnittstemperatur bis zum Jahr 2100 um mehr als vier Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit steigen (RCP8.5), wird die tierische Biomasse im Meer klimabedingt um 15 Prozent abnehmen. Besonders hoch werden die Einbußen dabei in den tropischen Meeren sowie in den gemäßigten Breiten ausfallen.

Im Übrigen verstärken die Klimastressfaktoren die schädliche Wirkung direkter menschlicher Eingriffe in die Lebensgemeinschaften des Meeres. Ausgebeutete Fischbestände beispielsweise reagieren auf die Folgen des Klimawandels deutlich empfindsamer als gesunde Bestände. Gleiches gilt für Korallenriffe, die durch ungeklärte Abwässer vorgeschädigt sind, oder aber für am Meeresboden lebende Gemeinschaften, die Störungen durch regelmäßige Schleppnetzfischerei ausgesetzt sind. Treffen klimabedingte Extremereignisse wie Hitzewellen oder eine abrupte Sauerstoffabnahme auf solche vorgeschädigten Lebensgemeinschaften, haben diese so gut wie keine Chance, sich davon umfassend zu erholen.

Die Lebensgemeinschaften der Küsten stehen zudem vor einem weiteren Klimaproblem. Weil die Meeresspiegel steigen, verlieren Meeresschildkröten, Seevögel und viele andere Uferbewohner ihre angestammten Nistplätze oder sogar den gesamten Lebensraum. Dramatisch sehen die Vorhersagen auch für Mangrovenwälder aus, einem der Hotspots mariner Artenvielfalt. Aktueller Forschung zufolge sind sie in der Lage, einen Meeresspiegelanstieg von maximal sechs bis sieben Millimetern pro Jahr zu kompensieren. Das gelingt, weil sich in ihrem dichten Wurzelsystem viel Schwemmmaterial ablagert. Die Wälder bauen sich gewissermaßen ihr eigenes Podest und klettern mit dem Meeresspiegel in die Höhe. Steigt der regionale Wasserpegel aber schneller, als die Mangroven Sedimente ansammeln können, ertrinken die Bäume. Neue Mangroven wachsen dann nur noch in unmittelbarer Ufernähe, was bedeutet, dass sich die Wälder langfristig landeinwärts verlagern, wenn sie den Platz dafür finden. Anderenfalls verschwinden sie.

Wie ernst die Lage ist, verdeutlichen die Vorhersagen zum Meeresspiegelanstieg in den tropischen und subtropischen Küstenbereichen. Bleiben die vom Menschen zu verantwortenden Treibhausgasemissionen auf dem aktuellen Niveau, werden die Wasserpegel bereits innerhalb der nächsten 30 Jahre um sechs bis sieben Millimeter pro Jahr steigen und damit schon bald den für Mangrovenwälder kritischen Schwellenwert erreichen. Gelingt es der Menschheit aber, das Pariser Klimaziel einzuhalten und die Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen, dürften viele der Küsten- und Mündungswälder eine Zukunft haben.

Solche klimabezogenen Schwellenwerte mariner Lebensgemeinschaften zu kennen, ist enorm wichtig, weil es die Menschheit in die Lage versetzt, biologisches Schlüsselwissen bei Entscheidungen zum Umgang mit dem Meer und seinen Ressourcen zu berücksichtigen. In




**2.31 > Wissenschaftlern zufolge sinkt die Biomasseproduktion in weiten Teilen des Meeres um mehr als 20 Prozent, sollte sich die Welt bis 2100 um mehr als vier Grad Celsius (B) erwärmen. Bei Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels (A) fallen die Verluste geringer aus.**

# Korallenriffe und Kelpwälder – bei Extremtemperaturen chancenlos

An den Küsten Australiens konnten Forscher und Hobbytaucher in den zurückliegenden 25 Jahren beobachten, wie marine Hitzewellen zwei der artenreichsten, produktivsten und damit für uns Menschen auch bedeutendsten Ökosysteme der Meere massiv unter Druck setzen. Die Rede ist von tropischen Korallenriffen und Kelpwäldern – den Regenwäldern der Ozeane.

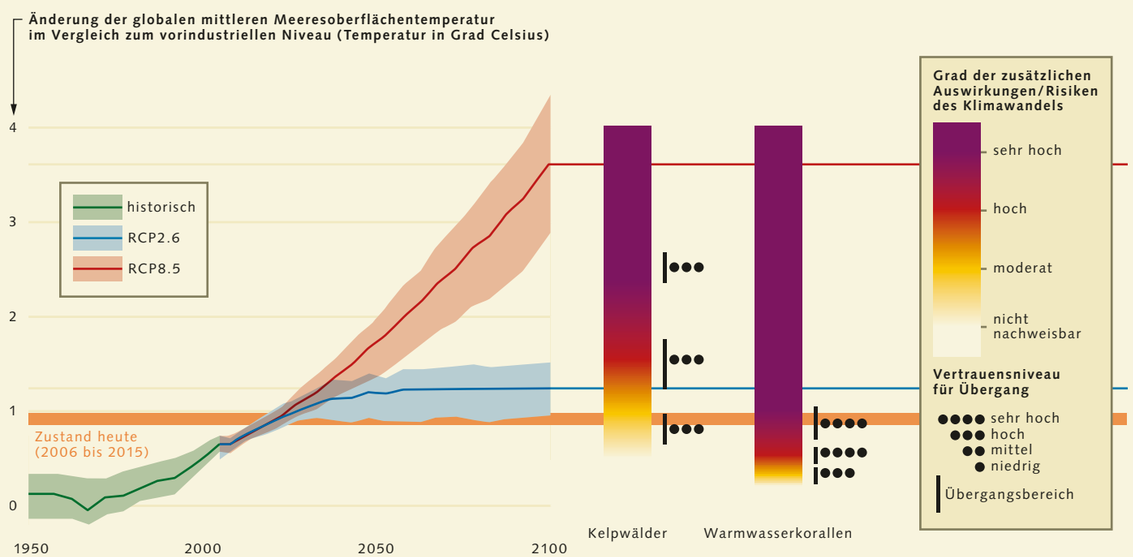
**Korallen: zerstörerische Bleiche**

Tropische Korallenriffe bedecken weniger als 0,1 Prozent des weltweiten Meeresbodens. Nichtsdestotrotz beherbergen sie mindestens ein Viertel aller bislang bekannten Arten des Meeres. Diese Vielfalt resultiert daraus, dass Korallen im Zuge ihres Wachstums mitunter riesige Kalkstrukturen bilden, in deren vielen Höhlen, Gängen und Nischen wiederum Hunderttausende andere Meereslebewesen Nahrung und Schutz finden. Zu den Nutznießern der Riffe zählt aber auch der Mensch. Weltweit profitieren mehr als 500 Millionen Menschen aus 90 Ländern von den Ökosystemleistungen der Korallenriffe. Sie fischen in den Riffen, erholen sich beim Tauchen, leben vom Rifftourismus, vertrauen darauf, dass die Korallenbauten Wellen brechen und die Küsten schützen, oder verbinden kulturelle und spirituelle Werte mit ihnen.

Weltweit aber sterben die Korallenriffe. Mindestens die Hälfte von ihnen ist bereits verloren, aus regional unterschiedlichen Gründen. Setzte ihnen der Mensch zunächst durch unsachgemäße Fischerei, Überdüngung, Wasserverschmutzung und durch das Abholzen der Mangrovenwälder (fehlende Filterwirkung) zu, so leiden Korallen mittlerweile extrem unter den Folgen des Klimawandels. Kohlendioxidreiches Wasser erschwert ihnen den Bau ihrer Skelette oder droht, ihre Kalkfundamente zu zersetzen. Aufgrund abnehmender Durchmischung des Oberflächenwassers sowie küstennaher hypoxischer Zonen fehlt ihnen vielerorts der Sauerstoff zum Atmen.

Den größten Schaden aber richten Hitzewellen an, dabei mögen es tropische Korallen im Grunde warm. Sie gedeihen in Gewässern mit einer Wassertemperatur von 23 bis 29 Grad Celsius. Einige riffbildende Arten ertragen sogar Temperaturen von bis zu 40 Grad Celsius – allerdings nur für kurze Zeit. Sind die Tiere über eine längere Phase einer Wassertemperatur ausgesetzt, die über 29 Grad Celsius liegt (im Roten Meer liegt dieser Grenzwert etwas höher), geraten sie unter Hitzestress und entledigen sich ihrer Untermieter. Dabei handelt es sich um symbiotische Algen, sogenannte Zooxanthellen, die im Gewebe der Korallenpolypen leben, mithilfe der Photosynthese Zucker produzieren und ihrem Wirt davon einen beträchtlichen Teil abgeben. Verschwinden die Algen, fehlt den Korallen ihre wichtigste Nahrungsquelle. Sie werden anfällig für Krankheiten und verlieren zudem mit den Algen ihre Farbe, weshalb diese Hitzestressreaktion auch als Korallenbleiche bezeichnet wird.

Bleicht eine Koralle aus, stirbt sie nicht unmittelbar. Kühlt sich das Wasser binnen kurzer Zeit wieder ab, kehren die Algen zurück und die Kolonie erholt sich. Dauert die Hitzewelle jedoch länger an, verhungert die Koralle. Dieses Sterben beobachten Forscher weltweit immer häufiger, denn die Anzahl und Intensität mariner Hitzewellen steigt. Das Great Barrier Reef vor Australiens Ostküste wurde im Sommer 2019/20 zum dritten Mal innerhalb von fünf Jahren von einer lang anhaltenden Hitzewelle getroffen. Die daraus resultierende Korallenbleiche erstreckte sich erstmals über alle drei Teilregionen des Riffsystems und betraf so viele Kolonien wie nie zuvor. Der Klimawandel sei nun auch im kühleren, südlichen Teil des Riffes angekommen, schlussfolgerten australische Korallenexperten. Und da die Hitzewellen überall auf der Welt in immer kürzeren Abständen auftreten, bleibt den Korallen mittlerweile weniger Zeit, um sich vom Hitzestress zu erholen und abgestorbene Regionen wieder zu besiedeln. Das bekannteste Korallenriff der Welt ist demzufolge nur eines von vielen tropischen Korallenriffen auf der Welt, die weiter schrumpfen werden, solange die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre nicht sinkt und sich die Wassertemperaturen nicht stabilisieren.




**2.32 > Die steigenden Wassertemperaturen verdrängen Warmwasserkorallen und Kelpwälder schon heute aus ihren angestammten Lebensräumen. Das Great Barrier Reef in Australien beispielsweise hat in den zurückliegenden 20 Jahren etwa die Hälfte seiner Korallen verloren. Erwärmt sich das Meer weiter, steigt der Temperaturdruck auf beide Gemeinschaften in einem solchen Maß, dass sie kaum noch Überlebenschancen haben.**

**Kelpwälder: Rückzug Richtung Pol**

Wie Korallenriffe bilden auch Kelpwälder dreidimensionale Strukturen im Meer, in denen zahllose andere Arten Schutz und ein Zuhause finden. Allerdings mögen die dichten Unterwasserwälder aus braunen Großalgen eher kühleres Wasser und wachsen daher vornehmlich in den gemäßigten und subpolaren Meeresgebieten. Sie besiedeln etwa ein Viertel aller Küsten der Welt und erfüllen dort elementare Funktionen. Kelpwälder entziehen dem Meer im Zuge ihres Wachstums große Mengen Kohlenstoff. Sie bremsen hohe Wellen aus, dienen als Laichgebiet für zahllose Fischarten und spielen eine wichtige Rolle beim Nährstoffrecycling im Meer. Ihr Wohlergehen hängt von vielen Faktoren ab: Dazu gehören das Sonnenlicht, das Nährstoffaufkommen und die Anzahl algenfressender Organismen (vor allem Seegurken und Fische). Ihr Verbreitungsgebiet allerdings wird hauptsächlich durch die Wassertemperatur bestimmt, weshalb die Kelpwälder der Welt seit Jahrzehnten enorme Veränderungen erfahren – in der nördlichen Hemisphäre ebenso wie in der südlichen.

An der Küste Japans zum Beispiel ziehen sich die Braunalgen seit den 1980er-Jahren allmählich Richtung Norden zurück; Ursache ist der wärmer werdende Strom Kuroshio. Beträgt seine Wassertemperatur 18 bis 20 Grad Celsius, sind algenfressende Fische wie der Papageifisch *Calotomus japonicus* besonders aktiv und fressen mehr Kelp, als von den Algen nachwachsen kann. Vor der Westküste Australiens wiederum genügte im Sommer 2010/11 eine marine Hitzewelle, um Kelpwälder auf einer Fläche von fast 1000 Quadratkilometern, 43 Prozent ihrer ursprünglichen Fläche, zu vernichten. Die nördliche Grenze ihres Verbreitungsgebietes verlagerte sich infolgedessen um 100 Kilometer Richtung Süden. In der gleichen Zeit wurden die einstigen Lebensräume der Großalgen von tropischen und subtropischen Meereslebewesen besiedelt; unter ihnen viele Weidegänger, die eine Erholung der Kelpwälder bis heute verhindern, indem sie so gut wie jeden Sprössling der Großalgen vertilgen.

Dieser vollständige Regimewechsel hat schwerwiegende Folgen für das Küstenökosystem und alle, die von ihm profitieren. Westaustraliens Fischerei- und Tourismusbranche beispielsweise setzen auf die Existenz der Kelpwälder. Wandern diese immer weiter Richtung Süden ab, sind nicht nur ökonomische Schäden in Milliardenhöhe zu erwarten. Viele der endemischen, das heißt nur im Kelpwald vorkommenden Arten werden außerdem lokal aussterben. Wo Kelpwälder verschwinden, sinken demzufolge die Artenvielfalt, die Menge des von Wasserpflanzen gebundenen Kohlenstoffs sowie die tierische und pflanzliche Biomasse insgesamt – eine Entwicklung, die sich nicht aufhalten lassen wird, solange die Meerestemperaturen steigen.

Bezug auf Mangroven beispielsweise weiß man mittlerweile, dass keine Maßnahmen mehr durchgeführt werden dürfen, welche die Küstenwälder daran hindern, ausreichend Schwemmmaterial anzusammeln. Aktuell geschieht das allerdings noch in zahlreichen Flussläufen und -mündungen – wie etwa durch den Bau von Staudämmen oder durch das Abbaggern von Kies und Sand. Ebenso schädlich sind Bohrungen nach Grundwasser, Erdöl oder Erdgas im Küstenbereich. Sie führen dazu, dass die Küstengebiete absinken und sich die Wirkung des Meeresspiegelanstieges verstärkt. Das Mekongdelta in Vietnam zum Beispiel sinkt schon heute aufgrund menschlicher Eingriffe um sechs bis 20 Millimeter pro Jahr ab. Mangroven haben unter diesen Umständen kaum eine Zukunft.

## Weniger Güter aus dem Meer

Der Klimawandel verändert im globalen Maßstab die Verbreitung und Produktivität der Meeresorganismen und beeinträchtigt auf diese Weise wichtige Ökosystemleistungen des Ozeans. Wo zum Beispiel Korallenriffe, Kelp- und Mangrovenwälder sterben, rollen Wellen ungebremst an die Küste und treiben deren Erosion voran. Touristen, die früher in Scharen kamen, um die Artenvielfalt dieser Lebensräume zu bestaunen, bleiben aus, und kulturell oder spirituell inspirierende Orte verlieren ihren Zauber.

Besonders spürbar wird der Verlust der marinen Artenvielfalt dadurch, dass der Ozean weniger Biomasse produziert, die der Mensch entnehmen kann. Leidtragende sind deshalb vor allem die kommerziell wichtigen Fischerei- und Aquakulturbetriebe sowie alle Kleinstfischer, die für den Eigenverbrauch fischen. Sie alle sehen sich im Zuge des Klimawandels immer häufiger mit folgenden Veränderungen konfrontiert:

- eine schichtungsbedingte Abnahme der Nährstoffkonzentration im Oberflächenwasser der Meere in den niederen und mittleren Breiten, wodurch die Primärproduktion in diesen Regionen sinkt. Das heißt, die Nahrungsgrundlage für Fische, Muscheln, Krebse und andere Meeresfrüchte schrumpft;
- eine Verschiebung der Fischereiproduktivität Richtung Pol bei gleichzeitiger Abnahme der Fischbestände in den niederen Breiten;
- eine Abnahme der Fortpflanzungserfolge verschiedener Fischarten;
- der Verlust wichtiger Laichplätze von Fischen wie zum Beispiel Korallenriffe, Kelp- und Mangrovenwälder;
- eine Abnahme der individuellen Körpergröße verschiedener Arten;
- eine temperaturbedingt höhere Anfälligkeit für Krankheiten und Parasiten bei Arten, die in Aquakultur gezüchtet werden;
- eine Zunahme schädlicher Algenblüten und sauerstoffarmer Zonen in Küstengebieten, in denen Aquakultur betrieben wird.

Die klimabedingte Verlagerung der Verbreitungsgebiete vieler Arten erschwert zudem ein effektives Fischereimanagement in festen Sektoren sowie den Schutz seltener Arten in ausgewiesenen Meeresschutzgebieten. Verlassen zum Beispiel Fischschwärme aufgrund steigender Wassertemperaturen oder abnehmender Sauerstoffkonzentration ihren angestammten Lebensraum, überqueren sie unter Umständen auch die Grenze zu den benachbarten Fischereisektoren. Das heißt, im alten Sektor sinken die Bestände, im neuen Sektor steigen sie. Solche grenzüberschreitenden Populationsveränderungen zu beobachten und sie zeitnah in die Fischereikonzepte der jeweiligen Sektoren einzuarbeiten, stellt Wissenschaftler und Fischereimanager immer noch vor eine große Herausforderung. Sie zu meistern gelingt nur, wenn die Beobachtungssysteme ausgebaut werden und alle Verantwortlichen über Sektorengrenzen hinweg zusammenarbeiten.

Ähnlich sieht die Situation für Meeresschutzgebiete aus. Diese werden in Zukunft nur dann noch ihren Schutzzweck erfüllen, wenn ihre Grenzen mit den schützenswerten Arten mitwandern oder aber die Schutzgebiete miteinander vernetzt sind. Der Klimawandel zwingt den Menschen also auch hier, neue Lösungen zu entwickeln und getroffene Entscheidungen immer wieder aufs Neue zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Die Folgen des Klimawandels für die Meere zu begrenzen, muss künftig oberste Priorität politischer Entscheidungen sein. Noch hat die Menschheit etwas Spielraum – diesen aber muss sie sofort nutzen, wenn sie die Meere und ihre einzigartigen Lebensgemeinschaften bewahren will.

### Conclusio

## Gradmesser Ozean

Die Welt schaut heutzutage genau auf die Temperaturkurve des Weltozeans. Solange sie nämlich steigt, schreitet auch die globale Erwärmung zweifelsohne voran. Diese Gewissheit beruht auf der Tatsache, dass der Ozean den wirkungsvollsten Wärmespeicher im Klimasystem der Erde darstellt. Seit den 1970er-Jahren haben die Meere mehr als 90 Prozent jener Wärmeenergie aufgenommen, die auf menschengemachten Treibhausgasemissionen beruht, und haben sie in immer größere Tiefe eingelagert. Dadurch haben die Ozeane den Anstieg der globalen Oberflächentemperatur maßgeblich gebremst und spürbare Veränderungen des Erdklimas hinausgezögert. Künftig dient der Ozean ebenfalls als Gradmesser und Kontrollinstanz: Erst wenn die Wassertemperaturen nicht weiter ansteigen oder aber sogar wieder sinken, kann die Menschheit von einem echten Erfolg im Kampf gegen den Klimawandel sprechen.

Die Erwärmung der Meere und Ozeane zieht dramatische Veränderungen nach sich: Die Wassermassen dehnen sich aus, sodass die Meeresspiegel steigen und vor allem in den Tropen Küstenabschnitte mit Abermillionen Einwohnern bedrohen. Gleichzeitig verliert der Ozean sein Lebenselixier Sauerstoff, weil wärmeres Wasser weniger Gase speichert als kaltes, Strömungen an Kraft verlieren und die windgetriebene Durchmischung durch eine stärkere temperaturbedingte Schichtung des Wassers abnimmt. Extremereignisse wie marine Hitzewellen treten häufiger auf. Parallel dazu verändert sich die Meereschemie: Seit Beginn der Industrialisierung haben die Weltmeere etwa ein Viertel der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen aufgenommen. Infolgedessen ist der pH-Wert des Ozeans gesunken und das Meerwasser versauert, wodurch sich die Lebensbedingungen insbesondere für Meeresorganismen mit Kalkschalen und -skeletten verschlechtert haben.

Das Fatale an den Folgen des Klimawandels für das Meer ist: Sie verstärken sich in ihrer Wirkung nicht nur gegenseitig, sondern schwächen auch die Widerstandskraft mariner Lebensgemeinschaften gegenüber anderen menschlichen Eingriffen wie Fischerei, Rohstoffabbau oder Verschmutzung. Als Reaktion auf den Klimastress, verlassen die meisten Tier- und Pflanzenarten daher ihren angestammten Lebensraum und folgen ihren gewohnten Umweltbedingungen. Das bedeutet, dass sie sich entweder polwärts bewegen oder aber in tiefere und damit kältere Wasserschichten abwandern – wenn ihnen dies möglich ist.

Verlierer dieser klimabedingten Artenwanderung sind vor allem kälteliebende Tier- und Pflanzenarten, denen kein Rückzugsort mehr bleibt; Organismen mit Kalkschalen oder Skeletten, denen die Versauerung zusetzt; sesshafte Arten wie Korallen, deren Ausbreitungsmechanismen zu langsam sind, als dass sie der Wärme entkommen könnten; sowie hochaktive und damit sauerstoffhungrige Lebewesen wie Raubfische, die in sauerstoffarmen Wasserschichten nicht mehr genügend Sauerstoff aufnehmen können.

Schon diese wenigen, eindrucksvollen Beispiele illustrieren: Der Klimawandel verändert bereits großflächig das Artengefüge in den Meeren. Nicht nur die Artenvielfalt sinkt, sondern auch die Biomasseproduktion insgesamt. Marine Ökosysteme sind immer weniger in der Lage, ihre vielen vom Menschen genutzten Ökosystemfunktionen zu erfüllen. Im Hinblick auf die Vielfalt des marinen Lebens entwickelt sich der Klimawandel zum größten Motor des Artensterbens und stellt in dieser Form eine enorme Herausforderung für ein nachhaltiges Ozeanmanagement dar.

Fest steht: Die kurz- und langfristigen Folgen der Meereserwärmung, -versauerung und Sauerstoffabnahme müssen ab sofort bei jeder Entscheidung zur Nutzung der Meere berücksichtigt werden.