

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

KLIMAWANDEL

Der Einfluss der globalen Erwärmung

Küstenschutz

Wann kommt die Flut?

Atmosphäre

Das Wolkenparadoxon

Extremwetter

Ist das noch normal?



Daniel Lingenhöhl
E-Mail: lingenhoehl@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,
können Sie das Wort »Klimawandel« noch hören? Viele Menschen schalten bei dem Thema mittlerweile offenbar ab. Dabei schreitet die Erderwärmung voran; einige Folgen sind heute schon zu sehen – andere sind dagegen noch Spekulation: Unklar ist etwa, ob steigende Temperaturen schon häufiger Extremwetter auslösen. Oder welche Rolle die Wolken am Himmel spielen. Angesichts der wieder rasant steigenden Kohlendioxidkonzentrationen in der Erdatmosphäre wird es dennoch höchste Zeit, um Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Vielleicht bleiben uns nur wenige Jahre zum Handeln.

Drängend grüßt

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 28.01.2019

Folgen Sie uns:



CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
REDAKTIONSLEITER: Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel, Marina Männle
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL: Antje Findeklee, Dr. Michaela Maya-Mrschik
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE229038528
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.), Michaela Knappe (Digital)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an service@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2019 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.



SEITE
04

KLIMABERICHT
»Die wichtigsten Jahre der
Geschichte«

- 04 KLIMABERICHT
»Die wichtigsten Jahre der Geschichte«
- 11 EXTREMWETTER
Ist das noch normal?
- 19 ANALYSEN
Der Einfluss des Klimawandels
- 27 KÜSTENSCHUTZ
Wann kommt die Flut?
- 35 KLIMAFORSCHUNG
Das Wolkenparadoxon
- 44 ARKTIS
Auf dünnem Eis
- 52 MEERESKUNDE
Dem Ozean geht die Luft aus
- 65 ÖKOLOGIE
Meereswelt im Würgegriff



SEITE
19 ANALYSEN
Der Einfluss des Klimawandels



KÜSTENSCHUTZ
Wann kommt die Flut? SEITE
27



MEERESKUNDE
Dem Ozean geht
die Luft aus SEITE
52



KLIMABERICHT

»DIE WICHTIGSTEN JAHRE DER GESCHICHTE«

von Christopher Schrader

Der neue IPCC-Bericht zum 1,5-Grad-Ziel schlägt einen optimistischen Ton an: Die Welt könne ungefähr so bleiben, wie wir sie kennen – nötig wären schnelle und drastische Maßnahmen.

Die nächsten Jahre sind wahrscheinlich die wichtigsten in unserer Geschichte. Die Entscheidungen, die wir heute treffen, müssen eine sichere und nachhaltige Welt für alle Menschen sichern, sowohl jetzt wie auch in der Zukunft.« Es ist nicht gerade ein kleiner Ball, den Debra Roberts da den Regierungen der Welt zuspielt. Dabei ist die südafrikanische Wissenschaftlerin keine Politikerin oder Aktivistin. Im Hauptberuf Umweltplanerin in Durban, arbeitet sie seit Jahren ehrenamtlich für den Weltklimarat IPCC als Kovorsitzende der Arbeitsgruppe 2, die sich mit den Risiken des Klimawandels für Natur und Gesellschaften beschäftigt.

Von solchen Risiken hat das Gremium sehr viele in seinem neuen Sonderbericht aufgelistet. Er wurde am Montag, den 8. Oktober 2018, in Incheon/Südkorea verabschiedet und beschäftigt sich mit einer Welt, die 1,5 Grad Celsius wärmer ist als vor der Industrialisierung – und nur noch 0,5 Grad wärmer als heute, wie Roberts' Kollegin Valerie Masson-Delmotte von der Universität Paris-Saclay und Leiterin der Arbeitsgruppe 1 für physikalische Grundla-

gen des Klimawandels betont. »Das wichtigste Ergebnis des Berichts ist darum, dass wir die Emissionen bis 2050 auf netto null reduzieren müssen«, sagt sie. Das heißt, die unvermeidbaren Emissionen etwa von Landwirtschaft oder Flugverkehr müssen ausgeglichen werden, indem man der Atmosphäre Kohlendioxid entnimmt.

Die Hauptaussagen des Reports

- Inzwischen ist ein Anstieg von Extremwetter wie Hitzewellen, Trockenheit und starken Niederschlägen zu bemerken, der sich bis zur Erwärmung von 1,5 Grad noch vergrößern wird. Das Risiko solcher Ereignisse steigt von moderat zu hoch an. In manchen Gegenden der Welt könnten Hitze und Luftfeuchtigkeit die Grenzen der menschlichen Leistungsfähigkeit überschreiten.
- Den Temperaturanstieg auf 1,5 Grad zu begrenzen, ist rechnerisch noch möglich.
- Geht die augenblickliche Entwicklung jedoch ungebremsst weiter, wird die Schwelle von 1,5 Grad Erwärmung bereits gegen 2040 erreicht, womöglich sogar schon 2030.
- Die momentanen Zusagen der Staaten, wie sie ihre Emissionen bis 2030 reduzie-

ren wollen, führen zu einer langfristig um mindestens drei Grad erwärmten Welt. Falls nicht vor 2030 stärkere Maßnahmen ergriffen werden, ist die Grenze von 1,5 Grad nicht mehr zu halten.

- Eine Erwärmung von 1,5 Grad ist mit deutlich geringeren Risiken verbunden als eine von zwei Grad. Zum Beispiel steigt der Meeresspiegel dann um zehn Zentimeter weniger, was etwa zehn Millionen Menschen aus der Gefahrenzone nimmt. Mehrere hundert Millionen Bewohner von Entwicklungsländern weniger stehen unter dem Risiko, in die Armut zu rutschen. Der Fischfang geht nicht so stark zurück, was vor allem lokalen Fischern in den Tropen nützt.
- Um die Vorgabe des Pariser Abkommens zu erfüllen, müssen die weltweiten Emissionen von CO₂ bis 2030 um 45 Prozent gegenüber 2010 sinken, also etwa auf das Niveau des Jahres 1986. Bis 2050 ist dann die weitere Reduktion auf »netto null« nötig.
- Der IPCC warnt davor, zwischen heute und dem Ende des Jahrhunderts ein größeres Überspringen der Temperatur zuzulassen, also einen Anstieg über 1,5 Grad hinaus, der dann später ausgeglichen

werden soll. Die Risiken von gefährlichen Klimawandelfolgen sind dann höher.

- Die viel diskutierten technischen Verfahren, CO₂ aus der Luft zu entfernen, sind unerprobt, teilweise unreif und womöglich unakzeptabel für die Gesellschaften. Ob diese sogenannten CDR-Methoden (Carbon Dioxide Removal) die Erde nach einer Erwärmung von 1,7 Grad oder mehr wieder ausreichend abkühlen können, ist unklar.
- Die Grenze von 1,5 Grad ist nur zuverlässig zu erreichen, wenn die Menschheit »schnelle und weit reichende Veränderungen« in Energiesystem und Industrieproduktion, Landnutzung, städtischer Infrastruktur und Verkehr vornimmt. Es gibt in der Geschichte zwar Epochen, in denen sich Dinge mit der nötigen Geschwindigkeit geändert haben, zum Beispiel als Autos die Pferde ablösten, aber das heute notwendige Ausmaß des Wandels über alle Sektoren der Wirtschaft ist beispiellos. Diese Aussagen stehen hinter der eingangs zitierten Prognose der Planerin Debra Roberts über die wichtigsten Jahre der Geschichte.
- Der IPCC konzentriert sich hier nicht nur auf Regierungen, sondern spricht im

Prinzip alle Bürger der Welt an, die ihr Konsumverhalten und ihre Ernährungsgewohnheiten anpassen könnten, um drastische Folgen des Klimawandels zu bremsen. So erwähnt der Bericht explizit den Verzicht auf Fleisch.

»Klimaschutz sollte Verfassungsrang bekommen«

»Es war eine historische Woche«, sagt Daniela Jacob, Leiterin des Klimaservice-Zentrums in Hamburg, die in Südkorea mitverhandelt hat. Die Sitzungen seien von einer sehr konstruktiven internationalen Zusammenarbeit geprägt gewesen. »Wir wissen jetzt, dass wir, wenn wir die Erwärmung auf 1,5 Grad begrenzen, ganz viele Risiken ausschließen und die Welt ungefähr so wie heute erhalten können, ohne ganze Ökosysteme wie die Korallen zu verlieren.« Ähnlich sieht es Niklas Höhne vom New Climate Institute in Köln: »Eine Begrenzung ist nötig, um wichtige Ökosysteme zu schützen, sie ist technisch und ökonomisch machbar und richtig umgesetzt kann sie zur nachhaltigen Entwicklung beitragen – das alles aber nur, wenn alle an einem Strang ziehen.«

Bundesumweltministerin Svenja Schulze sagte: »Wir dürfen beim Klimaschutz

keine Zeit mehr verlieren. Das ist die Kernbotschaft des Berichts. Die nächsten Jahre sind entscheidend, damit unser Planet nicht aus dem Gleichgewicht gerät.« Die Notwendigkeit eines Temperaturlimits betont auch Lisa Badum, klimapolitische Sprecherin der Grünen im Bundestag: »Die Klimawissenschaft stellt sehr gut heraus, welcher grundlegenden Unterschied eine Erderwärmung von 1,5 oder 2 Grad bedeutet und dass jedes Zehntel Grad zählt. Deutschland muss seiner Verantwortung im internationalen Klimaschutz jetzt endlich nachkommen. Klimaschutz sollte Verfassungsrang bekommen, mindestens brauchen wir ein Klimaschutzgesetz.« Für Hans-Otto Pörtner vom Alfred-Wegener-Institut, den zweiten Kovorsitzenden der Arbeitsgruppe 2, ist eine Schlussfolgerung aus dem Report, »dass alles teurer werden muss, was weiteren CO₂-Ausstoß bewirkt, und alles billiger, was den Wandel zu einem nachhaltigen Lebensstil beschleunigt.« Die Regierungen könnten und müssten so einen Strukturwandel vorgeben, der es Menschen einfach macht, ihre Gewohnheiten zu verändern. »Was leider fehlt, das sind charismatische Politiker, die bereit sind, ihre Wähler in diese Richtung mitzureißen.«

DACHBEGRÜNUNG IN HONGKONG

Pflanzen auf Hausdächern sollen helfen, den Klimawandel in den Städten zu dämpfen. Die Ergebnisse sprechen aber keine klare Sprache.



Der Präsident der Internationalen Vereinigung von Rotem Kreuz und Rotem Halbmond, Francesco Rocca, zeigt sich erschrocken über die Aussichten: »Mehr als die Hälfte unserer Einsätze folgt direkt auf Wetterereignisse, und viele andere werden durch Klimaschocks und -stress erschwert. Wenn das heute schon so ist, kann man sich die Größe der Krise kaum vorstellen, in die verletzte Gemeinschaften in einer Welt geraten, die 1,5 oder sogar 2,0 Grad wärmer ist.« Christopher Weber von der Umweltorganisation WWF ergänzt: »1,5 Grad Erwärmung ist das neue 2,0 Grad. Wir sehen schon starke Effekte, weil die Erwärmung von 0,5 auf 1,0 Grad gestiegen ist, die vorhergesagten Folgen treten immer früher ein.«

6000 neue Studien

Mit Spannung war auch erwartet worden, wie der IPCC über die CDR-Techniken urteilt. »Ich bin auf positive Art überrascht, denn der Bericht enthält deutliche Kritik«, sagt Linda Schneider, die für die Heinrich-Böll-Stiftung in Incheon dabei war. Ihre Organisation ist seit Langem sehr kritisch gegenüber Verfahren eingestellt, die Erde mit technischen Methoden künstlich zu kühlen. »Der Weltklimarat stellt hier

fest, dass das viel problematischer und ungewisser ist, als er noch im AR5 [dem Bericht von 2013/14] angenommen hatte.«

Den Bericht hatte die Gemeinschaft der Staaten beim IPCC bestellt, als sie im Dezember 2015 das Pariser Abkommen verabschiedete. Darin steht, die Menschheit wolle den von ihr ausgelösten Klimawandel bei einer Erwärmung von »deutlich unter 2,0 Grad« stoppen und sich bemühen, das Temperaturplus sogar auf 1,5 Grad zu begrenzen. »Aber vor drei Jahren gab es noch kaum wissenschaftliche Literatur dazu, weil sich vorher alle auf eine Erwärmung von 2,0 Grad konzentriert hatten«, sagt der Schotte Jim Skea vom Imperial College London, einer der Leiter der IPCC-Arbeitsgruppe 3, die für Emissionsreduktion zuständig ist.

Das hat sich gründlich geändert: In der letzten Fassung des Reports zitieren die 91 Autoren aus 44 Ländern mehr als 6000 wissenschaftliche Studien. In der vergangenen Woche hat der Weltklimarat zusammen mit Delegationen der Staaten nun die »Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger« (SPM) Satz für Satz überarbeitet – diese 33 Seiten sind für viele der einzige Teil des Reports, den sie lesen. Dagegen sind die eigentlichen Kapitel des Be-

richts frei von einer möglichen politischen Einmischung.

Weil die Aussagen des IPCC »relevant für politische Entscheidungen sein, diese aber nicht vorschreiben« sollen, haben sie oft eine »Wenn-dann«-Form wie Jim Skea erklärt: »Der IPCC hat hier keinen ›Plan‹ vorgelegt. Wir sagen: Wenn Ihr die Erwärmung auf 1,5 Grad begrenzen wollt, was muss dann passieren, damit Ihr einen Pfad zu Eurem Ziel erreicht? Wir haben den Regierungen jetzt die wissenschaftlichen Fakten darüber vorgelegt.«

Vier Wege zu 1,5 Grad

Von den Pfaden zur 1,5-Grad-Grenze zeigt der IPCC in der Zusammenfassung vier auf, die er »illustrativ« nennt. Alle vier lassen ein vorübergehendes Überschreiten des Temperaturlimits zu, erst 2100 wird es in jedem Fall erreicht. Und alle setzen darauf, in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts oder sogar früher CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen. Drei davon kommen mit einem Überschwingen der Erwärmung auf 1,6 Grad aus, weil in diesen Szenarien die Emissionen bereits bis 2030 um 41 bis 58 Prozent gesunken sind. Der vierte hingegen lässt den Ausstoß von Treibhausgasen

in den kommenden zwölf Jahren noch um vier Prozent ansteigen, um ihn danach umso radikaler zu beschneiden. Hier steigt die Temperatur zwischenzeitlich um 1,9 Grad an, bevor sie wieder sinkt.

Der als P1 bezeichnete Entwicklungspfad sieht einen Rückgang der Emissionen schon um 58 Prozent bis 2030 vor. Dazu sinkt der Einsatz von Kohle und Erdöl sehr schnell und stark, der von Erdgas langsamer, und als einziges Szenario begrenzt die Berechnung auch die Nutzung von Biomasse. Dafür steigt der Energieanteil der Kernkraft bis 2050 um 150 Prozent und der Beitrag der Erneuerbaren verneunfacht sich.

Auf die so genannte CCS-Technik (Carbon Capture and Storage), bei der CO₂ tief unter der Erdoberfläche verpresst wird, verzichtet die P1-Welt; Kohlendioxid wird nur durch Aufforstungsmaßnahmen im Umfang von 100 Gigatonnen CO₂ (Milliarden Tonnen) bis zum Ende des Jahrhunderts aus der Atmosphäre entnommen. »Das entspricht zweieinhalb Jahren des heutigen Ausstoßes.

Die Szenarien P2 und P3 machen etwas andere Annahmen, dort wird CO₂ mit großen Plantagen von Energiepflanzen aus der Atmosphäre entnommen. Die Biomasse

wird dann verbrannt und dabei das wieder entstehende Kohlendioxid aufgefangen und verpresst. Diese Technik heißt BECCS (Bioenergy with CCS) und ist weiterhin die einzige Technik, die in der vom IPCC ausgewerteten Literatur eine nennenswerte Rolle spielt. Anlagen, die CO₂ direkt aus der Atmosphäre entnehmen und entsorgen, werden erst entwickelt: Sie haben inzwischen eine Dimension erreicht, dass sie in einigen Jahren eine Million Tonnen pro Jahr umsetzen; die nötige Größenordnung beträgt jedoch Milliarden Tonnen. Der Energiebedarf dieser DAC-Technologie (direct air capture) dürfte gewaltig sein.

Der Entwicklungspfad P4 macht bereits ab 2030 in einem sehr großen Ausmaß Gebrauch von BECCS. 1200 Gigatonnen Kohlendioxid sollen so im Lauf des Jahrhunderts aus der Atmosphäre entnommen werden und unterirdisch entsorgt werden – die Emission von 28 Jahren auf dem Niveau von 2017. Das hält Mark Lawrence für »so hoffnungsvoll wie unrealistisch. Die Probleme der Technik lassen sich nicht so schnell lösen.« Die angegebene Fläche von mehr als sieben Millionen Quadratkilometer für die Plantagen (die 20-fache Fläche Deutschlands), sei nicht mehr verträglich

mit einer ausreichenden Lebensmittelversorgung.

Selbstzensur im Dienste der Politik?

Zudem steckt eine fundamentale Unsicherheit in der Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre, ergänzt Sabine Fuss vom Mercator-Institut für globale Gemeinschaftsaufgaben und Klimawandel in Berlin: »Es ist nicht klar, ob die Temperaturen genauso eindeutig sinken, wenn man der Atmosphäre CO₂ entnimmt, wie sie durch das Hinzufügen steigen.« Auch diese Aussage steht in klaren Worten in der in Incheon verabschiedeten Zusammenfassung.

Die Tatsache, dass die Wissenschaftler im IPCC ihre Aussagen im letzten Schritt vor der Veröffentlichung mit den Regierungen der ganzen Welt abstimmen, sorgt immer wieder für Kritik. Regelmäßig gelangen die an sich geheimen Entwürfe der Zusammenfassung der Berichte an die Öffentlichkeit; Veränderungen am Text werden dann leidenschaftlich interpretiert. Vom ersten zum zweiten Entwurf hätten sich die Autoren praktisch selbst zensiert, kritisierte zum Beispiel ein britischer Experte vor Kurzem im »Guardian«: Das Thema der Klimamigration, dass also Men-

schen ihre Heimat wegen der veränderten Lebensumstände verlassen müssen, sei ohne Not ersatzlos gestrichen worden, ebenso werde nicht mehr über den nachlassenden Golfstrom geredet.

Diesen Vorwurf weist Hans-Otto-Pörtner zurück. »Das Thema Migration hat im ersten Entwurf in der Zusammenfassung gestanden. Aber der Stand der wissenschaftlichen Literatur gibt es nicht her, genaue, zuverlässige Aussagen über die Unterschiede bei Klimaflüchtlingen zu sprechen, wenn die Temperaturen um 1,5 Grad und nicht um zwei Grad ansteigen. Darum steht Migration nicht mehr in der Zusammenfassung, wird aber in den Kapiteln des Berichts diskutiert.«

Kein Freibrief zur Kapitulation

Nach der Endrunde sind gegenüber der zweiten Entwurfsfassung auch viele Änderungen zu erkennen, doch insgesamt scheinen die Mahnungen und Warnungen nicht abgeschwächt worden zu sein. So ist die Feststellung über die Grenzen der CDR-Technologie neu im Text. Das Gleiche gilt für die eindringliche Warnung, dass ein Verzicht auf CCS und CO₂-Entnahme nur möglich ist, wenn die Reduktion der Emis-

sionen deutlich vor 2030 beginnt. Zudem haben die Wissenschaftler Teilnehmern zufolge den Absatz verteidigt, dass eine Umverteilung von Wohlstand dabei helfen kann, arme Menschen und verletzte Gruppen vor den Auswirkungen der Reformen zu schützen, und dass das auch nur wenig kostet.

Die neuseeländische Klimaforscherin Bronwyn Hayward, die in Incheon dabei war, verteidigt ihre Zunft gegen den Vorwurf, sich der Politik gebeugt zu haben. »Wir haben einen Konsens gefunden, der auf vielerlei wissenschaftlichen Belegen beruht, unsere Position gehalten und den Mächtigen die Wahrheit gesagt. Ich war noch nie so stolz auf meine Kollegen.«

Gefahr droht aber auch aus anderer Richtung: Die Ergebnisse lassen sich, etwas böswillig, schließlich auch so lesen: Entweder die Welt schränkt sich in einer dramatischen Art und Weise ein, für die der politische Wille keinesfalls erkennbar ist. Oder sie steuert mit weniger radikalen Maßnahmen auf eine Situation hin, die sie nicht mehr beherrschen kann, will sie die 1,5-Grad-Grenze einhalten. Da sollte man dieses Ziel doch vielleicht besser gleich aufgeben, könnte jemand argumentieren.

Auch bei der abschließenden Pressekonferenz in Incheon drehten sich viele Fragen von Journalisten darum, wie realistisch die aufgezeigten Wege »wirklich« seien; viele zweifelten offenbar daran.

Diese Sichtweise will aber Daniela Jacob nicht gelten lassen: »Man kann das nicht einfach abtun, nach dem Motto – alles ist so kompliziert, und wir stecken besser den Kopf in den Sand. So lese ich das nicht.« Gewiss, die nötige Umstellung werde schwierig, aber sie sei machbar und nicht unrealistisch. »Wir überblicken jetzt, was auf uns zukommt, was wir machen können, und was passiert, wenn wir das nicht tun. In Zukunft kann keiner mehr sagen, er habe das nicht gewusst.« ↩

(Spektrum – Die Woche, 41/2018)

A close-up photograph of a person's face, focusing on the forehead and eyes. Several water droplets are visible on the forehead and skin, suggesting a hot or humid environment. The person has light-colored eyes and dark hair.

EXTREMWETTER

IST DAS NOCH **NORMAL?**

von Alexander Mäder

Hitzewellen, Hochwasser, Orkane: Ob der Klimawandel extreme und daher seltene Wetterphänomene verstärkt, lässt sich nur schwer belegen. Doch Wissenschaftler haben auf diesem Gebiet in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Die Meteorologin Daniela Jacob gibt einen Überblick über den Stand der Forschung.

Spektrum der Wissenschaft: Frau Professor Jacob, wie beraten Sie Bürgermeister und Firmenchefs, die sich vor extremen Wetterereignissen schützen möchten?

Daniela Jacob: Zunächst klären wir, ob sich aus den meteorologischen Messdaten schon eine Zunahme von Extremwerten herauslesen lässt. Da hat sich in den vergangenen Jahren viel verändert. Zum Beispiel hat die Zahl der Starkniederschlagstage pro Jahr in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in weiten Teilen Deutschlands deutlich zugenommen – im Mittel um mehr als 20 Prozent. Im zweiten Schritt prüfen wir mit Klimamodellen, ob eine Zunahme für die nächsten Jahrzehnte zu erwarten ist. Interessanterweise kommt es den meisten Partnern gar nicht darauf an, ob sich die Veränderungen auf den Klimawandel zurückführen lassen. Sie wollen in erster Linie wissen, worauf sie sich einstellen müssen.

Woran soll es denn sonst liegen, wenn nicht am Temperaturanstieg?

Wenn wir eine Zunahme von Extremereignissen feststellen, finden wir erfahrungsgemäß auch eine Verbindung zum Temperaturanstieg. Und unsere Partner wollen auch wissen, welchen Unterschied es für sie macht, ob wir den Temperaturanstieg – global gesehen – auf zwei Grad begrenzen oder nicht. Die Skepsis am Klimawandel und die Annahme, dass sich gar nichts ändert, sind verschwunden. Aber ob man jeden Parameter und jedes Wetterereignis direkt auf den Klimawandel zurückführen kann, steht bei unseren Beratungen nicht im Vordergrund. Ich finde es auch wichtig, dass wir uns nicht erst dann wappnen, wenn in jedem Einzelfall klar bewiesen ist, dass ein Risiko durch den Klimawandel verschärft wird.

Die Wissenschaftshistorikerin Naomi Oreskes hat die Arbeit der »merchants of

doubt« bekannt gemacht: Sie säen Zweifel an der Klimaforschung, um politische Schlussfolgerungen hinauszuzögern. Sehen Sie darin ein Problem?

Ich kenne die Zweifler durchaus. Aber ich habe den Eindruck, dass die Debatte um Anpassungsmaßnahmen anders läuft. Viele Unternehmen und Kommunen wollen den Klimawandel in ihren Strategien berücksichtigen – sei es als Risiko oder als Chance. Städte erleben zum Beispiel, dass ihre Parkhäuser und Fußgängerzonen häufig überschwemmt werden, und fragen sich, ob das noch schlimmer wird und welche Stadtteile dann betroffen sein könnten. Und an der Nordsee interessiert es die Tourismusbranche, ob die Sommer künftig häufiger trocken und sonnig sein werden.

Im Jahr 2017 gab es auffällig viele schwere Hurrikane, die einige



CHRISTIAN SCHMIDT / HELMHOLTZ-ZENTRUM GEESTHACHT

DANIELA JACOB

Daniela Jacob ist promovierte Meteorologin und seit 2015 Direktorin des Climate Service Center Germany (GERICS). Die Einrichtung mit Sitz in Hamburg gehört zum Helmholtz-Zentrum Geesthacht. Sie berät Politiker, Verwaltungen und Unternehmen in Fragen der Anpassung an den Klimawandel und entwickelt Ideen für Dienstleistungen in diesem Bereich. Zuvor war Jacob viele Jahre als Wissenschaftlerin am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg tätig. Seit 2016 lehrt sie außerdem als Gastprofessorin an der Leuphana Universität Lüneburg. Sie ist Koautorin des fünften Sachstandsberichts des Weltklimarats (IPCC) sowie des IPCC-Sonderberichts über die Auswirkungen einer globalen Erwärmung von 1,5 Grad Celsius.

Karibikinseln vollständig verwüstet haben. Nach Ansicht vieler Wissenschaftler gibt es noch nicht genügend Daten, um zu sagen, ob das Risiko von Wirbelstürmen im Zuge des Klimawandels steigt. Naomi Oreskes hält die Anforderungen an die Statistik für falsch gewählt, weil es hier um existenzielle Bedrohungen geht. Getreu dem Motto:

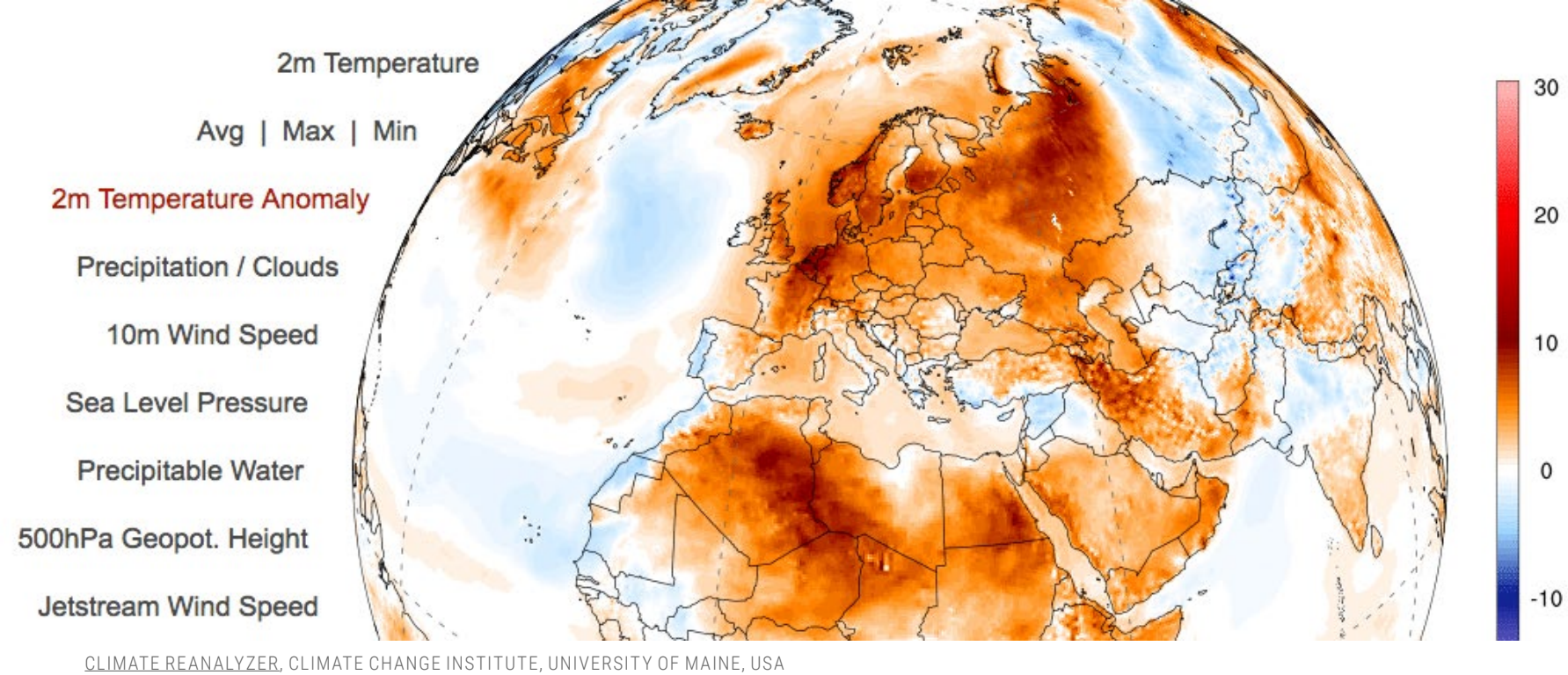
»Lieber einmal zu viel warnen als einmal zu wenig«.

Ich halte es für falsch, die wissenschaftlichen Standards zu ändern. Es geht vielmehr darum, welche Schlussfolgerungen wir ziehen. Wenn ein Hurrikan die Infrastruktur einer Insel zwei- oder dreimal hintereinander zerstört, sollte man sie so wiederaufbauen, dass sie künftigen Wirbel-

stürmen nach Möglichkeit standhalten wird – plus einem Sicherheitsaufschlag. Alles andere wäre fahrlässig.

Welche Wetterveränderungen kann man am Klimawandel festmachen?

Am deutlichsten sieht man den Effekt bei Temperaturextremen. Hitzeperioden werden länger und heftiger. Die Temperatur



Temperaturanomalien in Europa

es in den Sommermonaten wärmer wird, steigt das Risiko für die Bildung von Gewitterwolken. Wissenschaftler gehen deshalb davon aus, dass das Potenzial für Starkregen mit der Erderwärmung steigt.

Hat die Forschung zu extremen Wetterereignissen Fortschritte gemacht?

Ja, in den vergangenen fünf Jahren hat sich sehr viel getan. Die physikalischen Grundlagen sind in den Klimamodellen heute besser berücksichtigt, und die Rechenkapazitäten sind ebenfalls gestiegen. Inzwischen können wir in den Modellen Flächen von wenigen Quadratkilometern auflösen und damit auch kleinräumige Niederschläge wie Gewitter auf Zeitskalen untersuchen, auf denen der Klimawandel stattfindet. Für die Zukunft erwarten wir weitere Fortschritte: Wir haben zum Beispiel vor einem Jahr ein europäisches Projekt gestartet, in dem meine Forscherkollegen und ich mit mehreren Klimamodellen extreme Niederschläge für die Alpenregionen untersuchen. Zuerst wollen wir prüfen, ob wir Sturzbäche und andere Beobachtun-

ist eine Größe, die sich in Messungen und Computermodellen gut und relativ genau handhaben lässt. Hier kennen wir die natürlichen Schwankungen und können sagen, dass die Temperaturen immer häufiger über den Höchstwerten liegen, die man früher beobachtete. Bei Niederschlägen ist das viel schwieriger zu beurteilen, denn das sind kleinräumige Ereignisse. Es kann auf der einen Straßenseite regnen und auf der anderen nicht. Computermodelle müssen daher mit einer sehr hohen räumlichen wie zeitlichen Auflösung rechnen, um Regengebiete gut abzubilden. Außerdem sind nicht flächendeckend Messgeräte aufgestellt. Daher müssen wir davon ausgehen, dass wir die natürliche Variabilität aktuell nicht vollständig erfassen.

Wenn also in Frankfurt das größte Gewitter seit Beginn der Aufzeichnungen niedergeht ...

... könnte es sein, dass es vor einigen Jahren ein noch heftigeres Gewitter gab, das aber 50 Kilometer entfernt niederging und nicht oder nur unvollständig erfasst wurde. Man versucht, die fehlenden Messungen am Boden durch Satellitendaten auszugleichen. Doch Satelliten messen den Niederschlag nicht direkt, sondern nur den Wassergehalt der Atmosphäre. Die eigentliche Regenmenge müssen Meteorologen daraus ableiten. Aber wir wissen, dass die Atmosphäre mit jedem zusätzlichen Grad Celsius sechs bis acht Prozent mehr Wasserdampf speichern kann. Der wird irgendwo als Regen herunterkommen, und wenn

gen aus der Vergangenheit am Computer nachbilden können. Dann rechnen wir damit in die Zukunft. Im Moment deutet alles darauf hin, dass extreme Niederschläge künftig noch heftiger werden und auch Regionen treffen werden, die bisher verschont wurden. Häufiger scheinen sie jedoch nicht zu werden. Aber in drei bis vier Jahren wissen wir mehr.

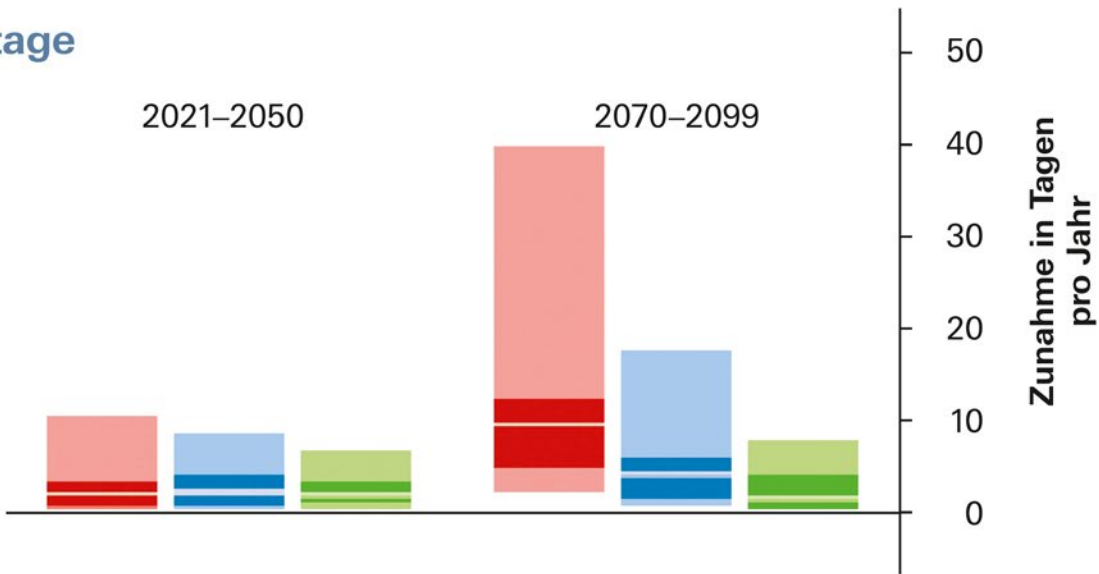
Kürzlich endete das Projekt »Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland«, an dem Sie beteiligt waren. Wenn die CO₂-Emissionen weiter steigen wie bisher, wird sich die Zahl der Tage, an denen die Temperatur hier zu Lande auf über 30 Grad klettert, in diesem Jahrhundert mindestens verdoppeln, im Oberrheingraben sogar vervierfachen.

Ja, aber ist die Zahl der Tage schon ein extremes Ereignis? Wir werden die regionalen Klimamodelle noch weiter auswerten müssen, um die Folgen besser zu verstehen. Dabei geht es auch um »compound effects«, die wir so nennen, weil mehrere Faktoren zusammenspielen. So hatte etwa der Orkan Kyrill, der im Januar 2007 über Europa fegte, so verheerende Folgen, weil der Boden nicht gefroren, sondern durch Regen

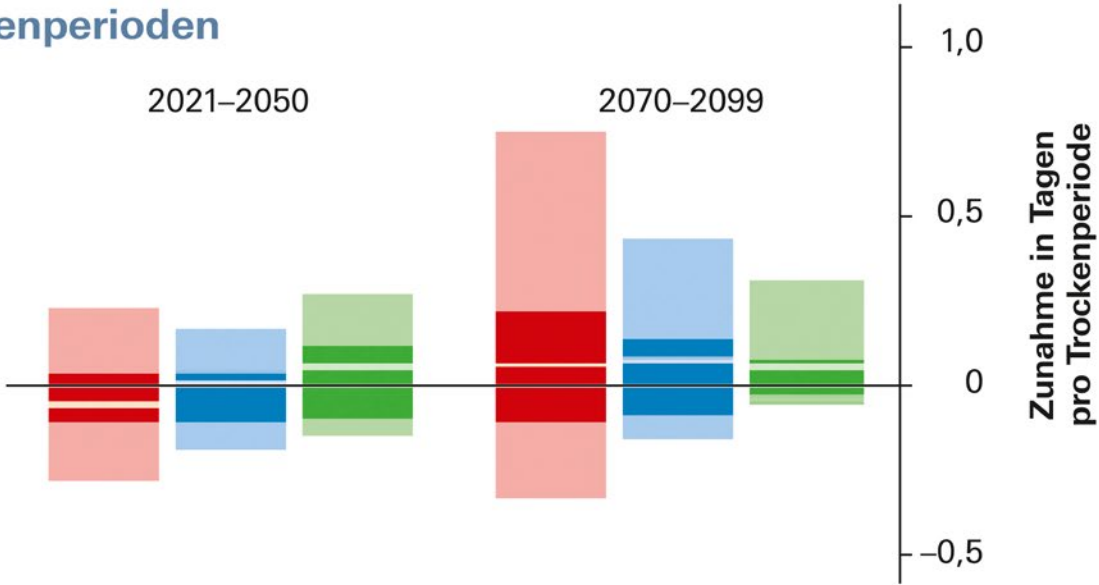
Prognose für Deutschland

Klimaprognosen für Deutschland im Rahmen von EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment – European Domain) zeigen: Je nachdem, wie sich die globalen CO₂-Emissionen entwickeln, drohen uns langfristig mehr Hitzetage mit über 30 Grad Celsius (oben) und längere Dürren (unten).

Hitzetage

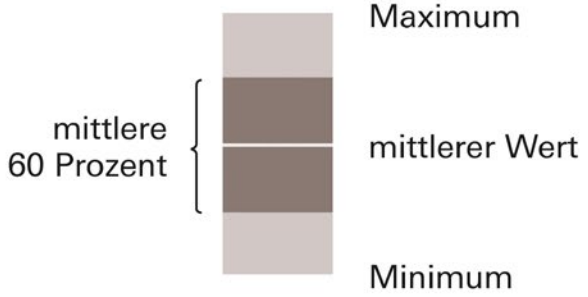


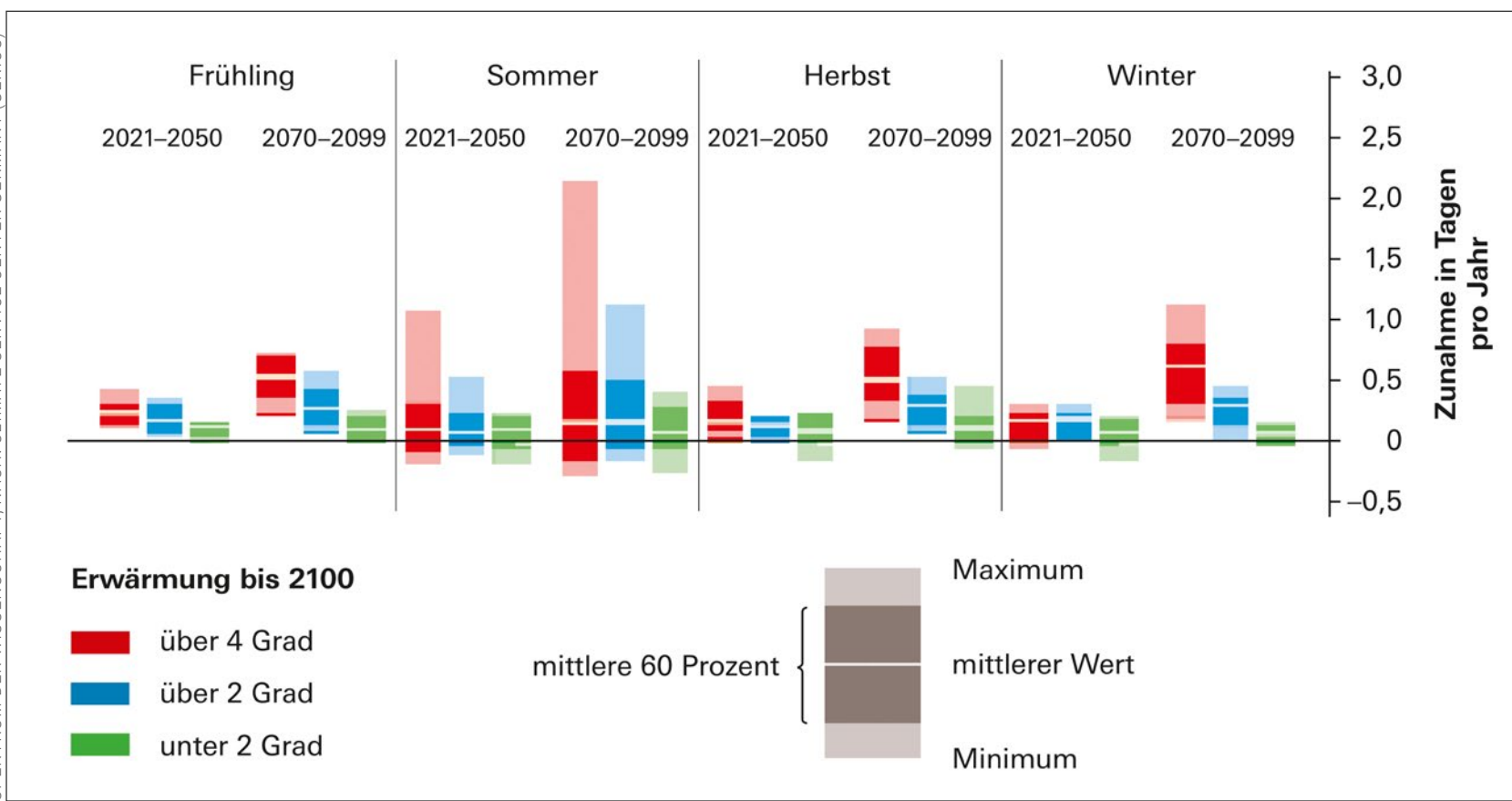
Trockenperioden



Erwärmung bis 2100

- über 4 Grad
- über 2 Grad
- unter 2 Grad





aufgeweicht war. Damit brauchte es gar nicht die höchsten Windgeschwindigkeiten, um Bäume zu entwurzeln. Ein anderes Beispiel ist das, was die Bauern in Schleswig-Holstein und Niedersachsen 2017 erlebten: Ab September waren die Äcker so feucht, dass man sie nicht befahren konnte. Vielerorts blieb im Herbst die Ernte stehen und Anfang des Jahres konnten die Bauern nicht düngen, weil die Gülle nicht versickert wäre.

Wenn man sich auf die Temperatur konzentriert, dann könnte Berlin am Ende

des Jahrhunderts so warm sein wie heute die Städte an der Adria oder in der Provence. Das klingt eher verlockend. Liegt es daran, dass wir hier Mittelwerte betrachten und keine Extreme?

Ja, aber das ist nicht der entscheidende Punkt. Wir müssen auch berücksichtigen, dass sich nicht nur die Temperatur ändert. Womöglich wird es gleichzeitig so schwül, dass die Hitze hier schwerer zu ertragen ist als in Südeuropa. Außerdem sind wir es nicht gewöhnt, bei 30 Grad im Schatten volle Leistung zu bringen, und viele Häuser würden wenig Abkühlung bieten. Im

REGENFÄLLE IN DER ZUKUNFT

Computermodele prognostizieren für Deutschland im Zuge des Klimawandels nicht nur mehr extrem heiße und trockene Tage – auch intensive Regenfälle mit mehr als 20 Millimeter Niederschlag am Tag könnten auf lange Sicht zunehmen. Vor allem im Sommer dürfte es zukünftig öfter zu lokalen sintflutartigen Güssen kommen.

Gegenteil: Wir bauen derzeit Häuser mit großen Glasflächen, hinter denen es in Zukunft sehr heiß werden dürfte. London stellt hingegen jetzt schon seine Bauweise um, weil der so genannte Wärmeinseleffekt, den man in vielen Großstädten beobachtet, bis 2050 so stark werden könnte, dass die Temperatur in Büros und Wohnungen selbst mit Klimaanlage nicht mehr unter 28 Grad fallen würde. Wenn ich Menschen das mögliche Klima der Zukunft verdeutlichen will, arbeite ich oft mit Analogien.

Welchen?

Ich sage ihnen zum Beispiel, dass ein Ausnahmesommer wie der, den wir 2003 erlebten, am Ende des 21. Jahrhunderts alle

Unklare Beweislage

SEIT 2011 versucht die American Meteorological Society jedes Jahr, die extremen Wetterereignisse der vergangenen zwölf Monate zu erklären. Für 2016 kommt sie in ihrem »Bulletin« nun erstmals zum Schluss, dass die beobachteten Hitzewellen ohne den Klimawandel kaum denkbar wären. In jenem Jahr brachte das Hochdruckgebiet Luzifer Südeuropa Temperaturen von mehr als 40 Grad. In den USA wurden vielerorts Rekordtemperaturen gemessen, ebenso in Kuwait, wo das Thermometer auf 54 Grad kletterte. In Indien starben hunderte Menschen während einer mehrwöchigen Hitzeperiode, und die Thailänder verbrauchten mehr Strom denn je, weil ihre Klimaanlage auf Hochtouren liefen. 2016 wurde die höchste weltweite Durchschnittstemperatur seit Beginn der Aufzeichnungen gemessen.

WENN SOLCHE EREIGNISSE zunehmen, spielen Wissenschaftler in Computersimulationen verschiedene Klimaszenarien durch, erläutert Robert Vautard, ein Experte für Hitzewellen am Institute Pierre Simon Laplace in Paris. Er bestätigt, dass es in den vergangenen Jahren viele Beispiele für extreme Temperaturen gab. Und wenn man die Klimamodelle mit einer niedrigen Konzentration an Treibhausgasen laufen lasse, kämen diese Extreme kaum vor.

»Es ist fast ausgeschlossen, dass die Hitzewellen, die wir vermehrt beobachten, auch ohne den Klimawandel zu Stande kämen«, sagt Vautard. Dieser Trend werde weiter anhalten. Später Frost wie jener, der im April 2017 den europäischen Landwirten Verluste von mehr als drei Milliarden Euro bescherte, dürfte hingegen seltener auftreten.

DIE BRITISCHE ORGANISATION Energy & Climate Intelligence Unit (ECIU) hat beim Durchsehen der Fachliteratur der vergangenen zwei Jahre 15 Studien gefunden, die Hitzewellen untersuchten: In allen stellten die Forscher fest, dass anhaltende Extremtemperaturen und Klimawandel zusammenhängen. Doch Vautard schränkt ein: »Die Zunahme an Hitzewellen ist der einzige klare Befund, den wir bisher haben.« Es gebe zwar erste Hinweise darauf, dass es häufiger sintflutartig regnet, und Vautard rechnet damit, dass man auch die Zunahme von Starkregen in zehn Jahren eindeutig auf den Klimawandel zurückführen wird. Für andere Wetterphänomene hingegen lassen sich nur schwer Aussagen treffen, etwa bei Stürmen, obwohl diese nach Schätzung des Versicherungskonzerns Munich Re im Jahr 2017 außergewöhnlich große Verwüstungen angerichtet haben: Allein die Hurrikane im

Nordatlantik haben Schäden in Höhe von 215 Milliarden US-Dollar verursacht.

BEI STÜRMEN handle es sich um komplexe Phänomene, erklärt Vautard, die nicht nur von einem einzelnen Parameter wie Temperatur oder Niederschlagsmenge abhängig sind. Sie seien daher schwerer zu modellieren. Die Literaturrecherche der ECIU kam zu einem ähnlichen Ergebnis: Drei Studien zeigten eine positive Korrelation zwischen der Zunahme von Stürmen und der atmosphärischen Erwärmung auf – vier konnten einen solchen Zusammenhang nicht bestätigen.

ÜBERSCHWEMMUNGEN UND WALDBRÄNDE sind ebenfalls eine große Herausforderung für die Klimamodelle, weil sie auch davon abhängen, wie der Mensch Flüsse und Wälder managt. Als Beispiel nennt Vautard ein Gewitter über einer ausgetrockneten Gegend mit hartem Boden, in dem Regenwasser schlecht versickern kann: Obwohl beide Faktoren für sich betrachtet nicht extrem sind, können sie in Kombination eine heftige Überschwemmung auslösen. Doch er ist zuversichtlich: »In den nächsten Jahren werden wir die Faktoren immer besser auseinanderhalten können.«

fünf Jahre vorkommen könnte, wenn wir unsere Emissionen nicht drastisch reduzieren. Ein Orkantief wie Friederike, das im Januar 2018 über Europa zog und unser Bahnsystem für einen halben Tag lahmlegte, könnte ebenfalls häufiger auftreten; Gleiches gilt für Überschwemmungen, wie jene nach den sintflutartigen Regenfällen in Berlin Ende Juni 2017. Insgesamt werden wir in Deutschland mit mehr Extremereignissen rechnen müssen, mit mehr Hitzeperioden, Dürren, Überschwemmungen und Stürmen. Im Winter wird die Temperatur häufiger um die null Grad liegen. Dann taut es tagsüber und friert nachts – eine große Belastung für die Autofahrer und den Asphalt.

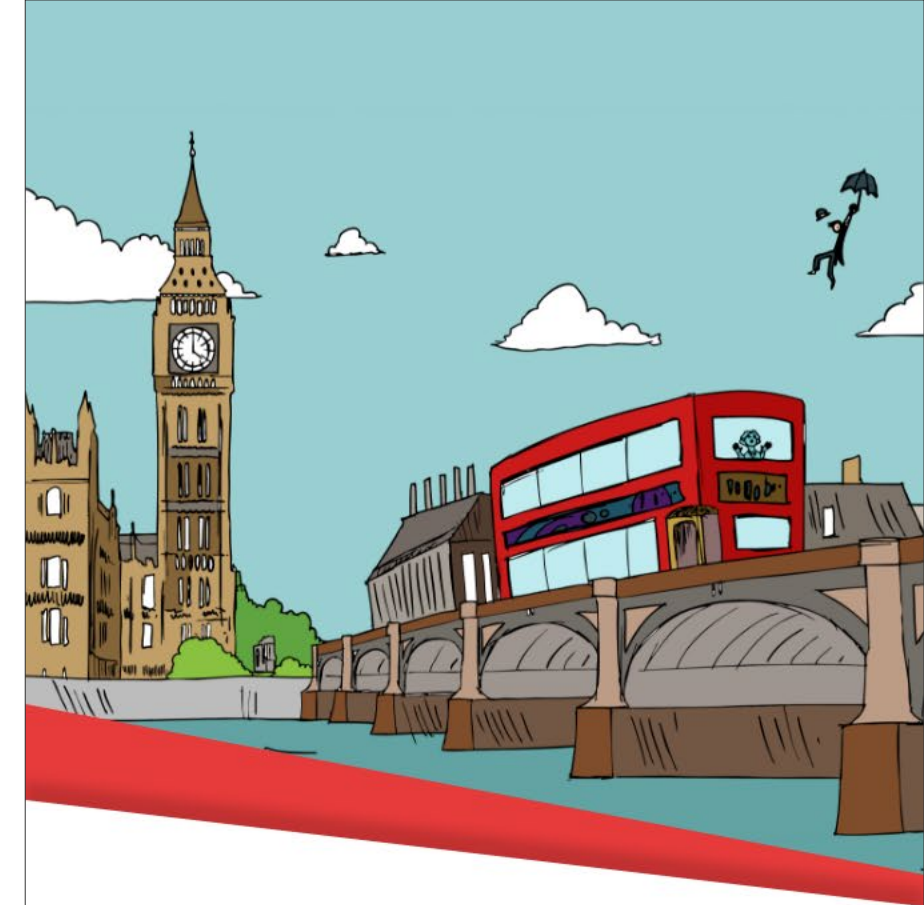
Werden wir mit dem Klimawandel zurechtkommen?

In Deutschland haben wir die Möglichkeiten, uns daran anzupassen. Wissenschaftler werden zwar nicht jede Überschwemmung vorhersagen können, das wird vielleicht nie möglich sein. Aber wir werden abschätzen können, wohin das Wasser im Extremfall fließen wird und welche Regionen künftig betroffen sein werden. Wir können uns darauf entsprechend einstellen – andere Länder nicht unbedingt. Und wenn wir den Klimaschutz vernachlässigen und sich die Erde global um drei, vier oder fünf Grad erwärmt, dann steigt das Risiko für noch extremere Wetterkapriolen in vielen Regionen deutlich an. Jedes Grad Erwärmung, das wir vermeiden, macht sich mehr als bezahlt.

len – andere Länder nicht unbedingt. Und wenn wir den Klimaschutz vernachlässigen und sich die Erde global um drei, vier oder fünf Grad erwärmt, dann steigt das Risiko für noch extremere Wetterkapriolen in vielen Regionen deutlich an. Jedes Grad Erwärmung, das wir vermeiden, macht sich mehr als bezahlt.

(Spektrum – Die Woche, 31/2018)

Die Fragen stellte Alexander Mäder, Philosoph und Wissenschaftsjournalist in Stuttgart.



gymglish
& **Spektrum.de**

Verbessern Sie Ihr Englisch online

- ✓ Kostenloser Einstufungstest
- ✓ Bereits mehr als 3 Mio. Nutzer
- ✓ Individuell angepasste Kursinhalte

1 Monat kostenlos

DER EINFLUSS DES KLIMAWANDELS

ANALYSEN

Wetterexperten können bald direkt vorhersagen, wie der Klimawandel Hitzewellen oder Fluten beeinflusst.

von Quirin Schiermeier



Die Nordhalbkugel schwitzte sich durch einen weiteren außergewöhnlich heißen Sommer. Japan bezeichnete seine Rekordtemperaturen als Naturkatastrophe. Europa glühte unter anhaltender Hitze, mit zerstörerischen Waldbränden in Griechenland und – sehr ungewöhnlich – in der Arktis. Von der Dürre angetriebene Feuer breiteten sich im Westen der Vereinigten Staaten aus.

Friederike Otto, eine Klimamodelliererin an der University of Oxford, war Anfang Juli 2018 sehr gefragt, weil Journalisten sie um ihre Meinung über die Rolle des Klimawandels für diese Sommerhitze baten. »Es war verrückt«, sagt sie. Die übliche wissenschaftliche Antwort lautet, dass starke Hitzewellen durch die globale Erwärmung häufiger werden. Aber Otto und ihre Kollegen wollten eine spezifischere Frage beantworten: Wie hat der Klimawandel diese eine Hitzewelle beeinflusst? Nach drei Tagen Rechnen gaben sie am 27. Juli bekannt, ihre vorläufige Analyse für Nordeuropa lege nahe, dass der Klima-

wandel die Hitzewelle an vielen Orten mehr als doppelt so wahrscheinlich gemacht habe.

Bald könnten Journalisten diese Art von Schnellanalyse routinemäßig von Wetteragenturen bekommen und nicht ad hoc aus der Forschung. Mit Ottos Hilfe bereitet sich der Deutsche Wetterdienst (DWD) darauf vor, weltweit als Erster schnell den Zusammenhang der globalen Erwärmung mit bestimmten meteorologischen Ereignissen zu bewerten. Der DWD hofft, dass es ihm bis 2019 oder 2020 gelingt, die Ergebnisse rasch in sozialen Medien zu veröffentlichen. Der vollständige Bericht soll ein bis zwei Wochen nach dem Ereignis folgen. »Wir wollen den Einfluss des Klimawandels auf alle Witterungsbedingungen quantifizieren, die extremes Wetter in Deutschland oder Mitteleuropa bringen«, sagt Paul Becker vom DWD. »Die Wissenschaft ist so weit.«

Auch die Europäische Union ist daran interessiert. Das Europäische Zentrum für Mittelfristige Vorhersagen (ECMWF) im britischen Reading bereitet bis 2020 ein ähnliches Programm vor. Wenn das gut

funktioniert, könnte ein regelmäßiger EU-Dienst ein oder zwei Jahre später beginnen, meint Richard Dee, Leiter des Copernicus Climate Change Service beim ECMWF. »Es ist ehrgeizig, aber machbar«, denkt Otto, die ebenfalls beim Aufbau des EU-Programms mitwirkt.

Dass die Wetterdienste solche regelmäßigen Dienste in Betracht ziehen, zeigt, wie weit die Wissenschaft seit den ersten innovativen Projekten – vor mehr als einem Jahrzehnt – gekommen ist. Damals hatte man bereits versucht, einzelne Wetterereignisse in Bezug zum Klimawandel zu setzen. 170 Studien später steht die Forschung vor dem Durchbruch und dem Einsatz im Alltag. Es gibt immer noch Schwierigkeiten mit manchen extremen Wetterphänomenen. Aber sobald Wetterdienste beginnen, solche Informationen routinemäßig anzubieten, desto herausfordernder wird es, diese Studien nutzbar zu machen. »Es ist eine Sache, wissenschaftlich fundierte Zuschreibungen zu machen«, so Peter Walton, Sozialwissenschaftler an der University of Oxford. »Wie man diese Informationen nutzt, ist eine andere Sache.«

Das Einmaleins der Zuordnung

Die Idee dahinter ist ziemlich einfach. Katastrophen wie rekordverdächtige Hitzewellen und Extremniederschläge werden wahrscheinlich häufiger, weil die zunehmenden Treibhausgase die Atmosphäre verändern. Wärmere Luft enthält mehr Wasserdampf und speichert mehr Energie; die steigenden Temperaturen können großflächig atmosphärische Zirkulationsmuster verändern. Extremwetter kann aber auch durch natürliche Zyklen wie das El-Niño-Phänomen ausgelöst werden: Es erwärmt in regelmäßigen Abständen die oberen Meeresschichten im tropischen Pazifik.

Forscher sagen, dass es Stadtplanern, Ingenieuren und Hausbesitzern helfen wird, die Rolle der vom Menschen verursachten globalen Erwärmung – im Gegensatz zu natürlichen Schwankungen – bei einzelnen Wetterextremen besser zu verstehen; etwa welche Überschwemmungen, Dürren und andere Wetterkatastrophen zunehmend riskanter werden. Und Umfragen weisen darauf hin, dass Menschen eher eine Politik unterstützen, die sich auf die Anpassung an Klimawandelfolgen konzentriert, wenn sie gerade extreme Wetterbedingungen erlebt haben. Eine rasche Zuordnung –



oder auch der Ausschluss – eines regionalen Ereignisses zum Klimawandel könnte daher besonders effektiv sein.

Otto, die stellvertretende Direktorin des Environmental Change Institute der Uni-

ELBE BEI MAGDEBURG IM SOMMER 2018
Auf Grund der monatelangen Trockenheit in Sachsen-Anhalt 2018 führte die Elbe nur noch Niedrigwasser – und der Domfelsen fiel trocken.

versity of Oxford, ist eine Veteranin ihres Forschungszweigs und hat bereits mehr als zwei Dutzend derartige Analysen durchgeführt. So haben sie und ihre Kollegen am 4. Juni 2018 eine Studie über das südliche Afrika abgeschlossen, das unter einer dreijährigen Dürre gelitten hatte. Anfang 2018 war die Situation in der südafrikanischen Westkap-Provinz so schlimm geworden, dass Beamte in Kapstadt warnten, sie würden bald den Tag erreichen, an dem der Region das Wasser für Grundbedürfnisse ausgehe – eine Premiere für eine Großstadt. Als Berichte über den »Day Zero« international Schlagzeilen machten, entschieden Otto und Mark New, ein Klimaforscher an der University of Cape Town, dass dieses Ereignis ein guter Kandidat für eine Attributionsstudie sei. Mangels Finanzierung des Projekts arbeiteten Forscher aus den Niederlanden, Südafrika, den Vereinigten Staaten und Großbritannien in ihrer Freizeit und definierten zunächst das regionale Ausmaß der mehrjährigen Dürre. Sie schufen auch einen Intensitätsindex, der Niederschlags- und Hitzemessungen kombinierte, und speisten die Daten in komplexe Computermodele ein, die das Klima der Erde simulieren. Mit jedem der fünf

unabhängigen Modelle wurden Tausende von Simulationen durchgeführt. Einige von ihnen berücksichtigten die vom Menschen verursachten Treibhausgase, andere liefen mit natürlichen Konzentrationen der Gase, als ob die industrielle Revolution nie stattgefunden hätte.

Die Forscher verglichen, wie oft eine Dürre ähnlichen Ausmaßes in den zahllosen Testläufen auftauchte. Als sich das Team im Juni 2018 traf, war der Regen nach Südafrika zurückgekehrt und hatte Day Zero verdrängt. Aber die Wissenschaftler waren noch immer auf der Ursachensuche der Megadürre, was helfen könnte festzustellen, ob sich die Region auf eine baldige Wiederholung einstellen muss. Otto und ihre Kollegen stimmten darin überein, dass die Analyse zu einem Ergebnis geführt hat. »Die Erderwärmung hat das Risiko dreier aufeinander folgender trockener Jahre in der Region verdreifacht«, sagt sie. Die Ergebnisse kamen gerade rechtzeitig, damit Roop Singh, ein Klimarisikoberater im Red Cross Red Crescent Climate Centre in Den Haag die Ergebnisse zwei Wochen später auf einer Konferenz zur Anpassung an den Klimawandel in Kapstadt präsentieren konnte. Die Forscher dort fanden

die Ergebnisse nicht besonders schockierend, sagt Singh – aber sie lösten lebhaft Diskussionen darüber aus, ob die Zunahme des Dürreerisikos dazu beitragen könnte, erhöhte Investitionen in eine Diversifizierung der Wasserquellen Kapstadts zu rechtfertigen. Ottos Studie wurde am 13. Juli 2018 vor dem Peer Review auf der Website von World Weather Attribution veröffentlicht.

Obwohl Kapstadt im Jahr 2018 dem Day Zero entgangen ist, erkennen die Politiker in der Region, dass Ottos ernüchternde Ergebnisse für die Wasserbehörden eine Warnung sind, die das Risiko der globalen Erwärmung gern herunterspielen. »Das ist eine unglaublich starke Botschaft, die wir nicht ignorieren dürfen«, unterstreicht Helen Davies, Direktorin für Green Economy im Department of Economic Development and Tourism der Regierung von Western Cape. »Wir müssen vielleicht an einem radikal neuen Ansatz für das Wassermanagement arbeiten«, sagt sie.

Die Arbeit von Ottos Team gesellt sich zu einer schnell wachsenden Sammlung von Studien zur Klima-Wetter-Zuordnung. Von 2004 bis Mitte 2018 haben Wissenschaftler mehr als 170 Arbeiten über 190

extreme Wetterereignisse weltweit veröffentlicht, so eine Analyse von »Nature«. Bisher deuten die Ergebnisse darauf hin, dass etwa zwei Drittel der untersuchten extremen Wetterereignisse durch den vom Menschen verursachten Klimawandel wahrscheinlicher oder schwerer geworden sind. Hitzeextreme machten mehr als 43 Prozent dieser Ereignisse aus, gefolgt von Dürren (18 Prozent) und extremen Regenfällen oder Überschwemmungen (17 Prozent). Im Jahr 2017 wurde erstmals in Studien sogar festgestellt, dass drei extreme Ereignisse ohne den Klimawandel nicht eingetreten wären: Asiens Hitzewellen im Jahr 2016, globale Rekordwärme im selben Jahr und Meereserwärmung im Golf von Alaska und im Beringmeer von 2014 bis 2016.

In knapp einem Drittel der Fälle in der Analyse von »Nature« zeigten die verfügbaren Beweise entweder keinen eindeutigen menschlichen Einfluss oder waren zu datenarm, als dass Wissenschaftler ein Urteil hätten fällen können. Manchmal scheinen Studien zu gegenteiligen Schlussfolgerungen über ein bestimmtes Ereignis zu kommen. Eine Studie über eine Hitzewelle 2010 in Russland ergab, dass deren Schwe-

re immer noch innerhalb der Grenzen der natürlichen Variabilität lag; eine andere Analyse zeigte, dass der Klimawandel das Ereignis wahrscheinlicher gemacht hat. Die Medien fanden die Ergebnisse verwirrend, aber Klimawissenschaftler sagen, dass die Diskrepanz nicht überraschend ist, weil die beiden Studien verschiedene Themen betrachteten: Schwere und Häufigkeit. Laut Otto: »Das Beispiel zeigt, dass es eine echte Herausforderung ist, Zuschreibungsfragen zu formulieren und zu kommunizieren.« Aber die Forscher seien seither immer anspruchsvoller geworden, wie sie ihre Studien aufbauen und präsentieren, fügt sie hinzu.

Schnelle Berichte

Die Südafrikastudie hätte schneller durchgeführt werden können, wenn die Forscher ihre ganze Zeit damit verbracht hätten. Die Arbeit während des europäischen Ausnahmesommers 2018 war dagegen nicht die erste schnelle Studie: Im Jahr 2015 beispielsweise fand ein internationales Forscherteam – einschließlich Otto – innerhalb von Wochen heraus, wie der Klimawandel vergleichbare Hitzewellen in einigen europäischen Städten viermal

wahrscheinlicher gemacht hatte und in weiten Teilen des Kontinents mindestens doppelt so wahrscheinlich.

Noch zügiger wollen die Meteorologen arbeiten, wenn sie diese experimentellen Methoden in den Regelbetrieb überführen. In den vergangenen Monaten hat Otto intensiv mit den Mitarbeitern des Deutschen Wetterdienstes gesprochen und sie über die Durchführung von Attributionsstudien mit den besten Ansätzen informiert. Am 21. Juni 2018 unterzeichnete sie einen Vertrag mit der Agentur, der die kostenlose Nutzung des weather@home-Modells der University of Oxford vorsieht. Inzwischen hat der Copernicus Climate Change Service Otto und zwei ihrer Kollegen gebeten, eine Studie zu verfassen, in der die Arbeitsabläufe und Methoden für die Durchführung schneller Attributionsstudien beschrieben werden. Otto mahnt zur Eile, weil Fragen über die Rolle des Klimawandels regelmäßig unmittelbar nach extremen Wetterereignissen gestellt werden.

»Wenn wir Wissenschaftler nichts sagen, werden andere Menschen diese Frage nicht auf der Grundlage wissenschaftlicher Beweise beantworten, sondern auf der Grundlage ihrer Agenda. Wenn wir also

wollen, dass die Wissenschaft Teil der Diskussion ist, müssen wir schnell etwas mitteilen«, betont sie. Einige Wissenschaftler könnten sich unwohl fühlen, wenn die Ergebnisse der Wettervorhersage bekannt gegeben werden, bevor die Arbeit geprüft

wird. Aber in diesen Fällen wurden die Methoden bereits umfassend getestet, bestätigt Gabriele Hegerl, Klimawissenschaftlerin an der University of Edinburgh. Hegerl ist auch Mitautorin eines Berichts der US National Academies aus dem Jahr 2016, der

zu dem Schluss kommt, dass die Wissenschaft der Zuschreibung schnell vorangeschritten ist und von der Verknüpfung mit der operativen Wettervorhersage profitieren würde. »Es kann wirklich nützlich sein, wenn wir schnell Ergebnisse für Ereignistypen haben, die wir einigermaßen gut verstehen, wie zum Beispiel Hitzewellen«, erläutert sie. »Man muss die Wettervorhersage nicht begutachten«, fügt Otto hinzu.

Aber nicht die gesamte Wissenschaft hinter diesen Zuordnungsstudien ist gefestigt, sagt Hegerl. Computeralgorithmen haben immer noch Schwierigkeiten, schwere lokale Stürme zu modellieren – etwa örtliche, kleine Hagelstürme oder Tornados. Wissenschaftler können also nicht sagen, ob der Klimawandel diese Ereignisse wahrscheinlicher gemacht hat. Eine zuverlässige Zuordnung ist auch dort schwierig oder gar unmöglich, wo noch keine langfristigen Klimadaten vorliegen,

HAGEL

Kleinräumige Extremwettererscheinungen wie Hagel sind nicht leicht zu erfassen und deshalb nur schwer dem Klimawandel zuzuordnen, selbst wenn sie gehäuft auftreten.



etwa in einigen afrikanischen Ländern. Und es könnte immer noch natürliche Klimaschwankungen geben, die in den relativ kurzen Aufzeichnungen der direkten Klimabeobachtungen nicht vollständig sichtbar sind. Um sehr langfristige Klimaschwankungen aufzuspüren – beispielsweise globale Veränderungen der atmosphärischen Druckverhältnisse oder der Meeresoberflächentemperaturen, die sich in Zeitskalen von Jahrzehnten wiederholen –, müssen sich die Forscher auf mäßig aufgelöste Proxydaten wie Baumringe verlassen. Dass sich diese Variabilität nicht immer in direkten Beobachtungen zeigt, schafft Unsicherheit in den Studien, insbesondere bei Erforschung von Dürren, erläutert Erich Fischer, Klimawissenschaftler an der ETH Zürich.

Bei einem Treffen in Oxford im Jahr 2012 fragten einige Kritiker, ob sich Klimawissenschaftler angesichts fehlender Beobachtungsdaten und Schwächen in den damaligen Klimamodellen einig seien über die Schlussfolgerungen von Zuordnungsstudien. Doch seitdem sind die Zweifel weitgehend ausgeräumt. Die Forscher führen die Studien nun mit mehreren unabhängigen Klimamodellen durch, was die Unsicher-

heit verringert, da sie nach übereinstimmenden Ergebnissen suchen können. Und Wissenschaftler sind vorsichtiger, wenn es darum geht, Wahrscheinlichkeitsaussagen zu machen. »Die Zuschreibung von Extremereignissen hat seit ihrem Beginn mit knappen Mitteln große Fortschritte gemacht«, meint Fischer. »Es funktioniert vielleicht immer noch nicht bei kleinen Hagelschlägen oder Tornados. Aber die Aussagen sind jetzt ziemlich robust für alle großräumigen Wettermuster, die durch moderne Klimamodelle dargestellt werden können.«

Unklarer Einfluss

In Südafrika, so Davies, sollte Ottos jüngste Studie dazu beitragen, neue Modelle für die regionale Wasserwirtschaft voranzutreiben. »Meteorologen versicherten uns nach dem zweiten Dürrejahr, dass wir auf keinen Fall ein drittes trockenes Jahr in Folge haben würden. Aber wir können die Vergangenheit nicht mehr für das nutzen, was in der Zukunft passieren könnte. Wir müssen lernen, uns an ein sich wandelndes Klima anzupassen. Und wir brauchen unbedingt eine Zuordnung, um es richtig zu machen.« Eine der Lehren aus der jüngs-

ten Dürre und ihrer Erforschung ist, dass sich das Westkap nicht nur auf Regenfälle verlassen sollte, um seine Wasserversorgung zu sichern, betont sie. Stattdessen sollte es sie durch Erschließen des Grundwassers und den Ausbau seiner Entsalzungs- und Abwasserbehandlungsanlagen diversifizieren.

Im Allgemeinen ist es schwer zu wissen, welche Wirkung diese Studien haben, berichten Sozialwissenschaftler. Doch wenn diese Zuordnungen nicht nur in Fachzeitschriften, sondern regelmäßig in Wetterberichten erscheinen, dann könnten ihre Ausmaße viel deutlicher werden, sagt Jörn Birkmann, Experte für Raum- und Regionalplanung an der Universität Stuttgart. »Stadt- und Infrastrukturplaner, die neue Wohngebiete, Krankenhäuser oder Bahnhöfe planen und genehmigen, müssen die Risiken extremer Wetterereignisse genauer berücksichtigen, wenn diese Ereignisse eindeutig auf den Klimawandel zurückzuführen sind«, führt er aus. Derartige Analysen könnten auch in Rechtsstreitigkeiten über den Klimawandel einfließen, meinen Birkmann und James Thornton, der in London ansässige Geschäftsführer von ClientEarth, einer internationalen Gruppe von

Umweltanwälten. Gerichtsverfahren, in denen behauptet wird, dass man sich nicht auf die Auswirkungen des Klimawandels vorbereitet habe, zitierten demnach noch keine Zuordnungsstudien, sagt Thornton. Aber er glaubt, dass sich die Richter zunehmend auf sie verlassen werden, um zu entscheiden, ob Angeklagte – seien es Ölgesellschaften, Architekten oder Regierungsbehörden – haftbar gemacht werden können.

»Gerichte neigen dazu, Regierungsdaten als glaubwürdig zu erachten«, sagt er. »Wenn diese Zusammenhangsstudien von der Wissenschaft in den öffentlichen Dienst vordringen, nutzen die Richter auch die Ergebnisse stärker.« Für den Deutschen Wetterdienst ist Becker davon überzeugt, dass diese Zuordnungen für viele Teile der Gesellschaft ein wertvoller Dienst sein werden. »Es ist Teil unserer Aufgabe, die Zusammenhänge zwischen Klima und Wetter zu beleuchten«, erklärt er. »Es gibt eine Nachfrage nach diesen Informationen, es gibt wissenschaftliche Studien, die sie liefern, und wir sind froh, sie zu verbreiten.« ↩

(Spektrum.de, 10.08.2018)

EXTREMWETTER

Wenn die Elemente verrücktspielen

Unwettervorhersage | Wer sagt mir, wann die Flut kommt?

Arabischer Golf | Zu heiß zum Leben

Globale Erwärmung | Welche Schuld trägt der Klimawandel?

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR
€ 4,99



KÜSTENSCHUTZ Wann kommt **die Flut?**

von Alexandra Witze

Das Ansteigen des Meeresspiegels führt zu häufigeren Extremfluten – doch wie hoch und wie oft steigt das Wasser? Datenanalysen erlauben einen Blick in die Zukunft.

Am 8. September 2017 checkte Thomas Wahl am Londoner Flughafen Gatwick für einen nahezu leeren Flug nach Orlando in Florida ein. Wahl ist als Küsteningenieur an der University of Central Florida tätig – und er wusste, was sich auf seine Heimatstadt zubewegte: Irma, ein Hurrikan der Kategorie 5, der bereits in der Karibik für Unheil gesorgt hatte. Wahl stieg trotzdem in den Flieger. »Außer mir waren nur der Pilot und ein paar Disneyland-Touristen an Bord, denen es egal war«, erinnert sich Wahl.

Der starke Regen und die heftigen Stürme, die Irma mit sich brachte, töteten Dutzende von Menschen in Florida. Für Wahl, der den Sturm im kleinen Apartment seiner Familie aussaß, war die Erfahrung eine seltene Gelegenheit, selbst ein Phänomen zu beobachten, über das er sich seit Langem Sorgen machte: Extremfluten. Sie entstehen, wenn Sturmfluten, Gezeitenhochwasser und hohe Wellen zusammentreffen.

Solche Extremfluten können die Barrieren an den Küsten überwinden und Wohngebiete sowie wichtige Einrichtungen der

Infrastruktur überschwemmen. Genau das passierte beispielsweise 2005 in New Orleans und Umgebung – die Region hat sich immer noch nicht von den Schäden in Höhe von über 100 Milliarden Dollar durch den Hurrikan Katrina erholt – und 2017 durch Irma in Jacksonville in Florida. Dort stand das Wasser in einem Teil der Stadt zwei Meter hoch und schloss viele Einwohner ein. Brücken und der internationale Flughafen mussten geschlossen werden.

Größte Bedrohung der Menschheit

Global steigt der Meeresspiegel durch das Abschmelzen von Gletschern und Polkappen sowie durch die Wärmeausdehnung des Wassers um gerade einmal drei Millimeter pro Jahr. Die Forscher haben sich zu meist darauf konzentriert, Ursachen und Stärke des Anstiegs zu verstehen. Doch der Anstieg des allgemeinen Meeresspiegels beeinflusst zugleich Extremfluten – mit zerstörerischen Folgen.

In den kommenden Jahrzehnten könnte es alle ein oder zwei Jahre zu einer »Jahrhundertflut« kommen – einer Flut also, die nur alle 100 Jahre und damit in jedem Jahr

nur mit einer Wahrscheinlichkeit von einem Prozent auftreten sollte. In Europa könnten die Kosten durch Überflutungen entlang der Küsten bis zum Jahr 2100 um den Faktor 20 ansteigen. Und in einigen Regionen könnten die Jahrhundertfluten zudem an Schwere zunehmen.

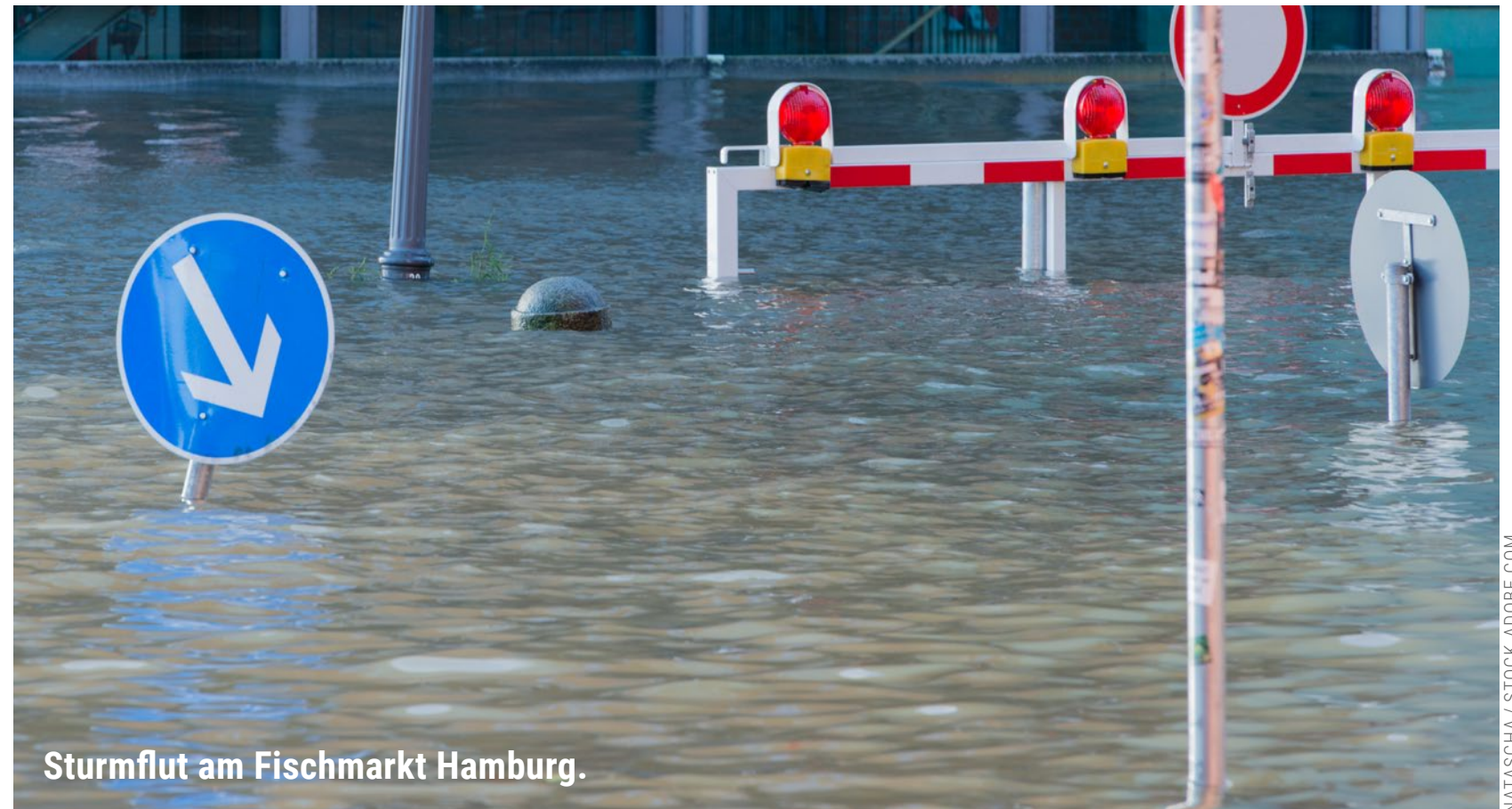
Wahl und eine kleine Gruppe von Kollegen sind der Ansicht, dass sich viel mehr Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler damit befassen sollten, wie sich solche katastrophalen Ereignisse und ihre Folgen für die Küstenbewohner in der Zukunft verändern. Denn Extremfluten entwickeln sich ihrer Meinung nach zu den größten Bedrohungen, denen die Menschheit zukünftig ausgesetzt sind. »Wenn wir über das Flutrisiko reden, müssen wir ab einem gewissen Punkt Extremwerttheorie betreiben«, so Wahl. »Denn es sind Ereignisse mit niedriger Wahrscheinlichkeit, aber großen Folgen, über die wir uns wirklich Sorgen machen müssen.«

Forschung für die Vorsorge

Wahl und andere Forscher haben in historischen Aufzeichnungen recherchiert und

Modelle verwendet, um die Gefahren solcher Ereignisse vorherzusagen. Die Ergebnisse hängen von der geografischen Lage ab. Für manche Küstenregionen wird die Anzahl von Extremfluten gefährlich ansteigen. Andere Regionen dagegen werden lediglich von »störenden« Fluten betroffen sein – regelmäßige Überschwemmungen durch überdurchschnittlich hohe Gezeiten, die Straßen und tief liegende Gebiete betreffen, aber keine dramatischen Schäden verursachen.

Die Regionen benötigen dieses Wissen, um Vorsorge treffen zu können, sagt Maya Buchanan, Spezialistin für Klimaänderungen beim Beratungsunternehmen ICF International in New York. Gegen lediglich störende Fluten können die Behörden mit Verbesserungen des Abwassersystems und anderen Infrastrukturmaßnahmen vorgehen. Aber Extremfluten erfordern extreme Maßnahmen: den Bau und die Erhöhung von Dämmen und anderen Küstenbefestigungen. Insgesamt sind weltweit etwa 300 Millionen Küstenbewohner durch solche Ereignisse bedroht. «Das ist von erheblicher Bedeutung für die Entscheidungsfindung und für die Gesellschaft insgesamt», sagt Buchanan.



Am 6. Februar 1978 traf ein Blizzard mit historischer Stärke auf die Neuengland-Staaten der USA. Autos blieben im Schnee stecken. Flutwellen und Sturmböen warfen entlang der Küste Häuser um, als handelte es sich um Puppenstuben. Insgesamt 54 Menschen kamen ums Leben, und Tausende von Gebäuden wurden zerstört.

Die offiziellen Aufzeichnungen der Hafenbehörde von Boston zeigen einen – gegen die Gezeiten korrigierten – Anstieg des Wasserspiegels um einen Meter in zwölf Stunden. Der Wasserstand war einer der

höchsten an diesem Ort seit Beginn der Aufzeichnungen. Das ist lediglich ein Beispiel für Aufzeichnungen aus aller Welt, die nicht nur das tägliche Auf und Ab der Gezeiten, sondern auch ungewöhnliche Wasserstände durch Stürme festhalten.

Stündliche Messungen

Ein von Philip Woolworth vom National Oceanography Centre in Liverpool geleitetes Team begann 2009 mit der Einrichtung einer speziellen globalen Datenbank, die möglichst viele derartige Aufzeichnungen erfas-

sen sollte. Das Team konzentrierte sich auf Messungen, die zumindest einmal pro Stunde durchgeführt wurden – häufig genug, um den Hochwasserstand im Verlauf eines sich rasch verändernden Sturms zu erfassen.

Das »Global Extreme Sea Level Analysis«, kurz GESLA, getaufte Projekt ist inzwischen die Adresse für Forscher, die sich mit der zeitlichen Entwicklung von Extremfluten befassen. So zeigen die Daten, dass seit 1970 die Stärke und die Häufigkeit von Extremfluten weltweit zugenommen haben. In einigen Gegenden ist der Wasserstand von 50-Jahres-Fluten um über zehn Zentimeter gestiegen.

Hauptursache dafür ist der Anstieg des mittleren Meeresspiegels. Wenn die Wellen der Ozeane ohnehin höher und höher an die Küsten schlagen, dann erreichen Sturmfluten umso leichter Rekordhöhen. Nach einer Schätzung gehen zwei Milliarden Dollar der insgesamt auf zwölf Milliarden Dollar bezifferten Schäden in New York durch den Hurrikan Sandy im Jahr 2012 auf das Konto des steigenden Meeresspiegels.

Aber auch andere Faktoren beeinflussen Extremfluten. Sich langfristig verändernde atmosphärische Strömungen spielen eine Rolle. Ein starker El Niño beispiels-

weise verschiebt große Wassermassen so, dass die Wahrscheinlichkeit für hohe Wasserstände an der Westküste der USA zunimmt und im tropischen Westpazifik abnimmt. Auch das Ansteigen oder Absinken von Landmassen ist von Bedeutung. So hat sich ein großer Teil der skandinavischen Küsten gehoben, seit die enormen Gletscher am Ende der letzten Eiszeit verschwanden. Und im südlichen Asien sinkt das Ganges-Brahmaputra-Delta langsam ab, weil sich die Sedimente verdichten.

Big Data

GESLA, 2016 auf den neuesten Stand gebracht, enthält jetzt 1355 Aufzeichnungen aus der ganzen Welt, die insgesamt 39 000 Stationsjahre abdecken (Zahl der Stationen multipliziert mit der Länge ihrer Aufzeichnungen). Die meisten Daten stammen aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Doch das reicht nicht aus, um die langfristige Statistik zu verbessern. Eine Faustregel besagt, dass man die Häufigkeit von Ereignissen etwa über den vierfachen Zeitraum in die Zukunft extrapolieren kann, der durch Aufzeichnungen in der Vergangenheit abgedeckt ist. Einige Jahrzehnte an Daten sind also nicht ausreichend, um Aussa-

gen über 10 000-Jahres-Fluten zu machen – aber solche Informationen sind für einige Regionen und beispielsweise für Kernkraftwerke wichtig.

An der Portland State University im US-Bundesstaat Oregon arbeitet der Ozeanograf Stefan Talke daran, die historischen Aufzeichnungen der Wasserstände in den USA zu erweitern. Die Nationale Ozean- und Atmosphärenbehörde NOAA der USA sammelt Gezeitenpegel für einen großen Teil des Landes. Ihre Aufzeichnungen überdecken den größten Teil des 20. Jahrhunderts und reichen teilweise sogar weit in das 19. Jahrhundert zurück.

Zusammen mit Kollegen und Studenten besucht Talke die über das Land verstreuten Archive und sucht nach Informationen über Variationen der Gezeiten und Sturmfluten, die von der NOAA noch nicht systematisch digitalisiert worden sind. »Wir stellen uns alle möglichen Fragen darüber, was in Zukunft geschehen wird«, sagt Talke, »dabei verstehen wir noch nicht einmal die Vergangenheit so gut, wie wir es könnten. Wie sollen wir dann in die Zukunft extrapolieren?«

Talke und seine Kollegen haben Unmengen handschriftlicher Tabellen durchfors-

tet sowie dazugehörige Notizen, die beschreiben, wie die Messungen durchgeführt wurden. Diese Notizen sind von großer Bedeutung, um die Qualität der Daten einzuschätzen. Sie beschreiben unter anderem das Versagen von Uhren, vereiste

Messinstrumente und fragwürdige Messungen eines betrunkenen Beobachters. Insgesamt erfassten die Forscher etwa 300 000 Dokumente mit insgesamt 6500 Stationsjahren zuvor verlorener oder vergessener Messungen.

30 Zentimeter in 200 Jahren

In Boston beispielsweise stießen sie auf Aufzeichnungen aus den 50 Jahren vor dem Beginn der modernen Aufzeichnungen der NOAA im Jahr 1921. Anhand dieser und noch älterer Daten berechneten Talke und seine Kollegen, dass der Meeresspiegel in Boston seit den 1820er Jahren um 28 Zentimeter angestiegen ist. Dieser Anstieg führte zu häufigeren Extremwasserständen: Was in den 1820er Jahren noch eine Jahrhundertflut war, tritt nun im Durchschnitt alle acht Jahre ein.

Die Forscher stießen auch auf extreme Ereignisse, die zu einer neuen Einordnung heutiger Fluten führten. Ein Sturm im Jahr 1909 beispielsweise führte zu ähnlichen Überflutungen wie der Blizzard von 1978. »Die Suche in den Archiven zeigt uns also, dass das Ereignis von 1978 keineswegs so anormal war«, sagt Talke.

Doch die Fluten von 1909 und 1978 wurden noch übertroffen von einem gewalti-



NATASCHA / STOCK.ADOBE.COM

FISCHAUKTIONSHALLE IN HAMBURG BEI STURMFLUT

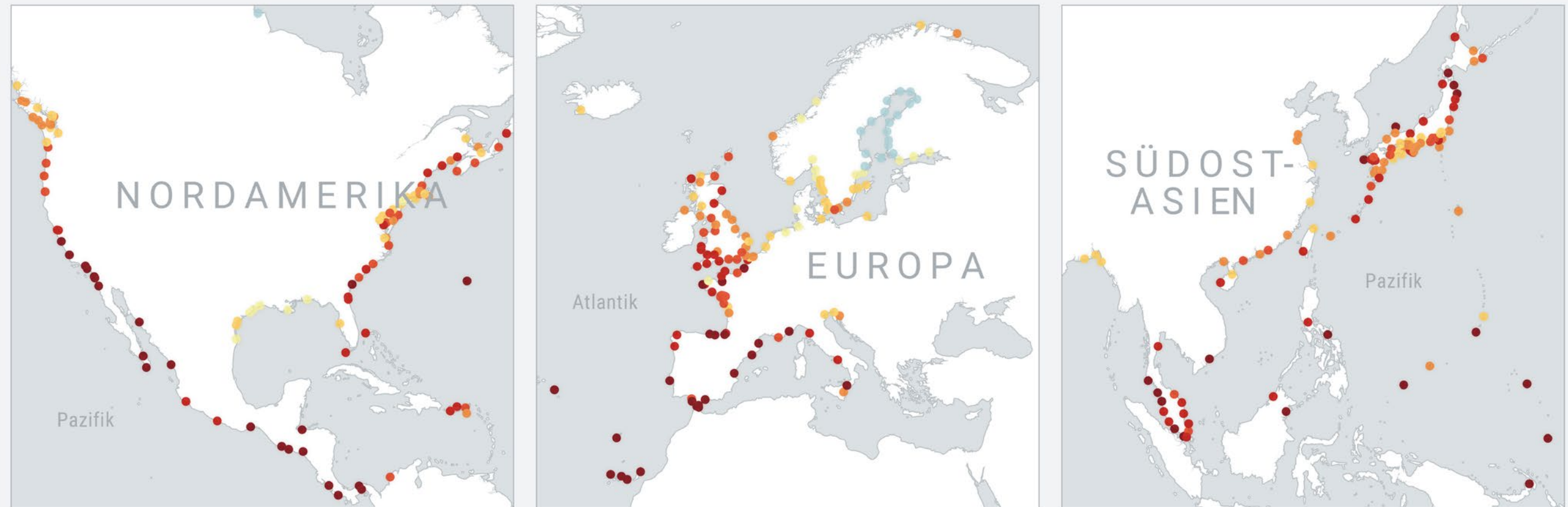
**Auch an Europas Küsten könnten
Sturmfluten häufiger werden.**

DIE NÄCHSTE FLUT KOMMT BESTIMMT

Rund um den Globus steigt der durchschnittliche Meeresspiegel, und das beeinflusst, wie häufig extreme Überschwemmungen auftreten. Einige Orte (dunklere rote Punkte) werden bereits im Jahr 2050 alle ein bis fünf Jahre eine Flut erleben, wie sie sich unter heutigen Bedingungen etwa alle 100 Jahre ereignen würde. An anderen Stellen dagegen, wie zum Beispiel an der deutschen Nordseeküste, gibt es in naher Zukunft wohl nicht nennenswert mehr solcher Jahrhundertereignisse; in Skandinavien, wo sich das Land nach der letzten Vergletscherung noch hebt, werden schwere Fluten teilweise sogar seltener (hellblaue Punkte). Dagegen steigt das Risiko durch Sturmfluten in West- und Südwesteuropa deutlich.

Geschätzte Wiederholungszeiträume von gegenwärtigen Jahrhundertfluten um das Jahr 2050 (in Jahren):

● 1-2 ● 2-5 ● 5-10 ● 10-20 ● 20-50 ● 50-100 ● 100-10 000



NATURE, NACH WAHL, T. ET AL.: UNDERSTANDING EXTREME SEA LEVELS FOR BROAD-SCALE COASTAL IMPACT AND ADAPTATION ANALYSIS. IN: NATURE COMMUNICATIONS 8, ART. 16075, 2017; WITZE, A.: THE CRUELLEST SEAS. IN: NATURE 555, S. 156-158, 2018; DT. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

gen Zyklon, der Boston im Januar 2018 traf. Dämme brachen, und eisiges Wasser überflutete Wohngebiete. Und Anfang März 2018 führte ein weiterer starker Wintersturm zu einer Flut knapp unter dem Rekord vom Januar – gerade einmal zwei Monate später.

Talke teilt seine Daten mit anderen Wissenschaftlern und mit den Mitarbeitern von Behörden wie dem Army Corps of En-

gineers, das für den Bundesküstenschutz der USA zuständig ist. Der Forscher hofft, dass ein verbessertes Verständnis der langfristigen Trends eine bessere Vorbereitung auf künftige Fluten ermöglicht.

»Fluten werden häufiger«

Auf Basis der Daten über vergangene Extremfluten bieten sich den Forschern meh-

rere Möglichkeiten, Vorhersagen über die Häufigkeit künftiger Extremfluten zu machen. Die einfachste Methode ist die Gumbel-Verteilung. Dieses Verfahren fand beispielsweise Anwendung beim jüngsten Bericht des Weltklimarats IPCC über den Anstieg des Meeresspiegels in Abhängigkeit von den Emissionen von Treibhausgasen. Doch die Gumbel-Verteilung sei grob

vereinfachend und sage insbesondere extreme Ereignisse nur schlecht voraus, kritisiert Wahl. Eine typische Gumbel-Verteilung erfasse zwar die jährlichen Höchstwasserstände an einem Ort. Dadurch zähle aber nur die jeweils höchste Flut des Jahres – es könnte jedoch mehrere Extremfluten gegeben haben.

Buchanan und ihre Kollegen haben deshalb jüngst ein anderes Verfahren eingeführt, die verallgemeinerte Pareto-Verteilung, um alle stündlichen Messungen des Wasserstands zu berücksichtigen, die höher sind als 99 Prozent der Wasserstände. Damit gehen mehr Daten in die Analyse ein, und man erhält ein genaueres Bild der Änderungen im Verlauf der Zeit. Die Gruppe untersuchte alle von der NOAA erfassten Gezeitenpegel der vergangenen 30 Jahre. Dann kombinierten die Forscher diese Daten mit einer Analyse des Anstiegs des Meeresspiegels, um vorherzusagen, wie oft es an verschiedenen Orten zu Fluten kommt und wie hoch diese Fluten sind.

Das Ergebnis lässt sich einfach zusammenfassen. »Fluten werden häufiger«, sagt Buchanan. Doch die Untersuchung zeigt auch, dass die Küstenregionen der USA unterschiedlich stark betroffen sind. In Städ-

ten an der Ostküste wie New York und Charleston sind es vor allem die »störenden« Fluten, die häufiger auftreten. Im Gegensatz dazu müssen Städte an der Westküste wie Seattle in Washington und San Diego in Kalifornien häufiger mit Extremfluten rechnen. Im Westen der USA ist die Küste allgemein steiler, was die Anwohner vor Fluten schützt. Der Anstieg des Meeresspiegels könnte den Fluten jedoch so viel Schwung verleihen, dass sie diese schützenden Barrieren überwinden.

Die Unterschiede zwischen den Regionen können enorm sein. Wenn der Meeresspiegel in Charleston um einen halben Meter ansteigt, würden heutige Jahrhundertfluten 16-mal häufiger auftreten. In Seattle dagegen würde die Häufigkeit sogar auf das 335-Fache ansteigen, so dass solche Fluten etwa alle vier Monate eintreten würden.

Lage ist alles!

Auch der Ozeanograf Sean Vitousek von der University of Chicago versucht, das Risiko von Fluten abzuschätzen. Er verwendet dabei eine statistische Methode, die als allgemeine Extremwertverteilung bezeichnet wird. In einer Veröffentlichung im Fachjournal »Scientific Reports« kombi-

nierten er und seine Kollegen Modelle globaler Wellen, Gezeiten und Sturmfluten mit Vorhersagen des Anstiegs des Meeresspiegels, um die Zunahme von Überflutungen an den Küsten in den kommenden Jahrzehnten zu extrapolieren.

Ein Anstieg des globalen Meeresspiegels um 10 bis 20 Zentimeter – der bis spätestens 2050 erwartet wird – würde die Häufigkeit von Extremfluten in den Tropen verdoppeln, so das Ergebnis ihrer Analyse. Am stärksten betroffen wären dabei pazifische Inselnationen, deren Landmassen überwiegend nur wenig über den Meeresspiegel ragen. Hier entscheidet die Höhe des Meeresspiegels ganz wesentlich über die Variabilität typischer Fluten. Nationen wie Karibati, die Marshall-Inseln und die Malediven drohen nicht nur völlig unterzugehen. Bei ihnen steigt auch das Risiko für regelmäßige Überflutungen, die die Wasserversorgung gefährden und die Landwirtschaft ruinieren können.

Die Arbeit von Vitousek gehört zu den ersten, die nicht nur Gezeiten und Sturmfluten, sondern auch Wellen bei ihrer Analyse berücksichtigen. Er hofft seine statistische Methode weiter zu verbessern, um zu noch genaueren Vorhersagen für die Häu-

figkeit von Extremfluten zu kommen. »Wann erreichen wir den Zeitpunkt, an dem wir die Marke von 50-Jahres-Fluten in jedem Jahr überschreiten?«, fragt sich der Forscher. »Wir müssen wissen, wie viel Zeit uns bleibt, um ingenieurtechnische Lösungen für das Problem zu finden.«

Die Vorhersage von Extremfluten wird durch die unsichere Vorhersage des Anstiegs der Treibhausgase erschwert. In der allerersten Extrapolation der Folgen extremer Wasserstände für Europas Küsten berechneten Forscher im Jahr 2017, dass die Höhe von Jahrhundertfluten bis 2100 um 57 bis 81 Zentimeter ansteigen könnte. Doch das ist lediglich der Mittelwert über alle europäischen Küsten. An den Küsten der Nordsee könnten die Fluten bei einem starken Anstieg der Treibhausgase sogar um einen ganzen Meter höher ausfallen. Die Küsten Portugals und im Golf von Cádiz dagegen könnten eine Abnahme extremer Wasserstände erleben. Grund dafür ist eine Abschwächung der starken Winde, die Sturmfluten und Wellen antreiben.

»Wir müssen jetzt Entscheidungen treffen«

Durchgeführt hatte diese Analyse ein Team um den Ozeanografen Michalis Vousdou-

kas vom European Joint Research Centre im italienischen Ispra. Die Forscher untersuchen jetzt die wirtschaftlichen Folgen der Fluten. Schäden durch Überflutungen entlang von Flüssen steigen danach bis 2100 um 0,04 bis 0,1 Prozent des europäischen Bruttosozialprodukts, wie Vousdoukas im vergangenen Dezember auf einer Tagung der American Geophysical Union in New Orleans berichtete. Doch die Schäden durch Fluten entlang der Meeresküsten, die gegenwärtig bei 0,01 Prozent liegen, könnten auf 0,29 bis 0,86 Prozent anwachsen. »Überflutungen an den Küsten werden damit zu den wichtigsten natürlichen Gefahren der Zukunft«, so der Forscher.

Vousdoukas und andere Wissenschaftler, die auf diesem sich rasant entwickelnden Forschungsgebiet tätig sind, legen Wert darauf, ihre Ergebnisse den Entscheidungsträgern in den Küstenregionen zu vermitteln. In Orlando beispielsweise gehört Wahl einer neuen Institution an, die Ingenieure, Ozeanografen, Ökonomen, Gesellschaftswissenschaftler und andere Experten zusammenbringen soll. An diesem neuen National Centre for Integrated Coastal Research mit Hauptquartier an der University of Florida hoffen die Forscher, Politiker mit genau den

Informationen zu versorgen, die nötig sind, um über den Ausbau von Küstenbefestigungen in den nächsten Jahrzehnten zu entscheiden. Ganz wichtig ist dabei herauszufinden, wie schlimm die Extremfluten im Extremfall werden können.

»Ich glaube, wir können auf Basis unseres jetzigen Wissens bereits Ratschläge geben«, sagt Wahl. Und es sei wichtig, damit schon jetzt anzufangen, denn die Anpassungen nehmen Zeit in Anspruch, betont der Forscher. Als Beispiel nennt er die Flutbarriere an der Themse bei London. Sie verhindert Überflutungen der Stadt, aber ihr Bau dauerte mehrere Jahrzehnte. Die Errichtung einer solchen Barriere wurde nach der verheerenden Flut von 1953 vorgeschlagen – aber erst 1982 konnte sie in Betrieb genommen werden. Die Gesellschaft dürfe nicht mehr länger damit warten, sich auf Extremfluten vorzubereiten, so Wahl: »Wir müssen jetzt Entscheidungen treffen.« ↩

(Spektrum – Die Woche, 42/2018)



KLIMAFORSCHUNG

Das Wolkenparadoxon

von Kate Marvel

Die enorme Vielfalt an Wolken macht es schwierig vorherzusagen, wie sie auf eine weitere Erwärmung der Atmosphäre reagieren werden. Erst allmählich beginnen Forscher zu verstehen, ob Wolken den Klimawandel eher abbremsen oder beschleunigen.

U nmengen an Daten deuten darauf hin, dass sich die Erde in diesem Jahrhundert und darüber hinaus deutlich erwärmen wird. Schwierig ist es jedoch bei der Frage, wie hoch der Temperaturanstieg genau ausfallen wird. Vielleicht ein Grad Celsius zusätzlich, zwei oder gar vier? Die Antwort hängt – neben der Entwicklung der weltweiten CO₂-Emissionen – vor allem von den Wolken ab. Der Klimawandel beeinflusst die Wolkenverteilung in der Atmosphäre, was die globale Erwärmung entweder abbremsen oder beschleunigen könnte. Vorhersagen zu können, welches Szenario eintritt, würde dabei helfen, wirksame Maßnahmen gegen das Aufheizen der Erde zu beschließen.

Wissenschaftler simulieren das Klima mit insgesamt über 20 ausgefeilten Computermodellen, deren Vorhersagekraft sie durch Abgleichen mit umfangreichen Wetterdaten testen. Alle Modelle zeigen, dass sich unser Planet auf Grund anhaltender

Treibhausgasemissionen erwärmt. In puncto Wolken jedoch waren sich die Forscher lange uneins. Das scheint sich nun zu ändern: Simulationen, wie Wolken die Temperatur der Atmosphäre regulieren, nähern sich einander an. Auch Satellitendaten und andere Wetterbeobachtungen liefern neue Erkenntnisse über die klimatischen Einflüsse der Wolkendecke. Bieten sie Anlass zu Hoffnung, oder müssen wir eher Schlimmeres befürchten?

Bis zur industriellen Revolution hatte die Menschheit sechs Kontinente besiedelt und Wälder gerodet, um Weideland und Ackerflächen zu gewinnen oder Städte zu errichten. Dennoch lag die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre seit Jahrtausenden stabil bei zirka 280 Teilchen pro einer Million Luftteilchen (englisch: parts per million oder ppm). Dann wird der Verbrennungsmotor erfunden. In den folgenden 150 Jahren steigt der CO₂-Gehalt in der Luft dramatisch an und heizt die Troposphäre auf. Inzwischen enthält die Atmosphäre mehr als 400 CO₂-Teilchen pro Million Luftbestandteile. Die Kontinente werden wärmer, ebenso die Ozeane. Zudem verändert sich die atmosphärische Zirkulation von Luftmassen und Wasserdampf. Hält

AUF EINEN BLICK

Atmosphäre im Wandel

- 1 Wolken bestimmen in hohem Maß, wie stark die Erderwärmung ausfallen wird. Computersimulationen der atmosphärischen Prozesse sind jedoch schwierig.
- 2 Satellitendaten legen nahe, dass der Klimawandel hohe Wolken noch höher steigen lässt und die planetare Wolkendecke vom Äquator Richtung Pole verschiebt.
- 3 Diese Rückkopplungen werden den globalen Temperaturanstieg vermutlich beschleunigen, auch weil kühlende Wolkeneffekte offenbar weniger Linderung bieten als bislang angenommen.

Kate Marvel ist Klimaforscherin am Goddard Institute for Space Studies der NASA sowie am Department für angewandte Physik und Mathematik der New Yorker Columbia University.

Wärmer oder kälter? Wie Wolken unser Klima beeinflussen

Im Zuge des Klimawandels könnte sich die Wolkendecke global verschieben und so den Planeten zusätzlich aufheizen oder abkühlen. Satellitendaten zeigen, dass sich die untere Atmosphäre schon heute verändert, so dass Wolken vermutlich mehr Wärmestrahlung auf der Erde zurückhalten. Dieser Trend könnte sich in Zukunft weiter verstärken.



der Trend an, wird sich die CO₂-Konzentration gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter bis Mitte des 21. Jahrhunderts verdoppelt haben. Die Temperatur auf der Erde wird dann noch viele hundert Jahre lang weiter ansteigen, bis schließlich ein neues Wärmegleichgewicht erreicht ist.

Die Folgen einer Verdoppelung des CO₂-Gehalts für den Planeten nennt man Gleichgewichtsklimaempfindlichkeit.

Sämtliche Computermodelle sagen voraus, dass diese größer als null ist, sich die Erde global betrachtet also aufheizen wird. Wie stark, darüber gibt es keinen Konsens. Die Prognosen reichen von etwa 2 bis 4,5 Grad Celsius, von erheblich bis katastrophal.

Von Kumulus bis Zirrus – ein Cloud Atlas verrät den Temperatur- effekt verschiedener Wolkentypen

Zu den Hauptstreitpunkten der Modelle gehören Wolken. Würde man ihre Entstehung und ihr Verhalten besser verstehen, könnten Forscher das Klima der Zukunft deutlich genauer vorhersagen. Die Rolle von Wolken zu bestimmen, ist aus zwei Gründen schwierig – weil verschiedene Typen unterschiedlich auf Erwärmung re-

agieren, und weil sich eine Veränderung der Wolkendecke auf den Strahlungshaushalt auswirkt.

Klimaforscher bezeichnen diesen wechselseitigen Einfluss als Rückkopplung. Einige klimatische Rückkopplungsmechanismen sind gut verstanden: Meereis zum Beispiel ist weiß und reflektiert Sonnenlicht nahezu vollständig (hohe Albedo). Wenn es schmilzt, bleibt dunkleres Wasser zurück, das deutlich mehr Strahlung absorbiert (geringe Albedo), sich also erwärmt. Die Folge: Mehr reflektierendes Meereis verschwindet, und eine immer größere dunkle Fläche ist der Sonne ausgesetzt, was die Erwärmung weiter beschleunigt. Wie sich diese positive Rückkopplung auf die Temperatur der Atmosphäre auswirkt, darüber sind sich die Modelle weitestgehend einig.

Schwieriger ist es, die Wechselwirkung zwischen Wolken und Klima zu bestimmen. Wissenschaftler haben eine Art Taxonomie der Wolken erstellt und sie geordnet, nach ihrer Höhe über der Erdoberfläche und ihrer Durchlässigkeit für einfallende Strahlung. Niedrige Wolken können recht transparent sein, wie Kumuluswolken (Haufenwolken) an einem sonnigen Tag, oder eher

opak, etwa als küstennahe Nebeldecke. Weiter oben in der Atmosphäre reicht das Spektrum ebenfalls von Zirruswolken (Federwolken), die Sonnenstrahlen fast völlig durchlassen, bis hin zu Gewitterwolken, die den Himmel verdunkeln.

Die Klassifizierung ist nützlich, weil sie verdeutlicht, wie Wolken die Erde erwärmen oder kühlen. Einige verstärken den Treibhauseffekt. Vor allem in der oberen Atmosphäre halten sie recht wirkungsvoll einen Teil der Strahlung zurück, die unser Planet aussendet. Andere bewirken das Gegenteil, indem sie verhindern, dass Sonnenlicht die Erdoberfläche überhaupt erst erreicht. Insbesondere dichte, niedrige Wolken reflektieren einen Großteil der einfallenden Strahlung. In der Summe überwiegt derzeit der abkühlende Effekt. Tatsächlich ist er netto etwa fünfmal größer als die Erwärmung bei einer Verdopplung der CO₂-Konzentration.

Folglich können bereits kleine Veränderungen in der planetaren Wolkendecke große Auswirkungen auf das globale Klima haben. Mehr hohe, transparente Wolken, die Sonnenlicht durchlassen, nicht aber die Rückstrahlung der Erde, würden den Planeten aufheizen. Ein verstärktes Auftreten

niedriger, opaker Wolken hingegen würde uns vor der Sonne stärker abschirmen und für kälteres Klima sorgen. Darüber hinaus gilt es zu berücksichtigen, wohin sich die Wolken bewegen: Wenn reflektierende Wolken aus tropischen und subtropischen Breiten polwärts wandern, nimmt ihre Kühlwirkung ab. Wolken wiederum, die in kältere Bereiche der Atmosphäre aufsteigen, haben einen größeren Treibhauseffekt. Möglicherweise würden kalte Wolken in einer wärmeren Welt mehr Wassertröpfchen und weniger Eiskristalle enthalten, so dass sie dichter wären – und damit ein effektiverer Sunblocker für die Erde.

Da diese Phänomene nie isoliert auftreten, haben Klimamodelle Schwierigkeiten, den Einfluss von Wolken auf die globale Erwärmung zu ermitteln. Einige prognostizieren stark positive Rückkopplungen, die den Temperaturanstieg signifikant verstärken, und berechnen so eine Gleichgewichtsklimaempfindlichkeit von bis zu 4,5 Grad. Andere sagen leicht negative Effekte voraus, die eine Erwärmung teilweise aufwiegen würden.

Ein weiterer Grund, warum Computer Wolken oft nicht adäquat simulieren können, sind die unterschiedlichen Größen-

skalen relevanter Prozesse. Einerseits entstehen Wolken aus kleinsten Wassertröpfchen und Eiskristallen, andererseits bedecken sie im Mittel etwa 70 Prozent der Erde. Sie sind winzig und riesig zugleich. Deshalb müssen sich Klimaforscher entscheiden, wenn sie ihre Modelle programmieren: Entweder sie konzentrieren sich auf die kleinskaligen Reaktionen der Wolkenbildung und -auflösung, oder sie beschreiben möglichst genau die großräumigen Bewegungen von Luftmassen rings um den Planeten. Es bräuchte zu viel Rechenpower, um alle Wassertropfen in der Atmosphäre über längere Zeiträume im Detail zu verfolgen.

Daher entwickeln Wissenschaftler vereinfachte Gleichungen, die auf den Gesetzen der Physik der Atmosphäre basieren und das Nettosystemverhalten berechnen. Hochauflösende regionale Simulationen dienen als Kontrolle und helfen, die Parameter globaler Klimamodelle zu optimieren. Dennoch ist es immer ein Kompromiss zwischen Mikro- und Makroebene.

Welche Modellkomponenten gilt es zu verbessern? Eine besondere Herausforderung stellen Wolken in großer Höhe dar. Messungen deuten darauf hin, dass sich

die Zonen innerhalb der Atmosphäre durch den Klimawandel verschieben: Die Troposphäre, die unterste und für das Wetter relevante Schicht, expandiert, so dass die Tropopause – der Übergang zur Stratosphäre – nach oben wandert. Und mit ihr die Wolkengrenze.

Mark Zelinka vom Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien hat sich intensiv mit den Folgen dieses Aufstiegs beschäftigt. Wenn sich der Planet auf Grund von CO₂-Emissionen erwärmt, erklärt der Klimaforscher, gibt er auch mehr Energie in Form von Infrarotstrahlung ins All ab. Sollten Wolken ihre Höhe beibehalten, würden sie sich wie die Atmosphäre ebenso aufheizen und mehr Wärme nach außen verlieren. Er und andere Wissenschaftler glauben jedoch, dass Wolken eine bestimmte Temperatur bevorzugen und sich entsprechend in der Troposphäre positionieren. Das heißt, zusätzliche Wärmeenergie würde kaum ins All abgestrahlt, sondern größtenteils in der unteren Atmosphäre gespeichert. Eine klassische positive Rückkopplung – je höher die Wolken steigen, desto schlechter kann die Erde abkühlen.

Bei tief hängenden Wolken weisen die Modelle weitestgehend in die gleiche Rich-



GEWITTERWOLKE

Je nach Höhe in der Atmosphäre, Ausdehnung und Wassergehalt wirken Wolken unterschiedlich auf das Klima.

tung. In einer wärmeren Welt wird es weniger von ihnen geben. Laut Mark Webb vom britischen Wetterdienst Met Office in Exeter sind die Ursachen dafür unklar. Er und seine Kollegen nehmen an, dass trockene Luftmassen, die sich über wasserreichen Schichten bewegen, zum Rückgang niedriger Wolken führen könnten. Durch vertikale Konvektionsströme oder turbulente Verwirbelungen würden sie die feuchte Luft verdünnen und so Wolkenbildung verhin-

dern. Aktuell könnten Modelle solche lokalen Prozesse jedoch auf Grund begrenzter Rechnerleistung nicht auflösen und nur indirekt abschätzen, erklärt Mark Webb. Aber der Trend scheint klar: Die Decke niedriger Wolken wird dünner, und mehr Sonnenlicht trifft auf die Erdoberfläche – was die Erwärmung verstärkt.

Darüber hinaus verändert sich die atmosphärische Zirkulation. Ihr Motor sind die unterschiedlichen Strahlungsintensi-

täten und Temperaturen zwischen Äquator und Arktis beziehungsweise Antarktis. Wenn warme tropische Luftmassen in Äquatornähe aufsteigen, kühlen sie ab und können weniger Wasserdampf speichern: Es kommt zu kräftigen Regenfällen. In der Höhe strömt die Luft in Richtung der Pole und verliert zunehmend an Wärme. Um den 30. Breitengrad sinkt sie völlig dehydriert wieder ab, weshalb hier ein Wüstengürtel beide Hemisphären umspannt.

Der Klimawandel verschiebt diese Zonen. Der hohe Norden erwärmt sich schneller als die Tropen (Forscher sprechen von arktischer Verstärkung), so dass das Temperaturgefälle zwischen Äquator und Nordpol schrumpft. Eine Folge: Die regenreichen Tropen expandieren, und in Randgebieten wie der Mittelmeerregion oder dem Südwesten der USA wird es in Zukunft vermutlich noch trockener sein. Das Gleiche zeigt eine Auswertung von Satellitendaten. Sollten Wolken dieser Verschiebung folgen, würden sie entsprechend mehr Sonnenlicht in höheren Breiten reflektieren, wo die einfallende Strahlung schwächer ist als weiter südlich. Der Kühleffekt wäre reduziert.

Es gibt auch eine wichtige negative Rückkopplung, die Modelle gegenwärtig nicht hinreichend berücksichtigen: Bei Erwärmung ändert sich in Wolken das Verhältnis von Eiskristallen zu Wassertröpfchen. Dicke, tief hängende Wolken enthalten mehr flüssiges Wasser und sind stärker opak als jene in großer Höhe. In einer wärmeren Welt könnte sich der Eisanteil hoher Wolken verringern, so dass ihr Reflexionsgrad (Albedo) zunehmen würde.

Es liegt in der Natur von Wolken, sich ständig zu verändern. Das macht es umso



schwieriger, den globalen Temperaturanstieg genauer vorherzusagen. Hilfreich ist daher ein Blick zurück, auf den Wandel, der sich in den vergangenen Jahrzehnten bereits vollzogen hat. Seit den 1980er Jahren kreisen Wettersatelliten um die Erde, und fast ebenso lange vermessen Meteorologen die planetare Wolkendecke. Indem Klimaforscher Computermodelle mit den gewonnenen Daten abgleichen, können sie ihre Prognosen präzisieren.

Messungen aus den frühen Tagen der Erdbeobachtung sind teilweise problematisch, etwa weil die Instrumente helle Ob-

jekte über schneebedeckten Regionen nicht identifizieren konnten oder Wolken nicht sahen, die sich unter höheren versteckten. Inzwischen aber erreichen uns aus dem Orbit detailgetreue Bilder globaler Klima- und Wetterphänomene, nicht zuletzt dank einer Satellitenformation der NASA namens Afternoon Constellation oder A-Train. Diese sechs Trabanten folgen wie die Wagons eines Zugs im Abstand weniger Minuten derselben Umlaufbahn und überfliegen den Äquator täglich am frühen Nachmittag. Einer der Satelliten, CloudSat, nutzt Radiowellen, die durch hohe, dünne

Wolken dringen, um jene weiter unten in der Troposphäre zu messen. Er gibt zudem Auskunft, ob es regnet oder schneit. CALIPSO hingegen setzt auf Laserimpulse (Lidar), um Wassertröpfchen und Eiskristalle in Wolken zu bestimmen.

Auf der Suche nach Langzeittrends im Rauschen von kurzfristigen Wetterschwankungen

Der A-Train hat Wissenschaftlern zu einem deutlich besseren Verständnis atmosphärischer Prozesse verholfen: Die Satellitendaten scheinen beispielsweise die Vermutung zu bestätigen, dass hohe Wolken im Zuge der Erderwärmung weiter aufsteigen und zusätzliche Wärme zurückhalten. Zudem deutet eine jüngste Studie darauf hin, dass nicht alle hohen Wolken automatisch mehr Wasser und weniger Eis enthalten, wenn die Temperatur der Atmosphäre zunimmt. Das heißt, der Effekt einer negativen Rückkopplung durch größere Albedo wäre schwächer ausgeprägt als bislang angenommen.

CloudSat und CALIPSO ziehen erst seit 2006 ihre Bahnen im Orbit. Ihre Datenreihen sind also zu kurz, um langfristige klimatische Veränderungen von natürlichen

Schwankungen des Klimas zu unterscheiden. Deshalb versuchen Forscher die Zeitserie durch Kombination mit älteren Beobachtungen in eine frühere Vergangenheit hinein zu verlängern. Zwar waren die Instrumente damals eher darauf ausgelegt, kurzfristige Wettertrends zu erkennen, und die verschiedenen Satelliten nahmen Messungen zu unterschiedlichen Tageszeiten vor. Dennoch liefern die Daten wertvolle Hinweise – sofern man an den richtigen Stellen sucht.

Im Jahr 2015 versuchte ich zusammen mit Mark Zelinka die Fragen zu beantworten: An welchen Breitengraden ist der Himmel besonders wolkenverhangen, und wo ist er am klarsten? Wie erwartet fanden wir die stärkste Bewölkung in den Tropen. Auch in den mittleren Breiten, in der so genannten Westwindzone, gab es schmale Streifen mit einer hohen Wolkendichte. Strahlend blauer Himmel herrschte dagegen in den Subtropen. Hier sorgt atmosphärischer Hochdruck für trockene, sonnige Verhältnisse, die Wolkenbildung verhindern.

Anschließend wollten wir anhand von Satellitendaten, die zwischen 1984 und 2009 aufgezeichnet worden waren, herausfinden, ob sich die Lage stark bewölkter

beziehungsweise wolkenfreier Zonen binnen 25 Jahren verschoben hatte. Und tatsächlich: In den mittleren Breiten wanderten die Wolken allmählich Richtung polare Zone, ebenso jenes klare Band der Subtropen. Wie in unseren Modellen expandierten die Tropen, das zeigten mehrere voneinander unabhängige Datensätze. Wir verglichen die Messwerte mit Klimasimulationen, die keine anthropogenen CO₂-Emissionen enthielten, und konnten so natürliche Schwankungen als Ursache der Wolkenverlagerung gen Nord- und Südpol ausschließen.

Die Konsequenzen daraus sind Besorgnis erregend. Wenn sich tiefe, stark reflektierende Wolkendecken zu sehr vom Äquator entfernen, büßen sie ihre Kühlwirkung größtenteils ein: An Stelle von intensiver tropischer Strahlung halten sie lediglich das schwache Sonnenlicht höherer Breiten von der Erde fern. Eine solche Migration der Wolken wäre eine starke positive Rückkopplung und würde nahelegen, dass das Klima empfindlicher auf den ansteigenden CO₂-Gehalt reagiert als bisher vermutet.

Joel Norris von der University of California, San Diego, konnte unsere Ergebnisse in einer späteren Studie bestätigen. Neben

dem Trend, dass Wolken näher an die Pole rücken, zeigten seine Daten, dass hohe Wolken weiter aufsteigen werden. Zwar sind sich Klimaforscher nicht darüber einig, wie bedeutsam diese Veränderungen sind und was ihre Triebkräfte sind – Treibhausgasemissionen, Vulkanausbrüche oder natürliche Schwankungen? Eines aber steht fest: Die verfügbaren Langzeitbeobachtungen liefern keinen Grund zur Annahme, dass Wolken den globalen Temperaturzuwachs abbremsen werden.

Stattdessen zeichnet sich ein anderes Bild ab. Das Aufsteigen von Wolken in der oberen Troposphäre und die Polwärtsverschiebung der Wolkendecke beschleunigen die Erderwärmung. Zugleich nimmt die Albedo weniger stark zu, wenn Eiskristalle zu Wassertröpfchen werden, sprich, die Entlastung durch verstärkte Reflexion der Sonnenstrahlung fällt geringer aus.

Was bedeuten diese Erkenntnisse nun für die Zukunft des Planeten? Wird sich der Temperaturanstieg eher am oberen Ende der prognostizierten Gleichgewichtsklimasensitivität von 2 bis 4,5 Grad einpendeln? Noch ist die Verdopplung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre nur ein mögliches Szenario. Doch wenn wir unsere Emissio-

nen nicht bald deutlich reduzieren, wird es in wenigen Jahrzehnten zur Realität. Und die Erde wird sich merklich aufheizen. Die Ausweitung von Satellitenbeobachtungen und verfeinerte Computermodelle werden Forschern helfen, den Grad der Erwärmung genauer einzugrenzen. Wolken, so scheint es jedenfalls, werden das Problem kaum abmildern, sondern bestenfalls nicht verstärken. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, Mai 2018)

Marvel, K. et al.: External Influences on Modeled and Observed Cloud Trends. In: Journal of Climate 28, S. 4820–4840, 2015

Norris, J. R. et al.: Evidence for Climate Change in the Satellite Cloud Record. In: Nature 536, S. 72–75, 2016

SPEKTRUM KOMPAKT APP



Lesen Sie Spektrum KOMPAKT optimiert für Smartphone und Tablet in unserer neuen App! Die ausgewählten Ausgaben erwerben Sie direkt im App Store oder Play Store.





ARKTIS

Auf dünnem Eis

von Jennifer A. Francis

Hohe Temperaturen, schmelzendes Eis, ansteigende Luftfeuchtigkeit: Das Klima der Arktis stellt einen Extremwert nach dem anderen auf – mit erheblichen Folgen für das Wetter rund um den Globus.

25

Wissenschaftler, darunter ich, erlebten 2003 eine Offenbarung. Die National Science Foundation hatte uns zu einer Klausurtagung über die Arktis in den Wintersportort Big Sky in Montana eingeladen. Jeder von uns hatte sich in der Polarforschung auf sein eigenes, eng gefasstes Spezialgebiet konzentriert. Als wir uns über unsere verschiedenen Blickwinkel austauschten, kamen wir zu einer beängstigenden Erkenntnis: Alle Veränderungen, die jeder Einzelne von uns beobachtet hatte, hingen miteinander zusammen. Gemeinsam ergaben sie ein stimmiges, alarmierendes Bild – die gesamte Arktis steuert auf einen prekären Zustand zu. Und es schien bereits damals kaum möglich, etwas dagegen zu tun.

Wir veröffentlichten einen Fachartikel mit einer unfassbaren, kontroversen Schlussfolgerung: Bei der Geschwindigkeit, mit der sich der Wandel vollzog, bestand die Möglichkeit, dass das Nordpo-

Jennifer A. Francis ist Professorin im Fachbereich Meeres- und Küstenforschung an der Rutgers University im US-Bundesstaat New Jersey. Sie erforscht den Klimawandel in der Arktis und seinen Einfluss auf das globale Wetter.

larmeer innerhalb der kommenden 100 Jahre im Sommer eisfrei sein würde. Das hatte es seit Jahrtausenden nicht gegeben. Heute mache ich mir noch mehr Sorgen, denn inzwischen sieht es so aus, als sollte es in der Arktis vermutlich bereits ab 2040, sprich ganze 60 Jahre früher als von uns damals vorhergesagt, sommers kein Meereis mehr geben.

Die Arktis verändert sich im Prinzip so, wie Wissenschaftler es prognostiziert haben – allerdings wesentlich schneller, als selbst die pessimistischsten Szenarien vermuten ließen. Die jüngsten Messungen sprengen alle bisherigen Daten. In nur drei Jahren wurden mehr als ein Dutzend Extremwerte überschritten, die Jahrzehnte Bestand hatten, darunter beim Schwinden des Meereises im Sommer und beim Rückgang im Winter sowie bei der Zunahme der Boden- und Lufttemperaturen (siehe »Rekordverdächtige Arktis«).

Diese Trends kündigen Probleme für Menschen rund um den Globus an. Vor etwa 125 000 Jahren war die Nordpolarregion nur unwesentlich wärmer als heute; der Meeresspiegel lag allerdings vier bis sechs Meter höher. Wenn das Wasser entsprechend steigen sollte, müssten wir uns

AUF EINEN BLICK

Klimafaktor Arktis

- 1 Das Klima der Arktis verändert sich rapide und hat in den letzten Jahren über ein Dutzend neue Extremwerte hervorgebracht.
- 2 Viele Prozesse verstärken sich gegenseitig: Das Meereis schwindet, die Lufttemperatur steigt, die Permafrostböden tauen, und die Gletscher schmelzen.
- 3 Die Erwärmung der Arktis beeinflusst in der Atmosphäre den Jetstream sowie den Polarwirbel und sorgt so rund um den Globus für längere Hitzewellen, aber auch Kälteeinbrüche und Starkregenfälle.

von zahlreichen Metropolen verabschieden, wie New Orleans, New York, Venedig, London oder Schanghai. Aktuelle Forschungsergebnisse deuten auch darauf hin, dass sich infolge der raschen Erwärmung der Arktis die weltumspannenden Starkwindbänder der Atmosphäre verlagern. Dann könnten Wetterlagen länger als üblich über Nordamerika, Mitteleuropa

und Asien verweilen und Millionen Menschen Hitzewellen, Dürren oder heftige Stürme bescheren. Im südlichen Arktischen Ozean nimmt bereits die Menge an Plankton zu, was die Nahrungskette durcheinanderbringen und damit den kommerziellen Fischfang beeinträchtigen dürfte. Und durch den massiven Gletscherrückgang fließen südlich von Grönland gewaltige Mengen Süßwasser ins Meer, die möglicherweise den Golfstrom abbremsen und so das Wetter auf den Kontinenten beiderseits des Atlantiks signifikant verändern. Was treibt den Wandel in diesem halsbrecherischen Tempo an?

Der warnende Kanarienvogel in der Kohlemine

Wissenschaftler beobachten die Arktis mit einem so großen Aufwand, weil sie besonders empfindlich auf den Klimawandel reagiert. Für das Klimasystem der Erde stellt sie gewissermaßen den warnenden Kanarienvogel in der Kohlemine dar. Die lange Liste zuletzt gebrochener Rekorde lässt keinen Zweifel daran, dass die Arktis dabei ist, die beunruhigenden Klimamodellierungen der vergangenen Jahrzehnte zu bestätigen. Schlimmer noch: Unsere Prognosen

könnten die Veränderungen deutlich unterschätzt haben.

Innerhalb von nur 40 Jahren hat sich die im Sommer von Meereis bedeckte Fläche der Arktis halbiert. Und das durchschnittliche jährliche Eisvolumen nahm seit den frühen 1980er Jahren um etwa ein Viertel ab. Bis vor Kurzem glaubten Forscher noch, es würde mindestens bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts dauern, um solche Extreme zu erreichen.

Das sommerliche Meereis schwindet derart schnell, weil es Rückkopplungsmechanismen gibt, die kleine Veränderungen verstärken. Schmilzt zum Beispiel durch zusätzliche Wärme weißes, reflektierendes Eis, wird eine größere Oberfläche des dunkleren Ozeans frei, die wiederum Sonnenstrahlung weniger gut zurückwirft. Die vom Meer absorbierte Wärme heizt die Region weiter auf – was den Eisverlust und in folgedessen die Erwärmung verstärkt.

Im dunklen Winter greifen andere Mechanismen: So verhindert etwa das Meer eis als Isolierschicht, dass Wärme und Feuchtigkeit aus dem darunterliegenden Wasser in die Atmosphäre entweichen. Je weiter das Meereis zurückgeht, desto mehr kann die Luft sich aufheizen, was wieder-

um die Eisbildung erschwert. Computermodelle simulieren meist einen zu langsamen Rückgang des Meereises und führen damit zu konservativen Klimaprognosen.

Der Meereisschwund ist nicht die einzige Veränderung der Arktis, die Forschern wie mir Kopfzerbrechen bereitet. An Land tauen die normalerweise ganzjährig gefrorenen Permafrostböden auf, so dass Gebäude einstürzen, Bäume umfallen und Straßen sich wölben. Die aufgeweichten Böden beeinträchtigen nicht nur das Leben der lokalen Bevölkerung, sie geben zudem große Mengen an Treibhausgasen in die Atmosphäre ab. Denn das organische Material, das für tausende Jahre im Permafrost gefangen war, ist nun plötzlich für Bakterien verfügbar, die es abbauen und dabei Kohlendioxid (in sauerstoffhaltigen Bodenschichten) oder Methan (in sauerstofffreien Zonen) produzieren. Im arktischen Permafrost lagert etwa doppelt so viel Kohlenstoff, wie die Atmosphäre zurzeit enthält, so dass ein großflächiges Auftauen der Böden im hohen Norden die globale Erwärmung verschlimmern dürfte. Heutige Computermodelle erfassen die Auswirkungen des aufweichenden Permafrosts nicht adäquat – ein weiterer Grund,

Rekordverdächtige Arktis

Die Arktis verändert sich dramatisch, und die Auswirkungen werden Millionen von Menschen weltweit betreffen. Allein in den vergangenen drei Jahren wurden im hohen Norden zahlreiche neue Extremwerte gemessen, welche die bisherigen teilweise um Längen übertreffen. Sechs besonders eindruckliche Beispiele zeigen wir hier. Für sich genommen verändert jeder der Effekte das tägliche Leben der Menschen in der jeweiligen Region. Zusammen gestalten sie das Wetter auf der Nordhalbkugel und verursachen die so genannte Arktische Verstärkung, die das Risiko extremer Bedingungen ganzjährig erhöht.

AUSDEHNUNG DES WINTERMEEREISES

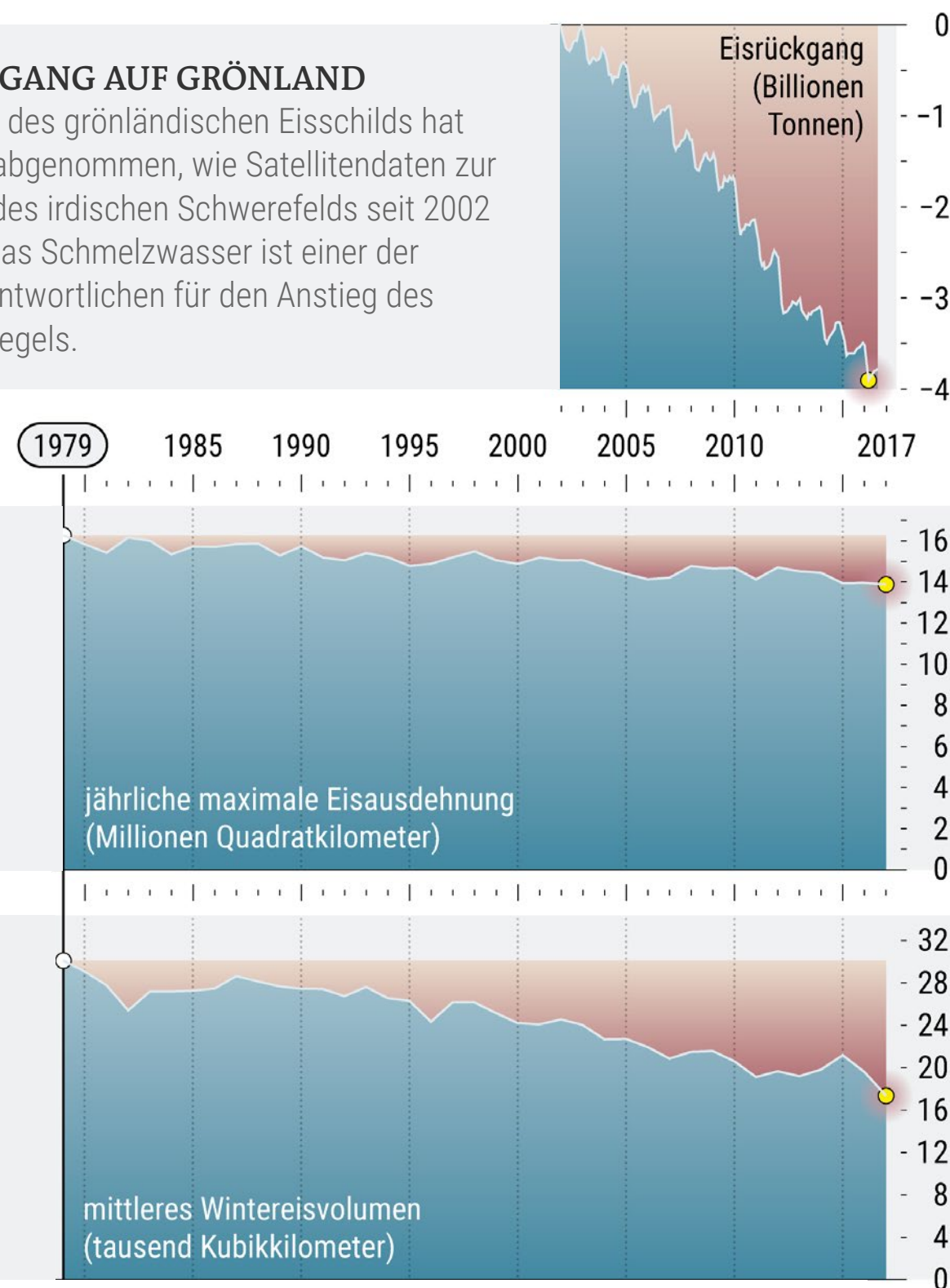
Während des Winters wächst die Eisdecke über dem Arktischen Ozean. Aber die maximale Ausdehnung hat stetig abgenommen, vor allem in der Barentssee und im Beringmeer. Weniger Eis bedeutet, dass mehr Wärme und Feuchtigkeit aus dem Ozean in die Atmosphäre gelangen.

VOLUMEN DES WINTERMEEREISES

Verglichen zum Bezugsjahr 1979 sank die Eismenge, die 2017 im Arktischen Ozean trieb, um 42,5 Prozent. Winde können das brüchigere Eis leichter vor sich her-treiben und so Schiffe und küstennahe Siedlungen einschließen. Dünneres Eis schmilzt zudem schneller in der warmen Jahreszeit – das sommerliche Meereis büßte im gleichen Zeitraum 80 Prozent an Masse ein.

EISRÜCKGANG AUF GRÖNLAND

Die Masse des grönländischen Eisschildes hat drastisch abgenommen, wie Satellitendaten zur Messung des irdischen Schwerfelds seit 2002 belegen. Das Schmelzwasser ist einer der Hauptverantwortlichen für den Anstieg des Meeresspiegels.



LUFTTEMPERATUR IM WINTER

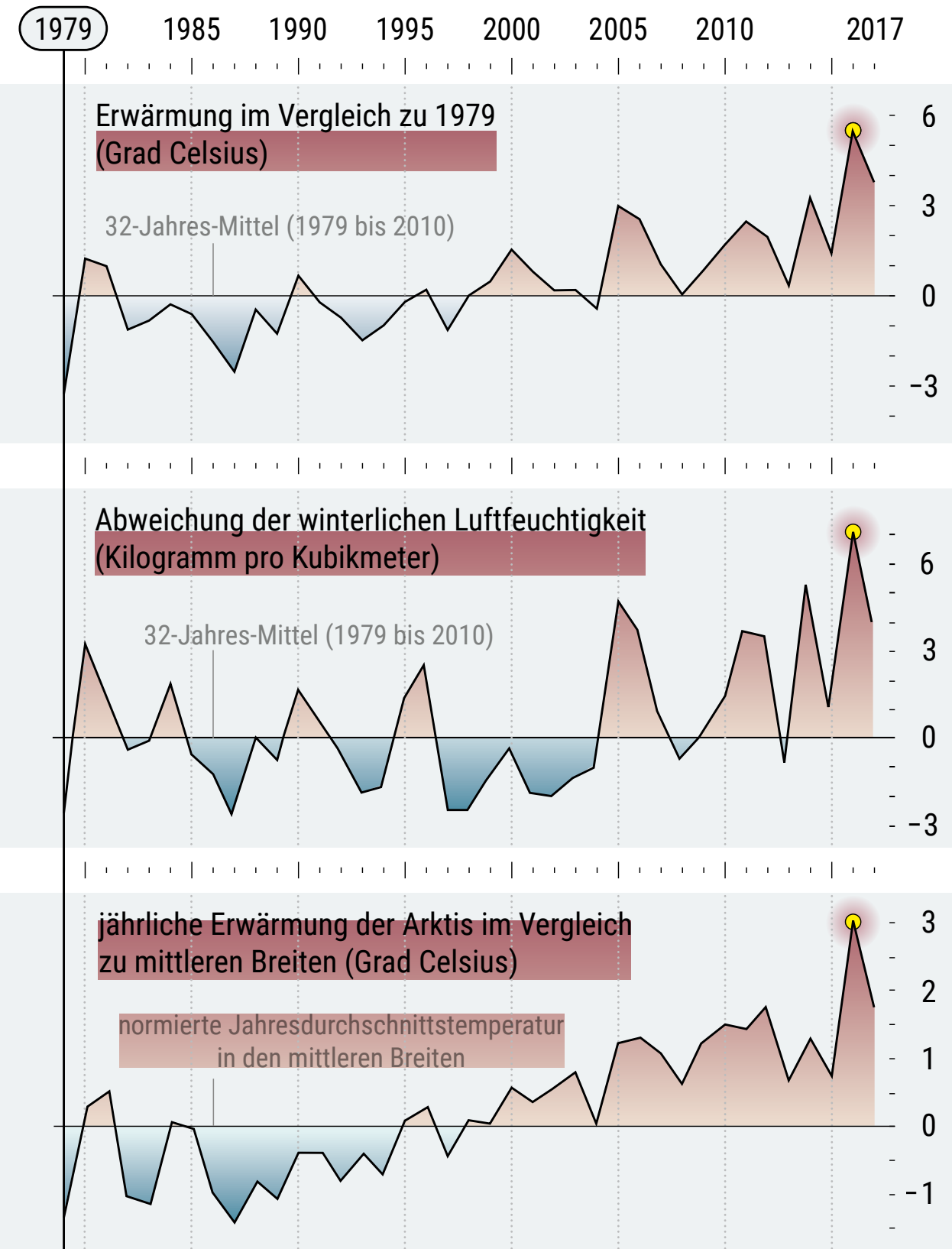
Die Lufttemperatur in der Arktis liegt an manchen Tagen 20 Grad über den Normalwerten und ist inzwischen während des ganzen Winters erhöht. Im Winter 2016 übertraf die Durchschnittstemperatur jene des Jahres 1979 um fast neun Grad. Dieser Trend kann den Jetstream schwächen, so dass es in Amerika, Europa und Asien zu extremen Kälteeinbrüchen und starken Schneefällen kommt.

LUFTFEUCHTIGKEIT IM WINTER

Wegen der schrumpfenden Eisdecke gelangt mehr Wasserdampf aus dem Ozean in die Luft. Selbst ein kleiner Anstieg hat große unerwünschte Folgen: Als Treibhausgas hält Wasserdampf Wärme zurück und gibt bei der Wolkenbildung latente Wärme ab. Wolken können die Erwärmung ebenfalls verstärken.

ARKTISCHE VERSTÄRKUNG

Die Nordpolarregion erwärmt sich schneller als der Rest der Welt, was als Arktische Verstärkung bezeichnet wird. Die Durchschnittstemperaturen in hohen und mittleren Breiten nähern sich somit immer mehr an. Das verringerte Temperaturgefälle verlangsamt den Jetstream und erhöht dadurch auf der Nordhalbkugel das Risiko für anhaltende Extremwetterlagen – darunter Hitze- und Kältewellen, Überschwemmungen und langlebigere Hurrikane.



warum Klimaprognosen die zukünftige Erderwärmung vermutlich unterschätzen.

Auf den Landflächen der Arktis liegen ebenfalls große Mengen gefrorenen Wassers – als Gletscher sowie im mächtigen Eisschild Grönlands, der stellenweise mehr als drei Kilometer dick ist. Wenn dieses terrestrische Eis taut, wirkt sich das global verheerend aus, weil es im Gegensatz zu schmelzendem Meereis den Meeresspiegel ansteigen lässt. Mittels Satelliten, die das Schwerefeld der Erde messen, lässt sich die Masse der grönländischen Eisdecke recht genau bestimmen. Im Sommer 2016 fiel diese auf den niedrigsten Stand seit Beginn der satellitengestützten Aufzeichnungen 2002 und unterschritt zudem sämtliche Werte, die seit Ende der 1950er Jahre mit Hilfe anderer Methoden ermittelt wurden. Eine Studie von 2016 legt nahe, dass das Abtauen des grönländischen Eisschildes durch die vom Meereisrückgang verursachte Erwärmung beschleunigt wird.

Weniger Meereis und die schnelle Erwärmung der Arktis haben noch andere weit reichende Folgen: Zusammen könnten sie Höhenwinde so beeinflussen, dass diese zusätzliche Wärme und Feuchtigkeit aus südlicheren Breitengraden Richtung Nord-

pol transportieren. 2012 verursachte eine ungewöhnlich starke und beständige Hochdruckwetterlage, ein so genanntes blockierendes Hoch, das bis dahin stärkste Abschmelzen Grönlands. Mit der warmfeuchten Luft gelangten Rußpartikel von Waldbränden in die nördliche Hemisphäre. Die Partikel verringern das Rückstrahlvermögen von Eis und Schnee, die somit mehr Sonnenenergie absorbieren und das Abtauen beschleunigen – ein weiterer Teufelskreis.

Blockierende Hochs nahe Grönland scheinen in den letzten Jahrzehnten häufiger aufzutreten, vor allem im Sommer. Der Eisverlust 2016 war nach 2010 und dem Rekordjahr 2012 der dritthöchste. Analysen meiner Kollegen und mir legen nahe, dass die Zunahme der blockierenden Hochs mit der globalen Erwärmung zusammenhängt. Computermodelle tun sich jedoch schwer damit, diese Wetterlagen realistisch zu simulieren, so dass sich kaum vorhersagen lässt, wie sie sich zukünftig auswirken werden.

Hitzewellen im arktischen Winter, die alle vorherigen übertreffen

An anderen Stellen der Arktis beobachten wir ebenfalls außergewöhnliche Verände-

rungen. Während der Winter 2016 und 2017 traten in der Nähe des Nordpols Hitzewellen auf, die alle vorherigen übertrafen. Das schwindende, immer dünnere Meereis ist Teil der Ursache, da Wärme nun ungehindert aus dem Ozean in die Atmosphäre gelangt. Des Weiteren erreichten rekordverdächtig große Mengen warmer und feuchter Luftmassen den hohen Norden. Die Luftfeuchtigkeit hat eine oft unterschätzte Auswirkung auf das Klima: Als Treibhausgas sorgt bereits ein geringfügig erhöhter Wasserdampfgehalt dafür, dass die trockene Atmosphäre des arktischen Winters deutlich mehr Wärme speichern kann. Zudem setzt die Kondensation von Wassermolekülen bei der Wolkenbildung latente Wärme frei, was die Luft weiter aufheizt. Und mehr Wolken halten mehr warme Luft gefangen – ein weiterer Faktor, der zum Tauwetter in der Arktis beiträgt.

Auch wenn noch manches unklar ist, wird deutlich, dass die Nordpolarregion den dramatischsten Wandel seit Menschengedenken durchläuft. Atmosphärenforscher versuchen deshalb zu analysieren, welchen Einfluss die Veränderungen in der Arktis auf Mensch und Umwelt weltweit ausüben, damit die Gesellschaft

entsprechend reagieren und sich vorbereiten kann.

Ein Beispiel für globale Effekte ist die Überschwemmung von Küstenregionen. Beunruhigend klingen die Vorhersagen eines Berichts der US-amerikanischen Union of Concerned Scientists (Vereinigung besorgter Wissenschaftler): Demnach werden 170 US-Gemeinden innerhalb der nächsten 20 Jahre dauerhaft überschwemmt sein. Die meisten küstennahen Metropolen werden bis Ende des 21. Jahrhunderts regelmäßig schwere Hochwasser erleben, wenn die Länder der Erde ihre CO₂-Emissionen nicht reduzieren. Dieser Bericht erschien im Juli 2017 – nur wenige Wochen bevor die Hurrikane Harvey, Irma und Maria den USA die zerstörerischste und teuerste Hurrikansaison aller Zeiten bescherten.

Es mehren sich ebenfalls Belege dafür, dass die starke Erwärmung der unteren arktischen Atmosphäre sowohl die als Jetstream bezeichneten Starkwindbänder beeinflusst als auch Luftmassen in der höher gelegenen Stratosphäre, wo der Polarwirbel, ein großräumiges Höhentief, beheimatet ist. Die Wellenberge und -täler des von West nach Ost mäandernden Jetstreams erzeugen die von Wetterkarten vertrauten

Hoch- beziehungsweise Tiefdruckzentren und steuern unser Wetter auf der Nordhalbkugel. Wenn jedoch besonders große Wellen häufiger auftreten, wird sich das auf Millionen Menschen extrem auswirken. Denn große Ausschläge des Jetstreams gen Nordpol oder gen Äquator bewegen sich langsamer von West nach Ost, so dass Wetterlagen beständiger bleiben. Das heißt: längere Hitzeperioden, Starkregenfälle, festgefahrene tropische Stürme wie der Hurrikan Harvey, der Houston im August 2017 unter Wasser setzte, sowie heftigere Waldbrände.

Große Wellen im Jetstream kombiniert mit einer starken Erwärmung der Arktis können den Polarwirbel unterbrechen und länger andauernde tödliche Kältewellen und Schneestürme auslösen. Die Bewohner der nördlichen USA mussten das im Januar 2018 erdulden. Ein Kollaps des Polarwirbels kann zudem dazu führen, dass sich ausladende Ausschläge des Jetstreams festsetzen, die Alaska und nördlicheren Regionen außergewöhnliche Hitzewellen bescheren – welche die Erwärmung der Arktis ebenfalls beschleunigen. Über die tatsächliche Verbindung zwischen diesen atmosphärischen Wellen und dem Temperatur-

Die alte Arktis war erbarmungslos, aber stabil. Die neue ist unberechenbar und macht einen unumkehrbaren Wandel durch – mit Auswirkungen auf die ganze Welt

anstieg in der Arktis sind sich Wissenschaftler allerdings noch uneins.

In der sich rasch erwärmenden Arktis werden sich wahrscheinlich sowohl marine als auch terrestrische Lebensräume verändern. Schon während des aktuellen Meereisrückgangs treten Algenblüten zu anderen Zeiten und in anderen Regionen als bisher auf, so dass Fische von weiter südlich in arktische Gewässer ziehen und die dort heimischen verschwinden. Die früher einsetzende Schneeschmelze am Ende des Winters lässt die Tundra rascher ergrünen und Insekten eher schlüpfen; Zugvögel, die eine bestimmte Tageslänge als Aufbruchsignal nutzen, erreichen die arktischen Futterplätze so unter Umständen zu spät. Die Ureinwohner der Arktis bekommen die Auswirkungen ebenfalls zu spüren: Schmelzendes Eis verhindert, dass sie ihre traditionellen Jagdgründe erreichen, und vertreibt sie sogar aus ihren Siedlungen, weil Stürme die bislang durch Eis geschützten Küsten bedrohen. Gleichzeitig begehren Länder und große Unternehmen die nun zugänglichen natürlichen Ressourcen und streiten sich um die Frage, wem der reiche Meeresboden gehört.

Die Offenbarung, die wir während der Tagung in Big Sky hatten, erlebe ich jedes Mal aufs Neue, wenn eine länger anhaltende Extremwetterlage verheerende Schäden anrichtet oder die Arktis einen weiteren Negativrekord aufstellt. Langsam entwickeln auch meine Landsleute ein stärkeres Bewusstsein hierfür. Umfragen zufolge glauben die meisten US-Amerikaner, dass der Eisrückgang in der Arktis und der Jetstream – der Begriff gehört inzwischen fast schon zum Allgemeingut – gemeinsam das Wetter durcheinanderwirbeln. Die alte Arktis mag zwar erbarmungslos gewesen sein, aber sie war stabil. Die neue ist weniger berechenbar und macht womöglich einen nicht umkehrbaren Wandel durch – mit Auswirkungen für das Leben auf der ganzen Welt.

Ausmaß und Geschwindigkeit des Klimawandels lassen sich reduzieren

Sind die Prozesse aufzuhalten? Das globale Klima reagiert mit einer gewissen Verzögerung auf die steigenden Treibhausgaskonzentrationen. Außerdem hat Kohlendioxid eine sehr lange Verweildauer in der Atmosphäre, so dass es in Zukunft unweigerlich zu klimatischen Veränderungen kommen

wird. Das Ausmaß und die Geschwindigkeit des Klimawandels können jedoch reduziert werden, wenn sich die Gesellschaft beeilt, die Emissionen zurückzufahren, und wenn es gelingt, Verfahren zu entwickeln, um große CO₂-Mengen aus der Atmosphäre zu entfernen. An beiden Fronten gibt es Fortschritte. Sie kommen aber vermutlich zu spät und sind zu wenig ambitioniert, um die Arktis und die Erde so zu erhalten, wie wir sie bislang kennen. ↪

(Spektrum der Wissenschaft, Oktober 2018)

Francis, J. A. et al.: Amplified Arctic Warming and Mid-Latitude Weather: New Perspectives on Emerging Connections. In: WIREs Climate Change 8, e474, 2017

Liu, J. et al.: Has Arctic Sea-Ice Loss Contributed to Increased Surface Melting of the Greenland Ice Sheet? In: Journal of Climate 29, S. 3373–3386, 2016

National Research Council: Arctic Matters: The Global Connection to Changes in the Arctic. The National Academies Press, Washington 2015

Overpeck, J. T. et al.: Arctic System on Trajectory to New, Seasonally Ice-Free State. In: EOS 86, S. 309–313, 2005



DEM MEERESKUNDE OZEAN GEHT DIE LUFT AUS

von Clarissa Karthäuser, Andreas Oschlies, Christiane Schelten

In den tropischen und subtropischen Meeren existieren in mittleren Tiefen riesige sauerstoffarme Zonen. Im Zuge des Klimawandels dehnen sie sich immer stärker aus. Auch in Küstenregionen entstehen durch Stickstoffbelastung aus der Landwirtschaft lebensfeindliche Zonen ohne Sauerstoff – mit verheerenden Folgen für das marine Ökosystem.

Etwa die Hälfte des Sauerstoffs der Atmosphäre stammt aus dem Meer: Mikroalgen, das sogenannte Phytoplankton, setzen ihn bei der Fotosynthese frei. Doch obwohl die Ozeane derart viel Sauerstoff produzieren, speichern sie selbst weniger als ein Prozent davon. Diese Diskrepanz ist zum einen durch die vergleichsweise geringe Löslichkeit des Gases im Meer zu erklären. So enthält ein Liter Luft zirka die 40-fache Menge Sauerstoff, die sich in dem gleichen Volumen an Salzwasser löst. Auch verteilt sich das Gas im Ozean wesentlich langsamer als in der Atmosphäre.

Zum anderen binden Algen in nährstoffreichen, lichtdurchfluteten Gebieten große Mengen CO₂ und produzieren so Biomasse in Hülle und Fülle. Während der bei der Fotosynthese gebildete Sauerstoff nach

oben in die Atmosphäre entweicht, sinkt so genannter mariner Schnee – ein Mix aus abgestorbenem Phytoplankton sowie den Ausscheidungen von Zooplankton und Fischen – in die Tiefsee. Dort werden die Bioflocken von aeroben Bakterien zersetzt, die Sauerstoff veratmen. Wird Letzterer nicht genügend nachgeliefert, etwa durch Strömungen, die sauerstoffhaltiges (oxisches) Oberflächenwasser in tiefere Schichten transportieren, kann hier eine sauerstoffarme (hypoxische) oder sogar völlig sauerstofffreie (anoxische) Zone entstehen.

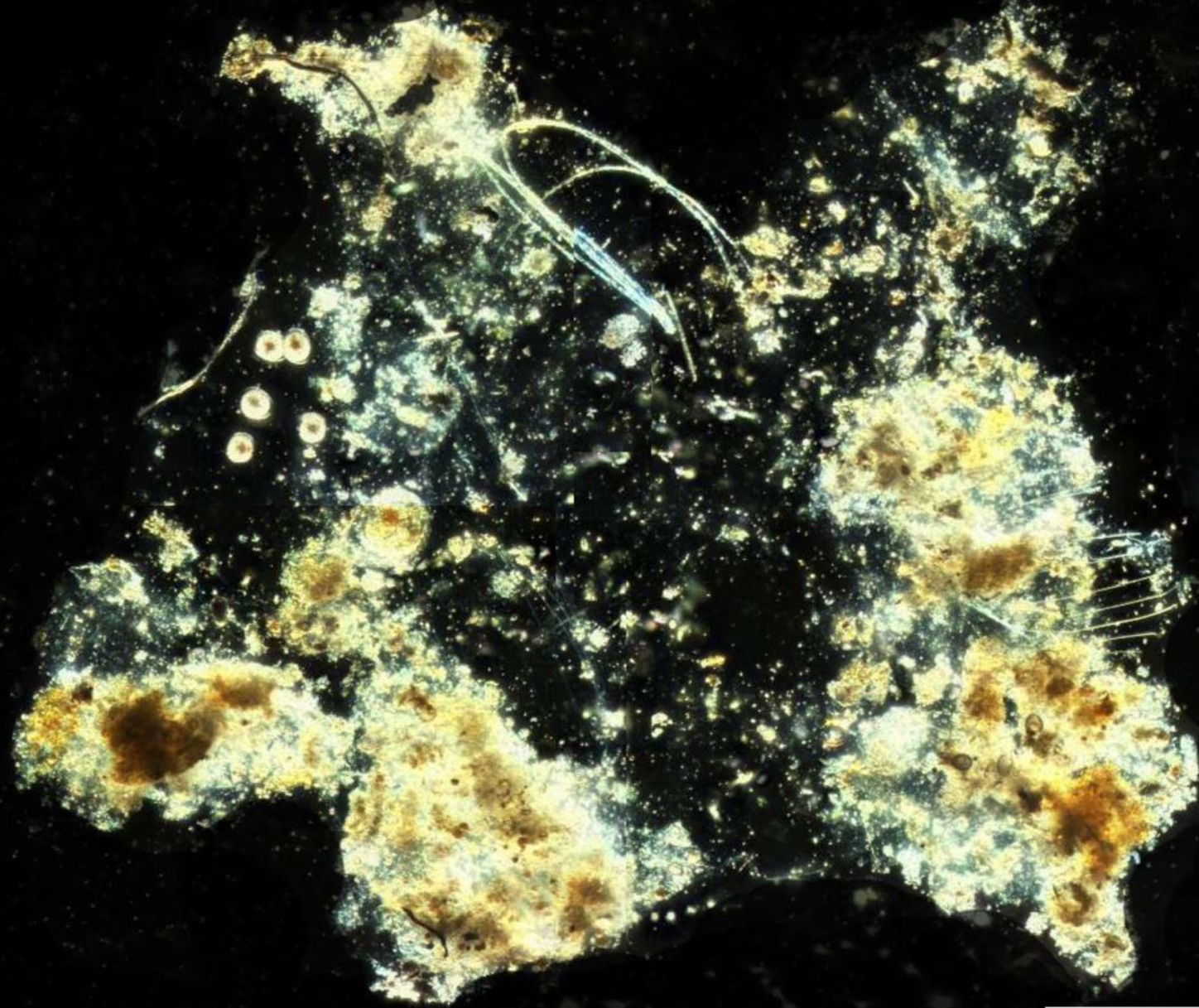
Aktuelle Studien deuten darauf hin, dass der Sauerstoffgehalt im Meer in den letzten Jahrzehnten abgenommen hat, und Wissenschaftlern zufolge dürfte sich der Trend in der Zukunft fortsetzen. Schuld daran sind vermutlich der Klimawandel und hohe Nährstoffeinträge. Die globale Erwärmung verlangsamt die Durchmischung der Ozeane. Außerdem sinkt die Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser mit zunehmender Temperatur. Zusätzlich gelangen durch Emissionen von Industrie und Verkehr, übermäßigen Düngereinsatz und ungeklärte Abwässer immer mehr Nährstoffe ins Meer. Die Folge: massenhaftes Algenwachstum und ein

AUF EINEN BLICK

Sauerstoffmangel im Meer

- 1 In den östlichen Ozeanen der Tropen und Subtropen sorgt der Auftrieb von nährstoffreichem Tiefenwasser für eine hohe biologische Produktivität. Gleichzeitig findet man hier große sauerstoffarme Zonen.
- 2 Diese für viele Organismen lebensfeindlichen Wasserkörper dehnen sich immer weiter aus. Ursachen dafür sind die globale Erwärmung und eine Überdüngung der Meere über Flüsse und die Atmosphäre.
- 3 Auch in Küstenregionen entstehen so »Todeszonen«, die bisweilen zu Massenfischsterben führen. Forscher fordern mehr Klimaschutz und weniger Stickstoffeinträge, um den Sauerstoffverlust zu stoppen.

Clarissa Karthäuser promoviert am Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie in Bremen zum Stickstoffkreislauf im Meer. **Andreas Oschlies** ist Professor für Marine Biogeochemische Modellierung am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. **Christiane Schelten** koordiniert dort den Sonderforschungsbereich »Klima – Biogeochemische Wechselwirkungen im tropischen Ozean«, in dem Wissenschaftler Ursachen und Folgen der Sauerstoffabnahme im Ozean untersuchen.



0.2 mm

MARINER SCHNEE

Nährstoffreichtum sorgt für üppiges Planktonwachstum. Tote Biomasse sinkt als mariner Schnee gen Meeresboden und wird unter Verbrauch von Sauerstoff recycelt.

hoher Sauerstoffverbrauch beim Abbau toter Biomasse.

Meeresforscher untersuchen, was das für die Ozeane bedeutet. Welche Veränderungen sind in bereits heute sauerstoffarmen Gebieten zu erwarten? Gibt es Regionen, die in absehbarer Zeit »umkippen« und anoxisch werden könnten? Und was lehrt uns die Erdgeschichte? Um diese Fragen zu beantworten, lohnt es sich, genauer hinzuschauen, wie der Sauerstoff ins Meer kommt und wo er verbraucht wird.

Sauerstoff ist im Ozean ungleich verteilt. Hohe Konzentrationen findet man nahe der Oberfläche, wo Algen durch Photosynthese oft sogar mehr Sauerstoff freisetzen, als das Wasser speichern kann. Auch nachts, wenn das Phytoplankton keine Photosynthese betreibt, ist das Meer an der Oberfläche durch ständigen Austausch mit der Atmosphäre reich an Sauerstoff. Durch Meeresströmungen und Mischungsprozesse gelangt das Oberflächenwasser in tiefere Bereiche der Ozeane – dorthin, wo Mikroorganismen herabsinkendes organisches Material abbauen. Wie sauerstoffhaltig das Wasser ist, bevor es abtaucht, hängt vor allem von seiner Temperatur ab, da warmes Wasser weniger Sauerstoff auf-

nehmen kann als kaltes. Hohe Konzentrationen des Gases findet man daher unter anderem in der Labradorsee zwischen Kanada und Grönland, wo ein Großteil des atlantischen Tiefenwassers seinen Ursprung hat. Grund dafür ist die Abkühlung der Meeresoberfläche, wodurch die Dichte des Wassers zunimmt, es also schwerer wird. Strömungen transportieren dieses Wasser um die ganze Welt, und erst nach rund 1000 Jahren kommt es in den tropischen und subtropischen Auftriebsgebieten wieder mit der Atmosphäre in Kontakt.

In der Zwischenzeit hat sich seine chemische Zusammensetzung stark verändert. Denn während die Wassermassen in der Tiefsee rund um den Globus zirkulieren, schneit es unaufhörlich tote Biomasse aus flacheren Zonen. Mikroorganismen, die sich davon ernähren, entziehen dem Wasser im Lauf der Jahre immer mehr Sauerstoff. Gleichzeitig setzen sie das CO_2 und die Nährstoffe wieder frei, welche die Algen an der Oberfläche einst gebunden haben. Das Tiefenwasser der Labradorsee passiert zunächst den Atlantik und hat hier einen höheren Sauerstoffgehalt als am Ende seiner Reise im nördlichen Pazifik oder Indischen Ozean.

Tiefenwasser gelangt auch an den Westküsten des afrikanischen sowie des nord- und südamerikanischen Kontinents wieder nach oben. In diesen Auftriebsgebieten treiben küstenparallele Winde das Oberflächenwasser in Richtung Äquator. Auf Grund der Corioliskraft wird es aufs offene Meer abgelenkt, und Wasser aus tieferen Schichten strömt nach. Letzteres ist reich an Nährstoffen wie Nitrat und Phosphat sowie an Spurenelementen wie Eisen, die das Wachstum von Phytoplankton ankurbeln.

Die sich vermehrenden Algen werden teils gefressen – von Zooplankton und Fischen wie Sardinen oder Anchovis –, teils sinken sie in tiefere Schichten und werden schließlich, weil dort das Licht für die Fotosynthese fehlt. Auch die Überreste der Räuber und deren Ausscheidungen fallen in die Tiefsee. Das herabsinkende organische Material verkeilt sich und verklebt zu größeren Aggregaten, marinen Schneeflocken, die mitunter mehrere Millimeter messen. Auf den Flocken siedelnde Mikroorganismen und solche, die frei schwimmen, sorgen durch ihren Stoffwechsel für einen hohen Sauerstoffverbrauch unterhalb der Zone, in der die Algen Fotosynthese betreiben. Zugleich findet in diesen Be-

reichen keine ausreichende Durchmischung statt, sprich, es mangelt an Sauerstoffnachschub. So entstehen hier in Tiefen zwischen 50 und 1000 Metern so genannte Sauerstoffminimumzonen.

Einige Organismen profitieren vom Sauerstoffmangel

Besonders niedrige Konzentrationen des lebenswichtigen Moleküls findet man in den Auftriebsgebieten vor Peru und Chile, vor Namibia sowie im nördlichen Indischen Ozean. Sie entstehen aber auch in anderen Regionen, in denen nur schwache Strömungen herrschen, etwa in Küstengebieten mit hohen Nährstoffeinträgen vom Land und in Binnenmeeren. Ein Beispiel ist die Ostsee, in die Flüsse große Mengen Stickstoff befördern, der überwiegend aus der Landwirtschaft stammt. Das regt das Algenwachstum an. Außerdem herrscht in der Ostsee eine stabile Schichtung von wärmerem, salzarmem Oberflächenwasser und kühlerem, salzhaltigerem Wasser darunter, die sich kaum mischen. Das verhindert, dass genügend Sauerstoff in die Tiefe gelangt.

In manchen Meeresregionen – vor Peru etwa – lässt sich im Zentrum solcher Zonen

kein Sauerstoff mehr nachweisen. Diese Bereiche bilden ein eigenes Ökosystem, weil hier anaerobe mikrobielle Prozesse ablaufen, die keinen Sauerstoff benötigen oder für die Sauerstoff sogar pures Gift ist. Die meisten Tiere können in diesen Wasserschichten nicht lange überleben; daher sind diese auch als Todeszonen bekannt.

Dennoch sind sie alles andere als unbelebt. Einige Organismen haben sich an den extrem niedrigen Sauerstoffgehalt angepasst und suchen dort Zuflucht vor Fressfeinden. So wie *Euphausia mucronata*, die häufigste Krillart im Humboldt-Auftriebsgebiet vor Südamerika. Die kleinen Krebse verbringen den Tag in der Tiefe und wandern nur nachts im Schutz der Dunkelheit nach oben, um Algen zu fressen und Luft zu holen. Auch verschiedene Fische und Ruderfußkrebse halten es in der »Todeszone« aus. Dafür müssen sie allerdings ihren Stoffwechsel herunterfahren – was sie träge und damit zu einer leichten Beute macht. Tief tauchende Meeressäuger wie See-Elefanten gehen hier deshalb bevorzugt auf die Jagd. Ebenso der Vampirtintenfisch, der in 600 bis 900 Meter Tiefe vorkommt. Selbst mit einer Sauerstoffsättigung von lediglich drei Prozent kommt

er zurecht – dank großflächiger Kiemen und dem blauen Blutfarbstoff Hämocyanin, der Sauerstoff bei geringen Konzentrationen wesentlich effizienter bindet als unser Hämoglobin. Langfristig benötigen all diese Tiere dennoch Sauerstoff, um zu überleben.

Für zahlreiche Mikroorganismen gilt das nicht: Sie werden ohne das Gas überhaupt erst aktiv oder stellen, wenn es zur Neige geht, einfach auf anaerobe Atmung um. Einige decken ihren Bedarf an Energie und Kohlenstoff, indem sie organische Verbindungen oxidieren, zum Beispiel Zucker oder Aminosäuren. Dabei reduzieren sie Nitrat (NO_3^-) zu Nitrit (NO_2^-), Lachgas (N_2O) und schließlich zu molekularem Stickstoff (N_2). Andere verwenden Eisen-, Mangan- oder Sulfationen (SO_4^{2-}) an Stelle von Sauerstoff. Und manche einzelligen Bewohner der Sauerstoffminimumzone sind wie die Algen bei der Photosynthese in der Lage, im Wasser gelöstes CO_2 zu fixieren. Statt Sonnenlicht nutzen sie dafür chemisch gebundene Energie, die in reduzierten anorganischen Verbindungen wie Ammonium (NH_4^+) und Schwefelwasserstoff (H_2S) steckt. Bei deren Oxidation wird Energie frei, die es den Organismen

Die »Todeszonen«
regulieren langfristig
die Produktivität großer
Teile der Meere

erlaubt, Zucker und andere fürs Wachstum benötigte Moleküle aus CO_2 zu synthetisieren.

Die mikrobiellen Prozesse in den sauerstoffarmen Regionen der Meere spielen eine zentrale Rolle im globalen Zyklus einiger biologisch relevanter Elemente. Für den Stickstoffkreislauf trifft das in besonderem Maße zu: Stickstoff ist ein wichtiger Nährstoff und macht 78 Prozent der Erdatmosphäre aus. In der Luft liegt er vor allem als N_2 -Molekül vor, in dem die beiden Atome mit einer starken Dreifachbindung verknüpft sind. In dieser Form ist er für die meisten Lebewesen wertlos. Nur wenige Einzeller können die Bindung knacken und Luftstickstoff in Ammoniak umwandeln, um damit zum Beispiel Aminosäuren zu synthetisieren. Der Mensch ahmt diesen natürlichen Prozess im Haber-Bosch-Verfahren nach und stellt so Ammoniumnitrat und Harnstoff her, als Dünger für die Landwirtschaft.

Tiere und Pflanzen nehmen den biologisch verfügbaren Stickstoff auf. Sterben sie, recyceln Mikroorganismen ihre Biomasse und setzen den Stickstoff wieder frei, vor allem in Form von Ammonium und Nitrat. Zwei Gruppen von Bakterien,

die Forscher in Sauerstoffminimumzonen in großer Zahl gefunden haben, verwandeln die Verbindungen wieder in Luftstickstoff. Dies sind zum einen so genannte Denitrifizierer, die organischen Kohlenstoff mit Hilfe von Nitrat oxidieren, und zum anderen erst Mitte der 1990er Jahre entdeckte Anammox-Bakterien, die Ammonium mit Nitrit veratmen, um Energie für die CO_2 -Fixierung zu gewinnen. Die hohe Verfügbarkeit von Nährstoffen und die Sauerstoffknappheit in den Auftriebsgebieten schaffen optimale Bedingungen für diese Prozesse: Wissenschaftler schätzen, dass 20 bis 40 Prozent des Verlusts an verwertbarem Stickstoff im Ozean zu Lasten der sauerstofffreien Zonen gehen, obwohl sie weniger als ein Prozent des gesamten Volumens ausmachen. Auf diese Weise regulieren die »Todeszonen« langfristig die Produktivität großer Teile der Meere. Denn das Wasser gelangt irgendwann wieder an die Oberfläche, und oft begrenzt die Menge an biologisch verfügbarem Stickstoff das Algenwachstum.

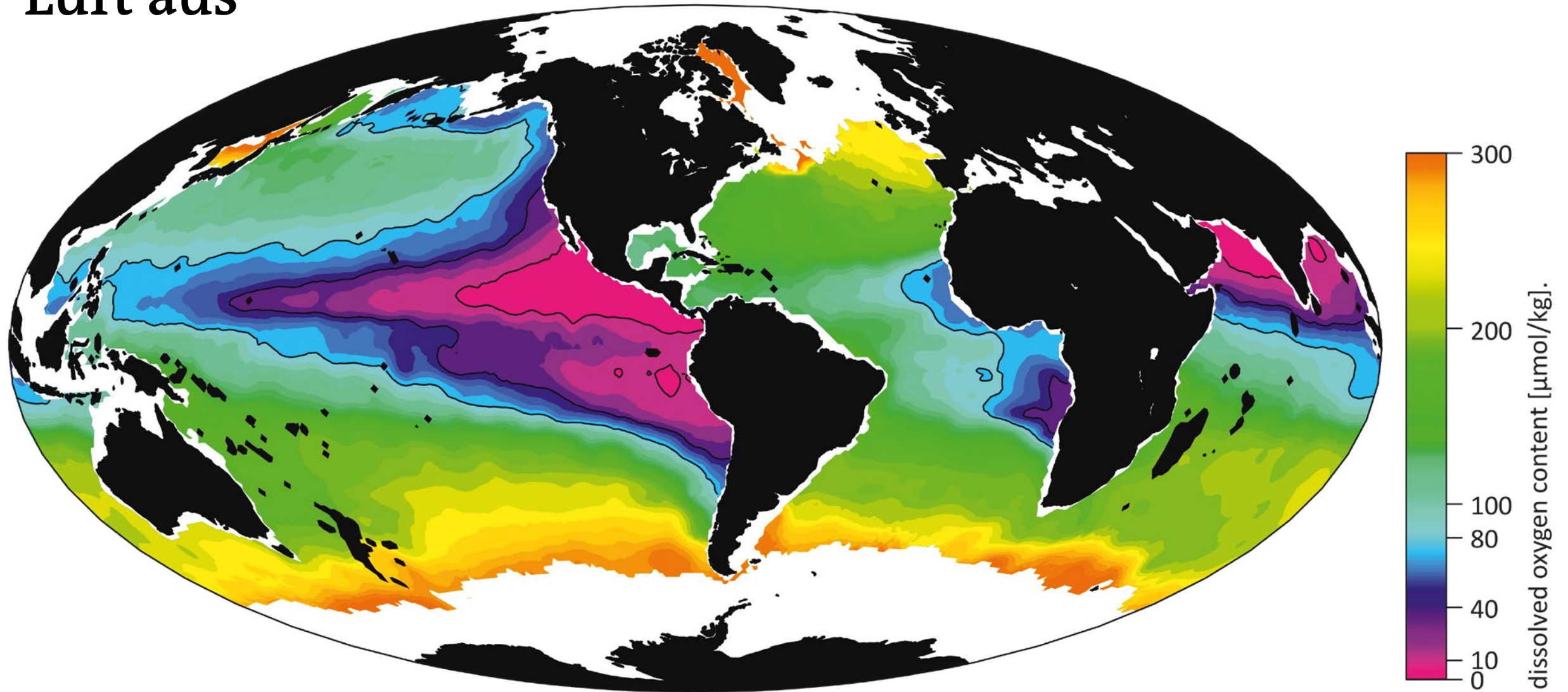
Auch im globalen Kohlenstoffkreislauf sind die Auftriebsgebiete wichtig, weil hier große Mengen CO_2 bei der Photosynthese fixiert und als mariner Schnee in die Tiefsee

verfrachtet werden. Im Schnitt erreicht jedoch kaum ein Prozent des Kohlenstoffs den Meeresboden. Den Rest setzen Mikroorganismen wieder als CO_2 frei, während er hunderte oder gar tausende Meter Wasser durchquert. In Abwesenheit von Sauerstoff geschieht das allerdings langsamer, so dass in Auftriebsgebieten mehr organisch gebundener Kohlenstoff den Boden erreicht und dem Kreislauf entzogen wird als in anderen Meeresregionen.

Der Mensch macht große Mengen Stickstoff biologisch verfügbar und überdüngt so die Meere

Die Emissionen von Treibhausgasen – insbesondere von CO_2 , aber auch von Methan und Lachgas – lassen die Temperatur der Atmosphäre steigen und damit die des Ozeans. Weil gleichzeitig die Löslichkeit von Sauerstoff im Meerwasser sinkt, gehen Ozeanografen davon aus, dass sich die sauerstoffarmen Zonen in den kommenden Jahrzehnten ausweiten werden. Tatsächlich hat sich deren Volumen seit Mitte des 20. Jahrhunderts weltweit bereits vervierfacht, wie Langzeitstudien zeigen. Die verringerte Löslichkeit erklärt aber weniger als die Hälfte der beobachteten Sauerstoff-

Dem Ozean geht die Luft aus



Distribution of oxygen at about 300 – 500 m depth ($\sigma_\theta=26.9 \text{ kg/m}^3$).

Sauerstoffgehalt in etwa 400 Meter Tiefe: Im tropischen Ostpazifik und -atlantik sowie im nördlichen Indischen Ozean erstrecken sich sehr große sauerstoffarme Gebiete (pink). In den vergangenen 50 Jahren hat

sich das weltweite Volumen dieser so genannten Sauerstoffminimumzonen vervierfacht. Viel Sauerstoff (orange) findet man in den hohen Breiten. Hier hat das ozeanische Tiefenwasser seinen Ursprung.

abnahme. Der Großteil ist auf eine schwächere Ozeanzirkulation zurückzuführen – eine weitere Folge der Ozeanerwärmung: Da sich das Oberflächenwasser aufheizt und an Dichte verliert, wird die Schichtung der Wassersäule stabiler. Es braucht also mehr Energie, um sauerstoffreiches Wasser in die Tiefe zu transportieren. Die Belüftung des Ozeans nimmt im Zuge des Klimawandels somit ab.

Zusätzlich greift der Mensch in den Nährstoffhaushalt der Meere ein, indem er riesige Mengen Stickstoff biologisch verfügbar macht (gut die Hälfte der Stickstofffixierung auf der Erde geschieht über das Haber-Bosch-Verfahren, den Rest übernehmen Bakterien). Erhebliche Mengen Stickstoff aus Kunstdünger und Gülle gelangen in Flüsse und landen schließlich im Meer. Vor allem in küstennahen Gebieten führt das zu übermäßigem Algenwachstum und hohem Sauerstoffverbrauch. Binnen kurzer Zeit kann Überdüngung ein artenreiches Habitat in einen für Fische, Krebse und Muscheln lebensfeindlichen Wasserkörper verwandeln.

Auf lange Sicht wirken Sauerstoffminimumzonen dem Überangebot an Nährstoffen teilweise entgegen. Denn dort laufen

ebenjene mikrobiellen Prozesse ab, die aus Nitrat oder Ammonium wieder wertlosen Luftstickstoff machen. Diese Pufferwirkung ist aber von weiteren Faktoren abhängig, wie der Durchmischung und der Temperatur des Meerwassers. Kurzfristig hilft der Nährstoffabbau beispielsweise ersticken den Kiemenatmern nicht. Auf Dauer ermöglicht er jedoch, dass Ökosysteme sich regenerieren beziehungsweise dass sich allmählich ein neues Gleichgewicht zwischen Stickstoffzufuhr und -verlust einpendelt.

Was in den Weltmeeren passiert, wenn der Sauerstoffgehalt sinkt, lässt sich auch in Deutschland beobachten, vor allem an der Ostseeküste: Die Fischbestände gehen hier zurück, und es kommt zu Massensterben, wenn sich das Wasser über den Sommer stark aufheizt. Das geschah etwa im Herbst 2017, als am Strand von Eckernförde tausende tote Dorsche, Plattfische und andere Meerestiere angespült wurden. Hauptursache dafür war ein andauernder starker Südwestwind, der sauerstoffreiches Oberflächenwasser von der Küste in Richtung offene Ostsee drückte. Dadurch strömte sauerstoffarmes Wasser aus der Tiefe nach oben, das die Fische offensichtlich überraschte.

Toxisches Molekül aus dem Meeresboden

Für den Dorsch ist der zunehmende Sauerstoffmangel noch aus einem weiteren Grund problematisch: Dorscheier haben eine Dichte, die jener des Tiefenwassers in der Ostsee entspricht und sie ein Stück über dem Meeresboden schweben lässt. Wird diese Zone nicht häufig genug durch aus der Nordsee herüberschwappendes Wasser belüftet, das sauerstoffreich ist und schwerer als das der Ostsee, ersticken die Embryos.

Eine weitere Gefahr für Fische und andere Lebewesen ist die Anreicherung von sauerstoffarmen Meeresregionen mit toxischem Schwefelwasserstoff. Der entsteht im Sediment, wo er in Anwesenheit von Sauerstoff durch Mikroorganismen auch gleich wieder zu ungiftigem Sulfat umgewandelt wird. Wenn der Sauerstoff allerdings fehlt, kann die giftige Verbindung in das Wasser entweichen und so ebenfalls Massensterben verursachen. Vor der Küste Namibias etwa kam es in der Vergangenheit wiederholt zu Freisetzungen von Schwefelwasserstoff aus dem Meeresgrund. Das größte jemals dokumentierte Ereignis dieser Art, bei dem unzählige Fische umkamen, beobachteten deutsche Forscher 2009 während einer Expedition



FORSCHUNGSSCHIFF METEOR

In den vergangenen Jahren haben Wissenschaftler an Bord des deutschen Forschungsschiffs »Meteor« die Sauerstoffminimumzone vor der Küste Südamerikas intensiv beprobt. Sie reicht mehrere tausend Kilometer in den Ostpazifik.

Der Sauerstoffverlust kann einen Teufelskreis in Gang setzen, der kaum zu durchbrechen ist

Ebenfalls bedeutsam ist die Ausbreitung der »Todeszonen« für die Aktivität von Mikroorganismen: Lange gingen Ozeanografen davon aus, dass der an die indische Ostküste grenzende Golf von Bengalen in Tiefen von zirka 100 bis 400 Metern anoxisch ist. Trotz des Mangels an Sauerstoff und einer hohen Nährstoffverfügbarkeit (durch Flusseinträge aus den bevölkerungsreichen Anrainerstaaten) konnte man jedoch wider Erwarten kaum anaerobe bakterielle Prozesse messen, die für derartige Wasserkörper typisch sind. Forscher des Max-Planck-Instituts für Marine Mikrobiologie in Bremen und der Süddänischen Universität haben deshalb 2016 mit hochempfindlichen Sensoren nachgemessen, die weniger als 0,01 Prozent

in den Küstengewässern Perus. Angesichts der zunehmenden Ausdehnung der Sauerstoffminimumzonen können solche Ereignisse in Zukunft öfter auftreten.

Auch Fischpopulationen weit draußen im offenen Meer sind von der abnehmenden Menge an Sauerstoff betroffen. Ein Beispiel ist der Blauflossen-Tunfisch, ein wahrer Extremsportler, der weite Strecken

zurücklegt und seinen torpedoförmigen Körper auf bis zu 80 Kilometer pro Stunde beschleunigen kann. Solche Höchstleistungen erfordern viel Sauerstoff. Deshalb sind Tunfische – deren Populationen durch Überfischung ohnehin bereits stark dezimiert sind – von der Ozeanerwärmung und der abnehmenden Löslichkeit von Sauerstoff im Meerwasser bedroht.

Sauerstoffsättigung detektieren können. Das Ergebnis: Der Golf von Bengalen ist nur fast anoxisch. Mikroorganismen, die Nitrat oder Ammonium veratmen, werden hier offenbar durch Spuren von Sauerstoff gehemmt. Sollten diese jedoch restlos verschwinden, etwa weil die Wassertemperatur ansteigt, könnten Denitrifizierer und Anammox-Bakterien deutlich aktiver werden und mehr Nährstoffe in Luftstickstoff umwandeln. Eine nur geringe Veränderung des Sauerstoffgehalts in der Region hätte also möglicherweise weit reichende Folgen.

Ein besonderes Phänomen bei der Ausweitung sauerstoffarmer Zonen sind so genannte positive Rückkopplungen – Prozesse, die sich selbst verstärken. Phosphat (PO_4^{3-}), neben Nitrat der wichtigste Nährstoff im Ozean, gelangt als Bestandteil des marinen Schnees in die Tiefsee und reichert sich unter oxischen Bedingungen im Sediment an. Es bindet dort an organische und anorganische Partikel. Bei sehr niedrigen Sauerstoffkonzentrationen gelangt Phosphat jedoch wieder in die bodennahe Wasserschicht. Gleiches gilt für das Spurenelement Eisen.

Daraus kann ein wahrer Teufelskreis entstehen: Fehlt Sauerstoff, wird zusätzliches

Phosphat verfügbar, das schließlich die obere, sonnendurchflutete Wasserschicht erreicht und dort Algen zum Wachstum anregt. Vor allem Zyanobakterien, die Luftstickstoff fixieren können, profitieren von Phosphat. So entsteht mehr absinkende Biomasse, die von Mikroorganismen unter Verbrauch von Sauerstoff zersetzt wird. Der sauerstoffarme Wasserkörper schwillt weiter an und löst Phosphat sowie Eisen aus immer größeren Sedimentflächen. Einmal in Gang gesetzt, sind solche Rückkopplungsmechanismen nur schwer zu stoppen. Sie treten zum Beispiel in der Ostsee auf. Trotz der inzwischen stark reduzierten Nährstoffeinträge breiten sich die anoxischen Gebiete dort nach wie vor aus, und es kommt vermehrt zu starken Algenblüten.

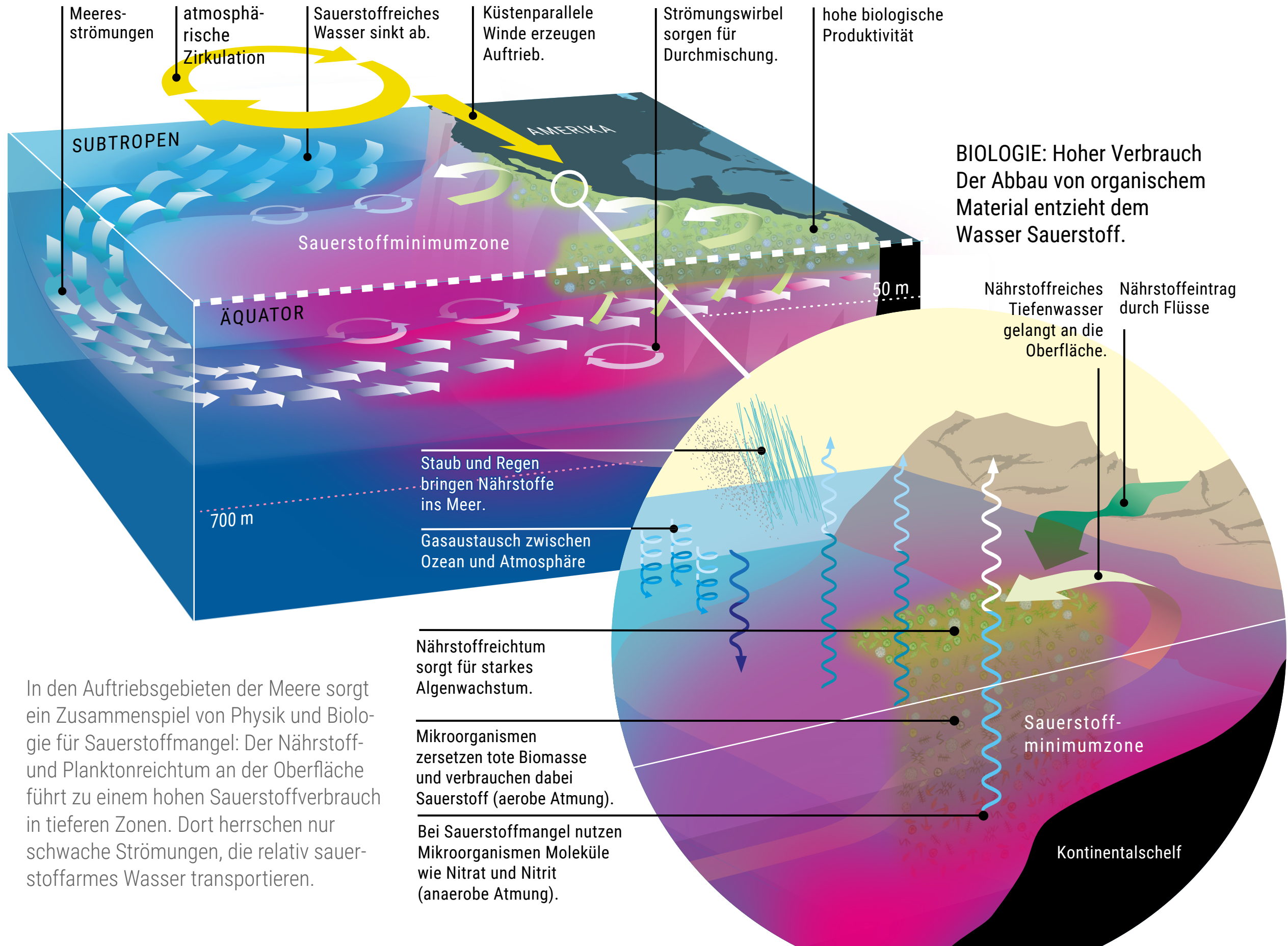
Im Lauf der Erdgeschichte haben sich warme und kalte Phasen immer wieder abgewechselt. Was können wir daraus für die Zukunft der Meere lernen? So genannte ozeanische anoxische Events, die mit einer starken Abnahme des Sauerstoffgehalts in den Ozeanen einhergingen, traten vor allem in Perioden rascher globaler Erwärmung auf und waren mit hohen CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre verbunden. Beispiele für solche Ereignisse finden

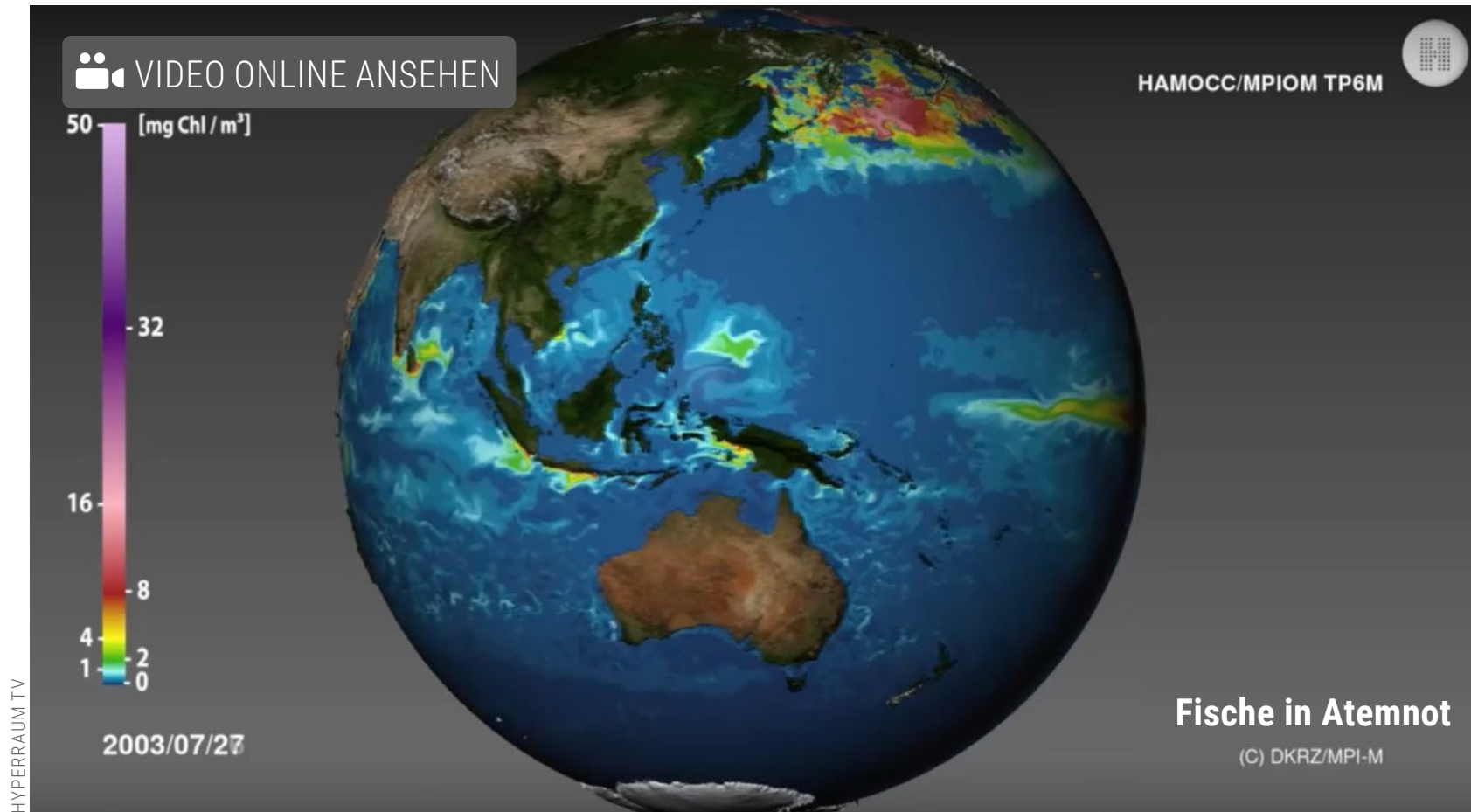
sich etwa in der Kreidezeit (145 bis 66 Millionen Jahre vor heute). Wissenschaftler vermuten, dass Vulkane einst große Mengen an Treibhausgasen freisetzten und die Atmosphäre aufheizten. In der Folge veränderten sich auch die Meeresströmungen, die Tropen und Subtropen reichten deutlich weiter in Richtung Pole als heute. Die hohen Temperaturen intensivierten zudem den globalen Wasserkreislauf, was mit verstärkter Verwitterung von Gesteinen und höheren Nährstoffeinträgen in die Ozeane einherging, etwa in Form von Phosphat. Letzten Endes führte das zu erheblich weniger Sauerstoff in den Meeren. Eines dieser anoxischen Events vor rund 91,5 Millionen Jahren löste eines der fünf großen Massenaussterben aus.

Die Kreidezeit war von Prozessen geprägt, die auch heute sauerstoffarme Zonen entstehen lassen: mangelnde Durchmischung des Tiefenwassers kombiniert mit einer geringeren Sauerstofflöslichkeit auf Grund der gestiegenen Ozeantemperatur und reichlich Nährstoffen. Das sorgte für eine sehr produktive Schicht nahe der Meeresoberfläche. Darunter bildete sich eine riesige sauerstofffreie Zone. Da organisches Material hier vergleichsweise lang-

PHYSIK: Mangelnde Belüftung
Ozeanische Strömungen liefern nicht genügend Sauerstoff nach.

Wie Todeszonen entstehen





sam abgebaut wird, erreichte ein größerer Anteil als heute den Meeresgrund. Über Jahrmillionen verwandelten sich diese Ablagerungen zu fossilen Brennstoffen, die der Mensch dem Kohlenstoffkreislauf nun wieder zuführt.

Was tragen wir also bei zur Ausdehnung von sauerstoffarmen Meeresregionen? Und können wir verhindern, dass weitere Todeszonen entstehen? Es gibt zwei wichtige Faktoren, auf die wir Einfluss haben: die globale Erwärmung und die gewaltigen Nährstoffeinträge in den Ozean.

Der Klimawandel ist ein globales und vielschichtiges Problem, das nur auf internationaler Ebene zu lösen ist. Die Nährstoffverfügbarkeit im Meer hingegen ist je nach Region steuerbar. Während die hohe Produktion von Biomasse vor der Küste Perus aus einem natürlichen Prozess – dem Auftrieb von nährstoffreichem Tiefenwasser – resultiert, stammen die Nährstoffe in Gewässern wie der Ostsee oder dem Golf von Bengalen zu einem erheblichen Teil aus Haushalts- und Industrieabwässern sowie der Landwirtschaft. Um die

Mengen dort zu reduzieren, müsste man weniger Dünger einsetzen und in Kläranlagen investieren.

Immer mehr Nährstoffe fallen vom Himmel

Eine weitere, zunehmend relevante Nährstoffquelle im offenen Ozean sind Luftschadstoffe, zum Beispiel Stickoxide. Aus verkehrs- und industriellastigen Regionen stammend verteilen sie sich rund um den Globus. Regen wäscht die Verbindungen aus der Atmosphäre und spült sie ins Meer. Der atmosphärische Stickstoffeintrag in den Ozean entspricht nach aktuellen Berechnungen etwa der Menge, die weltweit über Flüsse in Küstengewässer gelangt.

Forscher haben im vergangenen Jahrzehnt große Fortschritte gemacht, Sauerstoffminimumzonen und die dort ablaufenden Prozesse zu verstehen. Dennoch ist bislang nicht vollständig beantwortet, was deren Entstehung sowie den Transport und Abbau von organischem Material unter anoxischen Bedingungen reguliert. Mit Computernmodellen lassen sich ohne solche Informationen nur schwer präzise Vorhersagen für den Ozean treffen. So ist die

tatsächlich gemessene Sauerstoffabnahme im Meer etwa doppelt so hoch wie von hoch aufgelösten Modellen angegeben. Es ist unklar, ob dem eine fehlerhafte Abschätzung der sich verändernden Ozeanzirkulation zu Grunde liegt oder die Modelle die biologischen und chemischen Prozesse noch nicht richtig erfassen. Zukünftige Expeditionen und Langzeitbeobachtungen in den Auftriebsgebieten werden darauf eine Antwort liefern. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, November 2018)

Breitburg, D. et al.: Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters. In: Science 359, eaam7240, 2018

Bristow, L. A. et al.: N₂ Production Rates Limited by Nitrite Availability in the Bay of Bengal Oxygen Minimum Zone. In: Nature Geoscience 10, S. 24–29, 2017

Duce, R. A. et al.: Impacts of Atmospheric Anthropogenic Nitrogen on the Open Ocean. In: Science 320, S. 893–897, 2008

Schmidtko, S. et al.: Decline in Global Oceanic Oxygen Content during the Past Five Decades. In: Nature 542, S. 335–339, 2017

Stramma, L. et al.: Expansion of Oxygen Minimum Zones May Reduce Available Habitat for Tropical Pelagic Fishes. In: Nature Climate Change 2, S. 33–37, 2012

Spektrum der Wissenschaft KOMPAKT

KLIMASCHUTZ

Welche Wege führen zum Ziel?

Pariser Abkommen | Die Klimaziele wanken
Kohlenstoffeinlagerung | Ab in den Untergrund
Energiepolitik | Klimafaktor Indien

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR
€ 4,99

A vibrant underwater photograph of a coral reef. The foreground is dominated by large, branching coral structures in shades of orange, yellow, and brown. Numerous small, colorful fish, including yellow and blue ones, are swimming throughout the clear blue water. Sunlight rays penetrate the water from the surface, creating a bright and lively atmosphere. The background shows more coral and the surface of the water with ripples.

ÖKOLOGIE

MEERESWELT IM WÜRGEGRIFF

von Danielle L. Dixon

Die Versauerung der Ozeane könnte sich dramatisch
auf das Verhalten von Wassertieren auswirken.

Anemonenfische (*Amphiprion*) bewohnen Korallenriffe und verbringen dort als erwachsene Tiere ihr gesamtes Leben im Schutz einer einzelnen Seeanemone. Zuvor aber, während ihrer Jugend, müssen sie eine riskante Reise bewältigen. Nach dem Schlüpfen schwimmt die Fischlarve vom Riff ins offene Meer und entwickelt sich dort weiter. 11 bis 14 Tage später ist das juvenile Tier reif genug, um zurückzuschwimmen und ein symbiotisches Verhältnis mit einer Seeanemone einzugehen. Doch nahe dem Riff lauern alle möglichen Kreaturen auf Beute, darunter Lipp- und Rotfeuerfische. Die kleinen Anemonenfische können die Räuber jedoch am Duft erkennen und umgehen.

Der Geruchssinn, von dem die Tiere dabei Gebrauch machen, ist angewandte Chemie. Er detektiert Moleküle im Wasser und leitet die entsprechenden Informationen ans Zentralnervensystem weiter, das darauf adäquat reagiert, indem es beispiels-

Danielle L. Dixon ist Juniorprofessorin für Meereskunde an der University of Delaware. Sie untersucht, wie Klimawandel und Umweltveränderungen das Verhalten von Meerestieren beeinflussen.

weise ein Vermeidungsverhalten auslöst. Schon kleine Verschiebungen in der chemischen Zusammensetzung des Ozeanwassers genügen, um diesen Mechanismus zu stören. Wissenschaftler fragen sich daher zunehmend, was wohl geschehen wird, wenn der Säuregehalt des Wassers steigt. Dies ist weltweit zu beobachten, weil der Mensch immer mehr Kohlenstoffdioxid (CO₂) in die Atmosphäre freisetzt, von dem sich ein großer Teil in den Ozeanen löst und dort mit dem Wasser teilweise zu Kohlensäure reagiert.

2010 setzten meine Mitarbeiter und ich 300 frisch geschlüpfte Anemonenfischlarven in einen Labortank voller Seewasser und beobachteten sie elf Tage lang. Fügten wir dem Medium Duftstoffe von harmlosen Meeresbewohnern zu, reagierten die Fische nicht. Brachten wir jedoch den Duftstoff einer räuberischen Spezies ein, in diesem Fall des Dorschartigen *Lotella rhacina*, schwammen sie von der Geruchsquelle weg.

Wir wiederholten die Experimente mit 300 weiteren Larven derselben Eltern. Dieses Mal setzten wir die Tiere jedoch in saureres Wasser. Dessen pH-Wert entsprach jenem, der in vielen Ozeanregionen im Jahr 2100 zu erwarten ist, sollte der gegenwärtige

AUF EINEN BLICK

Schleichende Katastrophe

- 1 Der anthropogene Ausstoß von Kohlenstoffdioxid führt zu einer Versauerung der Ozeane. Das hat Folgen für die Meeresfauna.
- 2 Werden Anemonenfische, Haie und Krebstiere einem erhöhten Säuregehalt ausgesetzt, stört das ihr Verhalten gegenüber Gefahren und Beutetieren.
- 3 Noch ist nicht klar, inwieweit sich Meeresbewohner an die allmählichen Veränderungen der Ozeane anpassen. Untersuchungen von Riffen nahe vulkanisch aktiven Orten könnten hier Einblicke liefern.

Versauerungstrend anhalten. Die jungen Fische entwickelten sich normal, doch keiner von ihnen mied den Gefahr signalisierenden Geruch der Meeresräuber. Im Gegenteil, sie schwammen ihm sogar eher entgegen.

Versahen wir das saurere Wasser sowohl mit Duftstoffen von Räubern als auch mit solchen von harmlosen Meerestieren, schie-

nen die Anemonenfische unentschlossen zu sein; sie schwammen ebenso lange in Richtung des einen wie des anderen Geruchs. Offenbar konnten sie chemische Signale zwar noch wahrnehmen, aber ihnen keine Bedeutung mehr zuordnen. Das war ein überraschender und beunruhigender Befund. Wir hatten damit gerechnet, dass sich die Versauerung ein Stück weit auf die chemische Signalverarbeitung auswirken könnte. Aber niemals hatten wir erwartet, sie könne einen Fisch dazu bringen, dem drohenden Tod entgegenschwimmen.

Lebewesen, wo auch immer, stehen in ihrem Leben vor drei fundamentalen Herausforderungen: Nahrung finden, Nachkommen produzieren und vermeiden, selbst gefressen zu werden. An Orten wie Korallenriffen, wo sich Räuber und Beutetiere einen räumlich begrenzten, dicht besiedelten, komplexen Lebensraum teilen, begünstigt die natürliche Selektion vor allem solche Arten, die ihren Feinden aus dem Weg gehen. Jede Einschränkung dieser Fähigkeit könnte katastrophale Folgen für das ganze Ökosystem haben.

Wenn zunehmend saures Wasser die Geruchswahrnehmung der Anemonenfische stört, dann kann es möglicherweise auch

andere Sinne und Verhaltensweisen beeinflussen. Wir haben zwar nur mit einer Fischart experimentiert, doch der olfaktorische Sinn spielt für sehr viele weitere eine überlebenswichtige Rolle. Zumindest könnten die Verwirrung und Desorientierung, die mit einer Geruchsirritation einhergehen, zusätzlichen Stress auf Fische ausüben, die bereits wegen steigender Wassertemperaturen, Überfischung und veränderter Nahrungsverfügbarkeit unter Druck stehen. Wenn sich immer mehr Meeresbewohner untypisch verhalten, könnten ganze Nahrungsketten und Ökosysteme zusammenbrechen. Obwohl die Wissenschaft hier noch am Anfang steht, fügen sich die bisherigen Resultate allmählich zu einem Bild zusammen: Die Versauerung der Ozeane hat weit reichende Folgen für die Tierwelt.

Seit Beginn der industriellen Revolution ist der atmosphärische Gehalt von Kohlenstoffdioxid von 280 auf mehr als 400 ppm (parts per million, deutsch: Teile pro eine Million) angestiegen. Die Zahl wäre noch viel höher, gäbe es die Ozeane nicht, die 30 bis 40 Prozent des emittierten CO_2 aufnehmen. Doch wenn sich mehr Kohlenstoffdioxid im Meerwasser löst, entsteht dort auch mehr Kohlensäure, was den pH-Wert der

Ozeane sinken lässt. Oberflächennahes Meerwasser ist leicht alkalisch mit pH-Werten um 8. Der anthropogene Eintrag von CO_2 hat bis heute bereits zu einer pH-Wert-Reduktion um zirka 0,1 geführt, verglichen mit der Zeit gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Dies entspricht einer um 30 Prozent höheren Konzentration von Oxoniumionen. Setzt sich der gegenwärtige Trend der Emissionen bis zum Ende dieses Jahrhunderts fort, könnte die Oxoniumkonzentration dann um 150 Prozent zugenommen haben, entsprechend einer pH-Wert-Erniedrigung um etwa 0,4.

Wie ein saureres Milieu das Verhalten ändert: Unerwartete Ergebnisse im Experiment

Sinkende pH-Werte in den Meeren führen dazu, dass sich Kalzit und Aragonit verstärkt im Wasser lösen – zwei Minerale, aus denen die Hüllen zahlreicher Meerestiere bestehen. Planktonorganismen, Schalenweichtiere und Seeigel, die in Wassertanks mit hohem CO_2 - und somit Kohlensäuregehalt aufwachsen, entwickeln unvollständige oder deformierte Schalen und Außenskelette. Dagegen nahm man von Fischen und anderen schalenlosen Organismen

lange Zeit an, diese könnten sich auf die Meeresversauerung einstellen. Denn laut Untersuchungen aus den 1980er Jahren sind etliche marine Tiere erstaunlich gut dazu in der Lage, das chemische Milieu in ihrem Organismus zu regulieren, indem sie die Gehalte an Hydrogenkarbonat- und Chloridionen im Körpergewebe verändern. Diese Studien hatten jedoch nur die Physiologie in den Blick genommen und darauf geschaut, ob die Tiere in einer saureren Umgebung überleben können. Fähigkeiten wie das Aufspüren von Nahrung oder das Vermeiden von Risiken standen damals nicht im Fokus. Unser Team zählte zu den Ersten, die solchen Dingen nachgingen.

Weil viele riffbewohnende Räuber tagsüber jagen, kehren die jungen Anemonenfische bevorzugt nachts zurück, um nach einem Symbiosepartner zu suchen. Während der Dämmerstunden und besonders bei schräg einfallendem Mondlicht sind die Raubfische träge beziehungsweise schläfrig. Doch das Navigieren im dunklen, konturlosen, offenen Ozean ist für einen Fisch, der kaum die Größe einer Zehn-Cent-Münze erreicht, nicht einfach. Die Tiere lassen sich von Geräuschen leiten, die das Riff und seine Bewohner erzeugen. Wir un-

tersuchten deshalb nicht nur, ob sich die Versauerung des Wassers auf den Geruchssinn der Anemonenfische auswirkt, sondern auch, ob sie deren Hörvermögen beeinflusst.

Hierzu setzten wir juvenile Tiere in einen Meerwassertank, der sich beschallen ließ. Spielten wir Riffgeräusche ein, die typischerweise am Tag zu hören sind, hielten sich die Fische fast drei Viertel ihrer Zeit möglichst weit entfernt von der Schallquelle auf. Führten wir das Experiment jedoch mit Tieren durch, die ihr kurzes Leben in Wasser mit 60 Prozent höherem Säuregehalt verbracht hatten – ein pH-Wert, wie er in flachen Meeren für das Jahr 2030 zu erwarten ist – bekamen wir ganz andere Ergebnisse. Nun schwamm mehr als jedes zweite Tier zur Schallquelle hin.

Wir wiederholten das Experiment noch zwei weitere Male, und zwar mit Wasser, das um 100 beziehungsweise 150 Prozent saurer war. Entsprechende marine pH-Werte könnten in den Jahren 2050 beziehungsweise 2100 vorherrschen. Unter beiden Bedingungen verbrachten die Anemonenfische rund 60 Prozent ihrer Zeit in der Nähe des Lautsprechers, der tagtypische Riffgeräusche einspielte. Separate Tests belegten, dass die

Fische über ein normales Hörvermögen verfügten. Damit war klar: In stark versauertem Wasser sind die Fische nicht mehr in der Lage, auf wichtige akustische Signale adäquat zu reagieren. Meeresbewohner, deren Sinne dermaßen verwirrt sind, werden für ihre Fressfeinde zu leichten Opfern. Zudem könnten sie beim Suchen von Nahrung schlechter abschneiden.

Haie sind berühmt für ihren hochempfindlichen Geruchssinn, mit dessen Hilfe sie navigieren, Geschlechtspartner finden und Beute aufspüren. Angesichts unserer Befunde an Anemonenfischen fragten wir uns, wie wohl Haie auf den zunehmenden Säuregehalt des Meerwassers reagieren. Wir fingen 24 erwachsene Exemplare des Dunklen Glatthais (*Mustelus canis*) vor der ost-amerikanischen Küste. Diese relativ kleinen Räuber ziehen in den warmen Gewässern zwischen South und North Carolina und Neuengland umher. Unseren Fang teilten wir in drei Gruppen auf und hielten jede davon in einem kleinen Becken. Die Tiere der ersten Gruppe schwammen in normalem Ozeanwasser und die der zweiten in behandeltem Meerwasser, dessen pH-Wert dem prognostizierten des Jahres 2050 entsprach. Die Haie der dritten Gruppe setzten wir ei-

nem pH-Wert aus, wie er in den Ozeanen des Jahres 2100 zu erwarten ist. Darüber hinaus erzeugten wir eine Tintenfischlösung, indem wir tote Tintenfische in Meerwasser einweichten und dieses durch ein Sehtuch pressten (die Kopffüßer gehören zur bevorzugten Beute der Räuber).

Nach fünf Tagen entließen wir die Haie einzeln in einen Durchflusstank, der zehn Meter lang und zwei Meter breit war. Der pH-Wert des Wassers darin entsprach dem ihres jeweiligen Schwimmbeckens. In den Tank mündeten zwei Düsen, die Wasser ins Innere beförderten. Sie erzeugten zwei Strömungen: eine entlang der linken Wand und die andere entlang der rechten. Nachdem die Haie zu schwimmen begonnen hatten, führten wir über eine der beiden Düsen etwas Tintenfischlösung ein. Da wir nicht ausschließen konnten, dass die Raubfische eine bestimmte Seite des Tanks von vornherein bevorzugen würden, wechselten wir später auf die andere Düse, damit die Ergebnisse nicht verzerrt würden.

Wenn selbst dem Meeresräuber schlechthin die Lust auf Fressen vergeht

Kameras zeichneten auf, und Computerprogramme werteten aus, was nun geschah.

Die Haie der ersten Gruppe, die in normalem Meerwasser gehalten worden waren, verbrachten mehr als 60 Prozent ihrer Zeit in jener Strömung, die Tintenfischlösung enthielt. Die Tiere der zweiten Gruppe (leicht versauertes Wasser) taten das Gleiche. Doch diejenigen aus Gruppe 3 (stark versauert) mieden aktiv das Odeur ihrer bevorzugten Beutetiere, indem sie weniger als 15 Prozent ihrer Zeit in der entsprechenden Strömung verbrachten. Und es gab noch weitere Unterschiede. Platzierten wir einen Stein vor der Düse mit der austretenden Tintenfischlösung, attackierten ihn die Haie aus Gruppe 1 mehr als doppelt so oft wie die aus Gruppe 2 – und mehr als dreimal so häufig wie jene aus Gruppe 3.

Es ist verblüffend zu sehen, wie ein derart aktiver Räuber das Interesse an potenzieller Beute verliert und sogar deren Geruch meidet. Angesichts der enormen Bedeutung, die Haie als Spitzenprädatoren haben, und ihrer großen Empfindlichkeit gegenüber Umweltveränderungen liegt der Schluss nahe, dass die Versauerung der Ozeane sowohl für die Tiere selbst als auch für ihre Ökosysteme sehr gefährlich ist.

Freilich muss man immer vorsichtig damit sein, Ergebnisse aus einer Laborumge-

bung in die Realität zu übertragen. Wir suchten deshalb eine sandige Lagune im Bereich des Great Barrier Reef auf, um dort die Risikobereitschaft wilder Meeresbewohner zu untersuchen. Wir überprüften, wie juvenile Demoisellen (*Chrysiptera*, aus der Familie der Riffbarsche), die wir in der Lagune gefangen und vier Tage lang in relativ saurem Wasser gehalten hatten, auf den Geruch von Raubfischen reagierten. In einem Durchflusstank schwammen etwa 50 Prozent jener Tiere, die wir dem für 2050 erwarteten Säuregehalt ausgesetzt hatten, in die Strömung mit dem Duft eines Fressfeinds hinein. Konfrontierten wir die Riffbarsche mit einem Säuregehalt, wie er für 2100 prognostiziert wird, bewegten sich sogar alle von ihnen zu dem Geruch der Räuber hin.

Wir markierten die Fische, um sie identifizieren zu können, und setzten sie an einem kleinen Riff aus, das wir in der Lagune angelegt hatten. Die Tiere, die wir dem höchsten Säuregehalt ausgesetzt hatten, zeigten ein riskantes Verhalten: Statt sich nahe der schützenden Korallen aufzuhalten, schwammen sie öfter und weiter ins umgebende Meer als ihre Artgenossen, die in normalem Meerwasser gefangen gewe-

sen waren. Auch kamen sie nach einer vorübergehenden Bedrohung schneller wieder aus dem Riff hervor. Folgerichtig wurden jene Fische, die den prognostizierten Säuregehalt des Jahres 2100 hatten ertragen müssen und sich nun besonders wagemutig zeigten, deutlich häufiger gefressen – nämlich neunmal so oft wie normal. Die Rifffbarsche in der Lösung mit moderatem Säuregehalt waren nicht ganz so tollkühn, erlagen ihren Fressfeinden aber immerhin noch fünfmal so oft.

Riffbewohnende Fische sind bei Wissenschaftlern geschätzte Modellorganismen, weil sie ein konsistentes Verhalten zeigen und leicht zu beobachten sind. Das wirft die Frage auf, inwieweit sich die Befunde aus Experimenten mit ihnen verallgemeinern lassen. Versuche an anderen Meeres-tieren haben jedoch ebenfalls seltsame Verhaltensweisen zu Tage gefördert. Forscher vom Monterey Bay Aquarium Research Institute beispielsweise zogen Einsiedlerkrebse in stark versauertem Milieu auf. Die Krebstiere zeigten daraufhin keine höhere Risikobereitschaft als die Rifffbarsche, aber sie brauchten viel länger als sonst, um nach einer vorübergehenden Bedrohung wieder aus ihren Behausungen herauszukommen.

Forscher in Chile wiederum experimentierten mit *Concholepas concholepas*, einer Spezies aus der Familie der Stachelschnecken, die in der Gezeitenzone vor Südamerika lebt. Wenn eine heftige Welle die Tiere von ihren Sitzplätzen spült, heften sie sich normalerweise sehr schnell wieder am Untergrund fest, damit sie nicht umherdriften und dabei zum leichten Opfer werden. Bei steigendem CO₂- und damit Kohlen-säuregehalt im Wasser benötigten die Schnecken zunächst weniger Zeit, um sich aufzurichten, büßten dann aber ihre Fähigkeit ein, lauern den Krebstieren in der Nähe zu entgehen. Einige bewegten sich sogar direkt auf die Scheren ihrer Fressfeinde zu, statt sich davon fernzuhalten.

Erhöhter Säuregehalt beeinträchtigt die Weiterleitung von Signalen in Nervenzellen

Die Ozeanversauerung beeinflusst ganz offensichtlich das Verhalten von Meerestieren. Aber was ist der Mechanismus dahinter? Einige Forscher fragten sich, ob der sinkende pH-Wert die Reize selbst verändert, also die Gerüche und die Laute. Doch wie Experimente ergeben haben, können Fische chemische Reize auch in Wasser mit

hohem CO₂-Gehalt ohne Weiteres wahrnehmen. Andere Wissenschaftler spekulieren, das veränderte Verhalten der Meeresbewohner könne eine Stressreaktion auf den niedrigen pH-Wert der Umgebung sein. Belege hierfür stehen allerdings vielfach noch aus.

Um etwas Licht in diese Angelegenheit zu bringen, entschieden Philip Munday von der australischen James Cook University und ich uns dafür, mit Göran E. Nilsson von der Universität Oslo zusammenzuarbeiten. Nilsson vermutet, eine Versauerung des Wassers könne den Neurotransmitter-Rezeptor GABA_A beeinflussen, der eine wichtige Rolle in den Nervensystemen vieler Tiere spielt – einschließlich des Menschen. GABA_A ist ein ligandengesteuerter Chloridionenkanal, der sich öffnet, sobald der Neurotransmitter GABA (gamma-Aminobuttersäure) an ihn bindet. Das führt zu einer erhöhten Durchlässigkeit der Zellmembran für Chlorid- und Hydrogenkarbonationen, was die Erregbarkeit der Nervenzelle herabsetzt und die Weiterleitung von Nervensignalen hemmt.

Werden Fische einem erhöhten CO₂-Gehalt ausgesetzt, scheiden sie Chloridionen

aus, um mehr Hydrogenkarbonationen im Organismus anzureichern – ein Versuch, die Änderungen des pH-Werts im Körper minimal zu halten. Infolge dieser neuen chemischen Situation werden GABA_A-Rezeptoren aktiv und Nervensignale nicht mehr so gut weitergeleitet. Setzt man davon betroffene Fische in einen Tank mit gabazinhaltigem Wasser (Gabazin ist eine Substanz, die GABA_A-Rezeptoren in ihrer Wirkung hemmt), beginnen sich die Tiere nach rund 30 Minuten wieder normal zu verhalten. Die Empfindlichkeit der GABA_A-Rezeptoren könnte sich jedoch von Tierart zu Tierart unterscheiden, weshalb noch unklar ist, ob hier die Hauptursache für die beobachteten Verhaltensauffälligkeiten liegt.

Die entscheidende Frage lautet: Welche Umweltveränderungen können marine Lebewesen noch tolerieren? Etwa die Hälfte der untersuchten riffbewohnenden Fische zeigte ein gestörtes Verhalten, wenn der Säuregehalt des Wassers auf das für 2050 erwartete Niveau angehoben wurde, während unter den für 2100 prognostizierten Bedingungen praktisch alle betroffen waren. Allerdings wirkte der erhöhte CO₂-Gehalt in diesen Experimen-

ten meist nur einige Tage bis wenige Monate lang ein – ein kurzer Zeitraum, der nicht wirklich eine Anpassung an die neuen Verhältnisse erlaubt. Zu klären bleibt, wie das bei Wildtieren ist, die permanent in einem Ozean leben, der sich allmählich wandelt.

Wissenschaftler haben auch schon eine Möglichkeit gefunden, dem nachzugehen. Sie untersuchen Riffe in der Nähe von Stellen, an denen vulkanische Gase austreten. Dort strömt Kohlenstoffdioxid aus dem Meeresboden und senkt den pH-Wert des Wassers auf Werte ab, wie sie allgemein für das Jahr 2100 erwartet werden. Als wir entsprechende Riffe in Papua Neuguinea besichtigten, stellten wir fest, dass sich junge Riffbarsche nahe an Gasaustrittsstellen zum Duft von Raubfischen hin orientieren, nicht zwischen den Gerüchen von Fressfeinden und harmlosen Meeresbewohnern unterscheiden und ein risikoreiches Verhalten an den Tag legen – dieselben Merkwürdigkeiten, die wir auch unter Laborbedingungen beobachtet hatten. Werden diese Verhaltensauffälligkeiten vielleicht sogar an die Nachkommen vererbt? Eine Studie hat immerhin schon Hinweise darauf geliefert, dass der Nachwuchs riffbe-

wohnender Fische, die unter erhöhtem CO₂-Gehalt aufgewachsen waren, offenbar keine Vorteile hinsichtlich einer Anpassung an niedrige pH-Werte hat.

Die Versauerung der Ozeane ist nur eine von vielen Umweltveränderungen. Überfischung, steigende Wassertemperaturen, zunehmende Verschmutzung, das Verschwinden von Spitzenprädatoren wie Haien – all das schadet den marinen Biotopen. Einige Probleme kann man recht erfolgreich lokal angehen, etwa die Bejagung von Haien. Globalen Entwicklungen wie dem Temperaturanstieg und der Versauerung kommt man damit jedoch nicht bei. Sie könnten viele ohnehin bedrohte Arten aussterben lassen. Nur indem wir analysieren, wie sich solche Stressoren auf die Meeresbewohner auswirken, bekommen wir eine realistische Vorstellung davon, was uns erwartet.

(Spektrum der Wissenschaft, Januar 2018)

Dixon, D. L. et al.: Odor Tracking in Sharks Is Reduced under Future Ocean Acidification Conditions. In: *Global Change Biology* 21, S. 1454–1462, 2015

Munday, P. L. et al.: Behavioural Impairment in Reef Fishes Caused by Ocean Acidification at CO₂ Seeps. In: *Nature Climate Change* 4, S. 487–492, 2014

Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR

01

03.01.
2019

- > Ultima Thule – ein roter Schneemann im All
- > Wie lässt Sport Fettpolster schmelzen?
- > Geben verliert nie seinen Reiz

TITELTHEMA: LUNAR GATEWAY

Die USA und ihre Mondpläne – flexibel bis beliebig

Die NASA arbeitet unter Hochdruck an einer Raumstation für den Mond. Vieles an diesem Konzept ist bis heute unausgegrenzt.



FLYNN-EFFEKT

Warum die Intelligenz nicht weiter steigt



KLIMAWANDEL

Getreide für alle Bedingungen



TEILCHENPHYSIK

Meuterei der Mesonen

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Im Abo nur
0,92 €
pro Ausgabe

Jetzt bestellen!
**Das wöchentliche
Wissenschaftsmagazin**
als Kombipaket im Abo:
Als App und PDF

HIER ABONNIEREN!

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.